

**ВЕСТНИК
САРАТОВСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА**

2008

**№ 1 (31)
Выпуск 2**

Научно-технический журнал

Издается с 2003 г.
Выходит один раз в квартал
Февраль 2008 г.

Журнал включен в перечень ведущих рецензируемых журналов и научных изданий, утвержденный президиумом ВАК Министерства образования и науки РФ, в которых публикуются основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора наук по направлениям: машиностроение, управление, вычислительная техника и информатика, экономика; ученой степени кандидата наук по направлениям: энергетика, электроника, измерительная техника, радиотехника и связь, социология

**Главный редактор
Зам. главного редактора
Ответственный секретарь**

д.т.н., профессор Ю.В. Чеботаревский
д.э.н., профессор В.Р. Атоян
д.т.н., профессор А.А. Игнатьев

Редакционный совет: д.э.н. В.Р. Атоян (заместитель председателя), д.т.н. В.И. Волчихин, д.т.н. В.А. Голенков, д.и.н. В.А. Динес, д.х.н. В. Зеленский (Польша), д.т.н. В.А. Игнатьев, д.т.н. В.В. Калашников, д.ф.-м.н. Л.Ю. Коссович, д.т.н. И.А. Новаков, д.т.н. А.Ф. Резчиков, д.т.н. Ю.В. Чеботаревский (председатель), д.ф.-м.н. Ян Аврејцевич (Польша), д.э.н. Улли Арнольд (Германия), д.ф.-м.н. Энтони Мерсер (Великобритания), д.э.н. Э.де Соузе Феррейра (Португалия), д.т.н. Т. Чермак (Чехия), д.э.н. Ю.В. Шленов.

Редакционная коллегия: д.т.н. К.П. Андрейченко, д.т.н. А.И. Андрющенко, д.т.н. Ю.С. Архангельский, д.ф.н. А.С. Борщов, д.т.н. А.С. Денисов, д.т.н. Ю.Г. Иващенко, д.т.н. Ю.Н. Климочкин, д.т.н. В.А. Коломейцев, д.т.н. А.В. Королев, д.т.н. В.А. Крысько, д.т.н. В.И. Лысак, д.т.н. В.Н. Лясников, д.т.н. А.И. Финаенов, д.социол.н. А.Ю. Слепухин, д.т.н. М.А. Щербаков.

Редактор О.А. Панина
Компьютерная верстка Ю.Л. Жупиловой
Перевод на английский язык А.М. Руст

Адрес редакции:
Саратов, 410054, ул. Политехническая, 77
Телефон: (845 2) 52 74 02
E-mail: vestnik @ sstu. ru; vra @ sstu. ru
http://dni. sstu. ru/vestnik.nsf
Факс: (845 2) 50 67 40

Подписано в печать 12.02.08
Формат 60×84 1/8 Бум. офсет.
Усл. печ. л. 40,5 Уч.-изд. л. 40,0
Тираж 500 экз. Заказ 20
Отпечатано в РИЦ СГТУ,
410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77

Подписной индекс 18378
(каталог «Газеты. Журналы» на 1-е полугодие 2008 г.)

ISBN 978-5-7433-1892-6

© Саратовский государственный
технический университет, 2008

**VESTNIK
SARATOV
STATE
TECHNICAL
UNIVERSITY
2008**

**№ 1 (31)
Edition 2**

Scientific Journal

Since 2003
Once in a quarter
February 2008

This journal is included into the list of leading reviewed journals and scientific publications approved by the presidium of Ministry of Education and Sciences of Russian Federation where major scientific thesis's results for academic degree competition for a doctor of sciences in machinebuilding, management, computer technics and information sciences, economics; a candidate of sciences in power engineering, electronics, measuring technology, radio engineering and connection directions, sociology are published

Editor-in-chief Doctor of Technical Sciences, Pr. Y.V. Chebotarevsky
Editor-in-chief assistant Doctor of Economics, Pr. V.R. Atoyan
Executive secretary Doctor of Technical Sciences, Pr. A.A. Ignatyev

Drafting committee: Pr. V.R. Atoyan (Vice of the Chairman), Pr. V.I. Volchihin, Pr. V.A. Golenkov, Pr. V.A. Dines, Pr. V. Zelensky (Poland), Pr. V.A. Ignatyev, Pr. V.V. Kalashnikov, Pr. L.Y. Kossovich, Pr. I.A. Novakov, Pr. A.F. Rezchikov, Pr. Y.V. Chebotarevsky (the Chairman), Pr. Yan Avreytsevich (Poland), Pr. Ulli Arnold (Germany), Pr. Anthony Merser (UK), Pr. E. D'Sousa Ferreira (Portugal), Pr. T. Chermak (Chezh Republic), Pr. Y.V. Shlenov.

Editorial board: Pr. K.P. Andreychenko, Pr. A.I. Andryushenko, Pr. Y.S. Arkhangelsky, Pr. A.S. Borshov, Pr. A.S. Denisov, Pr. Y.G. Ivashenko, Pr. Y.N. Klimochkin, Pr. V.A. Kolomeitsev, Pr. A.V. Korolyov, Pr. V.A. Krysko, Pr. V.I. Lysak, Pr. V.N. Lyasnikov, Pr. A.I. Finaenov, Pr. A.Y. Slepukhin, Pr. M.A. Sherbakov.

Editor O.A. Panina
Computer-based page-proof J.L. Zhupilova
Rendering A.M. Rust

Editorial office: 77, Politechnicheskaya Street
Saratov, 410054
Russia
Telephone: +8452/52-74-02
E-mail: vestnik @ sstu. ru; vra @ sstu. ru
<http://dni.sstu.ru/vestnik.nsf>
Fax: +8452/50-67-40

Signed for publishing: 12.02.08
Format 60x84 1/8 Paper offset.
Apr. tp. l. 40,5 Acc.-pbl. l. 40,0
Edition 500 psc. Order 20
Printed in EPC of SSTU,
77, Politechnicheskaya St., Saratov, 410054, Russia

ISBN 978-5-7433-1892-6

© Saratov State Technical University, 2008

СОДЕРЖАНИЕ

Анатолий Иванович Андриющенко (31 октября 1914 – 4 января 2008)..... 7

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

Резчиков А.Ф., Голембиовский Ю.М. Адаптивные системы электроснабжения – основа электроэнергетики будущего.....	9
Филиппов С.П. Интегрированный подход к прогнозированию потребностей страны и регионов в энергоносителях на долгосрочную перспективу	13
Каганович Б.М., Кейко А.В., Филиппов С.П., Шаманский В.А. Моделирование неравновесных открытых систем методами равновесной термодинамики.....	27
Андриющенко А.И., Николаев Ю.Е. Эффективность теплофикации в современных условиях и факторы, ее определяющие.....	39
Бродянский В.М. О терминологической базе современной инженерной термодинамики.....	44
Эткин В.А. Термодинамика на рубеже столетий.....	51
Степанов В.С. Исследование термодинамической эффективности процессов с физико-химическими превращениями веществ	60
Степанова Т.Б. Определение резервов энергосбережения и прогноз энергопотребления на основе термодинамического анализа технических систем	66
Крысько А.В., Авреичевич Я., Кузнецова Э.С. О влиянии температурного поля на сложные колебания замкнутых цилиндрических баллонов.....	71
Артеменко С.Е., Кадыкова Ю.А. Базальтопластики – эффективные материалы для теплоэнергетики.....	85

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

Аминов Р.З. Диссертационному совету по энергетике 45 лет	93
Хрусталева В.А., Шутиков А.В. Выбор параметрических программ регулирования парогенераторов и паровпуска турбин 1000 МВт АЭС с ВВЭР в режимах сверхноминальной мощности	98
Хрусталева В.А., Ульянова М.В., Рязанов С.В., Писанец В.А. Анализ эффективности мероприятий по модернизации брызгальных бассейнов АЭС	107
Андриющенко А.И., Николаев Ю.Е., Ларин Е.А., Осипов В.Н. Совершенствование методики расчетов эффективности систем теплофикации городов.....	111
Кондыба Е.Н., Ларин Е.А., Пешков Л.И., Шелудько Л.П. Проблемы и пути модернизации ТЭЦ по парогазовому циклу	117
Хлебалин Ю.М. Техническое перевооружение ТЭЦ с противоаварийными турбинами... ..	128
Николаев Ю.Е., Сизов С.В. Оптимизация количества устанавливаемых газовых турбин на малых ТЭЦ.....	134
Долотовский И.В., Ларин Е.А. Теоретические положения системного анализа эффективности энергетического комплекса газоперерабатывающих предприятий.....	143
Семенов Б.А., Хомякова О.П. Методика сравнения потребительской эффективности теплоизоляционных материалов, используемых для теплозащиты трубопроводов	154
Леухин Ю.Л., Сабуров Э.Н., Усачев И.А. Особенности обтекания заготовки, смещенной с оси рабочего объема циклонного нагревательного устройства.....	168
Карпов С.В., Сабуров Э.Н., Быков А.В. Теплоотдача цилиндра в циклонной камере при близких к предельным условиям ввода и вывода газов.....	177

Усачев А.П., Шурайц А.Л., Феоктистов А.А., Каргин В.Ю., Фролов А.Ю., Рулев А.В., Усачева Т.А. Метод разработки новых теплоэнергетических установок с максимально возможными показателями на основе системного подхода	187
Шурайц А.Л., Усачев А.П., Фролов А.Ю., Рулев А.В., Усачева Т.А. Повышение экономической эффективности электрического промышленного регазификатора сжиженного углеводородного газа с твердотельным промежуточным теплоносителем	198
Симонов В.Ф., Агеев М.А. Оптимизация реактора каталитического восстановления оксидов азота для систем глубокой очистки дымовых газов котельных агрегатов	205
Жаркина Л.В. Информационное обеспечение контроллинга на Балаковской АЭС	209
Ларин Е.А., Ялов С.В. Математическое моделирование энергетических характеристик и системная эффективность ГТУ с энергетическим контуром на низкотемпературном рабочем теле	217
Андрющенко А.И., Ларин Е.А., Соколов А.А., Чикалкин А.В. Математическое моделирование энергетических характеристик теплофикационных ПГУ	223

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Архангельский Ю.С., Гришина Е.М. Энергетическая эффективность линий передачи и рупорных излучателей СВЧ электротермических установок с рабочими камерами лучевого типа	237
Пазухина Т.Г., Сивяков Б.К. Проектирование волноводных фазовращателей с р-и-п диодами и планарными петлями связи	246
Горбачев Д.М., Фурсаев М.А. Обеспечение устойчивости СВЧ-генератора на биполярном транзисторе, работающем в режиме с отсечкой тока	255
Гришина Е.М. Теория расчета многофункциональной электротехнологической установки	260

CONTENTS

Anatoly Ivanovich Andrjushenko (31 October 1914 – 4 January 2008)..... 7

FUNDAMENTAL PROBLEMS OF POWER ENGINEERING

Rezhikov A.F., Golembiovsky Yu.M. Adaptive systems of power supply is the basis of electric power industry of the future.....	9
Filippov S.P. Integrated approach to long-term energy demand forecasting for the country and its regions	13
Kaganovich B.M., Keiko A.V., Filippov S.P., Shamansky V.A. Modelling of non-equilibrium open systems by equilibrium thermodynamics methods	28
Andrjushchenko A.I., Nikolaev Yu.E. Efficiency of central heating in modern conditions and factors of its determination	39
Brodjansky V.M. Terminological base of the modern engineering thermodynamics	44
Etkin V.A. Thermodynamics on the boundary of centuries	51
Stepanov V.S. Research of thermodynamic efficiency of the processes with physical and chemical transformations	60
Stepanova T.V. Energy savings determination and energy consumption forecast on the base of technical systems thermodynamic analysis.....	66
Krysko A.V., Awrejcewicz J., Kuznetsova E.S. About effect of the temperature field on the composite vibrations of closed cylindrical shells at the external pressure	72
Artemenko S.E., Kadykova Yu.A. Bazalitoplastiki – an efficient material for heat-power engineering	85

HEAT-POWER ENGINEERING

Aminov R.Z. Dissertational council on heat-power engineering is 45	93
Khroustalev V.A., Shutikov A.V. Choice of parametric programs of regulating steam heaters and steam turbines of energy units 1000 MWt when working above nominal capacity	99
Khroustalev V.A., Uljanova M.V., Rjazanov S.V., Pisanets V.A. Arrangements efficiency analysis in modernization of sprinkling basin of NPP	107
Andrjushenko A.I., Nikolaev Yu.E., Larin E.A., Osipov V.N. Improvement of the calculation methods of cities heat supply systems efficiency.....	111
Kondiba E.N., Larin E.A., Peshkov L.I., Sheludko L.P. Problems and ways of modernization of HPP on steam & gas cycle	117
Khlebalin Yu.M. Technical re-equipment of thermoelectric plant with backpressure turbines	128
Nikolaev Yu.E., Sizov S.V. Number optimization of installed gas turbines for small heat stations.....	134
Dolotovskiy I.V., Larin E.A. Theoretical positions of the analysis of the gas-reprocessing enterprises energy complex efficacy	143
Semyonov B.A., Khomyakova O.P. Comparison technique of consumer efficiency heat isolation of materials used for heat-shielding of pipelines.....	154
Leukhin Yu.L., Saburov E.N., Usatchov I.A. Features of the stream flowing round preparation displaced from the axis working volume of the cyclonic heating device	168
Karpov S.V., Saburov E.N., Bykov A.V. Convective heat transfer from a cylinder in cyclone chamber under conditions of input and output of the flow, limiting and close to limiting.....	177

Usachyov A.P., Shurajts A.L., Feoktistov A.A., Kargin V.Yu., Frolov A.Yu., Rulev A.V., Usachyova T.A. New heat power installations development method with maximal-possible parameters on system approach basis	187
Shurajts A.L., Usachev A.P., Frolov A.Yu., Rulev A.V., Usacheva T.A. Economic efficiency increase of electric industrial evaporator of liquid hydrocarbonic gas solidstate intermediate heatcarrier	199
Simonov V.F., Agejev M.A. Catalytic recovery reactor optimization for systems of deeper cleaning of smoke gases from boiler plant	205
Zharkina L.V. Controlling informational system at Balakovo NPP	209
Larin E.A., Yalov S.V. Mathematical modelling of energy characteristics and system efficiency GTU with low temperature bouiling working energy plant	217
Andrjushenko A.I., Larin E.A., Sokolov A.A., Chikalkin A.V. Mathematical modelling of power characteristics of central heating SGU	223

POWER INDUSTRY AND ELECTRONICS

Archangelskiy Yu.S., Grishina E.M. Transmission facilities energy efficincy and horn radiators SHF electrothermal installation with beam type workers camera	237
Pazukhina T.G., Sivjakov B.K. Of waveguide phase shifters designing with p-i-n diodes and planar coupling loops	246
Gorbachev D.M., Fursaev M.A. Stability maintenance of the transistor generator micro-wave on the bipolar transistor working in a mode with current cutoff	255
Grishina E.M. Theory of elektrotechnologal installation multifunctional calculation	260

АНАТОЛИЙ ИВАНОВИЧ АНДРЮЩЕНКО**(31 октября 1914 – 4 января 2008)**

4 января 2008 года на 94-м году ушел из жизни доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки и техники РСФСР, член Международной академии наук высшей школы, член Международной энергетической академии **АНАТОЛИЙ ИВАНОВИЧ АНДРЮЩЕНКО**.

Родился А.И. Андриющенко 31 октября 1914 года в г. Жашков Киевской (ныне Черкасской) области. Уже в 13 лет началась его трудовая деятельность. Закончив фабрично-заводское училище в г. Одессе, он работал на заводах города. После окончания в 1938 году энергетического факультета Одесского индустриального института А.И. Андриющенко начал инженерную работу на ТЭЦ Горьковского автозавода. Здесь он прошел путь дежурного инженера, начальника службы КИПиА, заместителя начальника турбинного цеха. В период работы на ТЭЦ им подготовлена и опубликована первая научная статья (см. журнал «Советское котлотурбостроение», 1940 г.). Трудовая деятельность А.И. Андриющенко была прервана Великой Отечественной войной. С 1942 по 1945 годы Анатолий Иванович в действующей армии Донского, III и IV Украинских фронтов в должности командира минометной роты и начальника штаба отдельного стрелкового батальона. После окончания войны в течение двух лет Анатолий Иванович работал главным энергетиком заводов им. Марти и Красной гвардии в г. Одессе. В этом же городе с сентября 1947 года Анатолий Иванович начал свою научно-педагогическую деятельность в Одесском инженерно-строительном институте на кафедре теплотехники в должности преподавателя. В 1948 году Анатолий Иванович защитил кандидатскую диссертацию, а в 1955 году – докторскую диссертацию на тему «Вопросы термодинамической теории расчета теплофикационных установок» в Московском энергетическом институте, где он находился в докторантуре с 1953 по 1955 гг.

С 1955 года судьба А.И. Андриющенко связана с Саратовским политехническим институтом (ныне государственным техническим университетом), в котором он в течение 7 лет был проректором по научной работе, а затем в течение 26 лет – ректором. С именем А.И. Андриющенко связано становление политехнического института, его развитие и превращение из узкопрофильного автомобильного института в крупный учебно-научный центр Поволжья. Именно А.И. Андриющенко были заложены основы преобразования СПИ в технический университет. Исключительно большой вклад внес Анатолий Иванович в становление энергетического факультета. Здесь он организовал кафедру теплоэнергетики и более 30 лет возглавлял ее. Со дня организации в 1967 году Проблемной научно-исследовательской лаборатории теплоэнергетических установок электростанций и систем энергообеспечения до последних дней А.И. Андриющенко был ее научным руководителем. Здесь Анатолий Иванович осуществил ряд важнейших научных исследований в области технической термодинамики реальных циклов теплоэнергетических установок (ТЭУ) электростанций и теоретических проблем создания новых высокоэффективных теплоэнергетических установок. Анатолий Иванович является одним из признанных основателей экспериментального метода исследования ТЭУ, им разработаны научные основы образцовых циклов ТЭУ, обеспечивающие максимальную системную экономию топлива в реальных условиях их функционирования. По результатам этих исследований написан ряд оригинальных учебников и учебных пособий для студентов энергетических специальностей вузов, которые получили широкую известность и признание не только в России, странах СНГ, но и в ряде зарубежных стран. Книга



«Основы технической термодинамики реальных процессов» выдержала два издания (1967 и 1975 годы), а книга «Основы термодинамики циклов теплоэнергетических установок» – три издания (1968, 1977, 1985 гг.). Монография А.И. Андриющенко «Термодинамические расчеты оптимальных параметров тепловых электростанций» (М.: Высшая школа, 1963. 230 с.) переиздана в Польше. Под редакцией А.И. Андриющенко подготовлен первый в стране учебник «Надежность теплоэнергетического оборудования ТЭС и АЭС» для студентов энергетических специальностей.

Фундаментальные разработки теоретических основ оптимизации схем и параметров теплоэнергетических установок различных типов нашли отражение в ряде монографий, которые получили высокую оценку в научно-технических кругах. Высокой оценки заслуживает и научно-педагогическая деятельность Анатолия Ивановича. Под его руководством подготовлено 12 докторских и более 90 кандидатских диссертаций. Созданная в г. Саратове научная школа теплоэнергетиков пользуется заслуженным авторитетом среди ученых-энергетиков в стране и за рубежом. А.И. Андриющенко является Лауреатом премии Международной академии наук высшей школы за 2000 год. Одной из особенностей научной школы, созданной А.И. Андриющенко, является неразрывное сочетание учебно-педагогической, научно-исследовательской и производственной деятельности, позволяющее готовить инженерные кафедры для энергетических предприятий и кадры высшей научной квалификации. Именно такой подход позволил обеспечить теплоэнергетические кафедры университета научными кадрами собственной подготовки. Сегодня ученики Анатолия Ивановича возглавляют научные учреждения РАН, теплоэнергетические кафедры многих вузов страны, являясь руководителями энергетических предприятий и проектно-исследовательских организаций.

Исключительно многогранна и полезна общественная и научно-организационная деятельность А.И. Андриющенко. Более 30 лет он был членом экспертного совета и Президиума ВАК. До 2004 года Анатолий Иванович был председателем диссертационного совета по защите кандидатских и докторских диссертаций по специальностям 05.14.01 – Энергетические системы и комплексы и 05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика. В течение трех десятков лет он был членом редакционной коллегии журналов «Известия вузов и энергетических объединений СНГ. Энергетика» и «Известия вузов. Проблемы энергетики». В течение многих лет Анатолий Иванович возглавлял Поволжский региональный научный совет АН СССР и Минвуза РСФСР, где, по сути, были заложены основы организации Саратовского научного центра РАН.

Научные заслуги А.И. Андриющенко, его многолетняя плодотворная общественная, организационная, научно-педагогическая деятельность оценены правительством страны. К боевым наградам, полученным за участие в Великой Отечественной войне (ордена Отечественной войны I и II степени, медаль «За боевые заслуги» и др.) прибавились награды за мирный труд: ордена Ленина, Октябрьской революции, два ордена Трудового Красного Знамени. В 1966 году А.И. Андриющенко награжден Почетным знаком Всемирного комитета защиты мира, в 1996 году ему присвоено звание «Почетный гражданин г. Саратова». В 2000 году он награжден Почетным знаком губернатора Саратовской области. В 2001 году Министерством образования РФ он награжден знаком «Почетный работник высшего профессионального образования РФ».

До последних дней своей жизни Анатолий Иванович продолжал активную работу в Проблемной лаборатории ТЭУ и СЭ. Свидетельством этому является подготовка и редакционная работа над научными статьями настоящего выпуска журнала, который посвящен светлой памяти **Анатолия Ивановича Андриющенко.**

Е.А. Ларин
Заведующий Проблемной научно-исследовательской лабораторией
теплоэнергетических установок электростанций
и систем энергообеспечения

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

УКД 621.314.58

А.Ф. Резчиков, Ю.М. Голембиовский

АДАПТИВНЫЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ – ОСНОВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ БУДУЩЕГО

Обосновывается перспективность построения адаптивных систем электроснабжения для питания массовых и индивидуальных потребителей. Рассмотрены принципы построения таких систем и варианты их структурной организации.

A.F. Rezchikov, Yu.M. Golembiovsky

ADAPTIVE SYSTEMS OF POWER SUPPLY IS THE BASIS OF ELECTRIC POWER INDUSTRY OF THE FUTURE

Perspectives of creation of adaptive systems of power supply for mass and individual consumers are described in this article. Principles of creation of such systems and variants of their structural organization are considered here as well.

Ограниченность энергетических ресурсов и возрастание стоимости электроэнергии делают ее экономию все более насущной задачей.

Эта задача решается путем использования энергосберегающих технологий, а также создания таких систем электроснабжения, которые обеспечивают сокращение затрат энергии и других ресурсов на производство единицы продукции [1]. Рассмотрим с этой точки зрения принципиальные возможности и перспективные направления построения высокоэкономичных систем электропитания.

В настоящее время до 60% вырабатываемой электроэнергии потребляется в преобразованном виде. Анализ структуры энергопотребления показывает, что существующая тенденция увеличения доли энергии, используемой в преобразованном виде, не только сохранится, но даже усилится в течение ближайших десятилетий. Это обусловлено не только технологическим прогрессом, но и тем фактом, что стандартная в России, странах ближнего и дальнего зарубежья общепромышленная частота 50 Гц не является оптимальной по затратам стали и цветных металлов на производство электрооборудования. Еще в 30-х годах прошедшего столетия в научной среде велись интенсивные дискуссии на эту тему, и было признано, что оптимальной для России была бы частота 100 Гц. Однако технический уровень промышленности того времени и экономические возможности страны не позволили реализовать пе-

реход на новую частоту энергосистем. В послевоенные годы стало очевидным, что более рациональным путем является широкое внедрение преобразовательных устройств для питания массовых и индивидуальных потребителей. Появление полупроводниковых приборов резко интенсифицировало научные исследования и освоение промышленного производства вентиляльных преобразователей (ВП) различного назначения. Увеличение доли преобразованной энергии в структуре энергопотребления делает ВП одним из основных инструментов экономии энергоресурсов. Перевод ряда промышленных производств и индивидуальных потребителей на повышенные частоты стимулирует создание мощных и надежных систем электроснабжения на базе ВП. Такие системы находят широкое применение при питании внутришлифовальных станков подшипниковых предприятий, модульных электротермических установок конвейерного типа, в химической промышленности для привода технологического оборудования производства синтетических волокон и многих других областях хозяйственной деятельности. Системы централизованного электроснабжения (СЦЭ) по своим технико-экономическим и эксплуатационным показателям являются более выгодными по сравнению с источниками индивидуального электропитания отдельных потребителей. Целесообразность использования СЦЭ возрастает по мере увеличения суммарной потребляемой мощности. Кроме того, системы централизованного электроснабжения можно строить по модульному принципу, что существенно повышает их надежность и гибкость.

Любой технологический агрегат с номинальной мощностью P_n имеет статистическую среднесуточную загрузку $P_c < P_n$ [2]. Отношение $K_u = P_c / P_n$ для разных отраслей промышленности, разных технологий и агрегатов различно. По данным [2], значение K_u колеблется в широких пределах от 0,1-0,2 (например, для металлорежущих станков) до 0,85 (компрессоры химических производств). При такой среднесуточной загрузке снижаются КПД, а для многих потребителей и $\cos \varphi$ источника электропитания технологического агрегата. Для поддержания указанных характеристик на высоком уровне необходимо использовать наивыгоднейшие режимы работы технологического агрегата, обеспечивающие при заданном качестве продукта и производительности минимальные энергетические и иные затраты.

Для задания таких режимов требуется изменение частоты f и напряжения U источника питания агрегатов. Мы приходим, таким образом, к выводу о необходимости повышения управляемости источника питания агрегата с целью минимизации затрат на производство единицы продукции. В соответствии с [3, 4] управляемой называется система, для которой существует управление $U(t_0, t_1)$, переводящее ее из состояния χ_0 в состояние χ_1 за время $(t_1 - t_0)$. Такое определение подчеркивает, что возможность движения объекта по оптимальной с точки зрения энергетических и иных затрат траектории тем выше, чем большими степенями свободы он обладает, то есть чем выше его управляемость.

Электроснабжение технологического агрегата на общепромышленной частоте 50 Гц практически не обладает управляемостью. Здесь отсутствует возможность вариации параметров P_n , f и U и единственный путь экономии электроэнергии – использование энергосберегающих технологий и оптимизация электротехнологических схем потребителей (электродвигателей, печей и т.д.). Иная картина складывается при электроснабжении на повышенных частотах. В качестве источников вторичного питания здесь используются электромашинные и вентиляльные (полупроводниковые) преобразователи частоты. Строго говоря, управляемостью в указанном смысле обладают лишь полупроводниковые преобразователи. В них принципиально заложены возможность изменения в широких пределах энергетических характеристик f , U , P_n , регулирование по требуемому технологическим процессом закону, рекуперация энергии. Будучи электронным устройством, ВП допускает автоматическое управление своими характеристиками.

Задача минимизации потерь электроэнергии при питании отдельного технологического агрегата требует построения сложных систем управления вентиляльными преобразователями, способных учитывать множество параметров при выработке управляющих воздействий.

Такая задача не могла быть решена с использованием традиционных аналоговых средств управления, поскольку для нетривиальных применений требуется выполнение достаточно сложных расчетов в темпе технологического процесса. Принципиально возможность решения указанной задачи появилась с освоением выпуска сравнительно недорогих микропроцессорных вычислительных средств. Микропроцессорные комплекты БИС позволяют создавать встраиваемые микроконтроллеры ВП, способные решать сложные логические и оптимизационные задачи. Важным достоинством микропроцессорных систем управления является их легкая адаптируемость к изменению функций рабочего органа и критериев управления. Это достигается перестройкой лишь программного обеспечения управления без изменения технических средств.

Следующим шагом построения высокоэкономичных систем электроснабжения на повышенных частотах является создание оперативно перестраиваемых преобразовательных сетей (ОППС) для централизованного питания массовых потребителей (цехов и предприятий в целом) и индивидуальных мощных потребителей. Такие сети должны состоять из ряда параллельно работающих модулей вентильных преобразователей. Высокая управляемость ОППС достигается следующими мероприятиями:

1) подбором номинальных мощностей преобразователей, образующих ОППС согласно ряду Фибоначчи;

2) приданием каждому модулю свойства многофункциональности, что дает возможность использования его в разных режимах работы (например, в режимах инвертирования и компенсации);

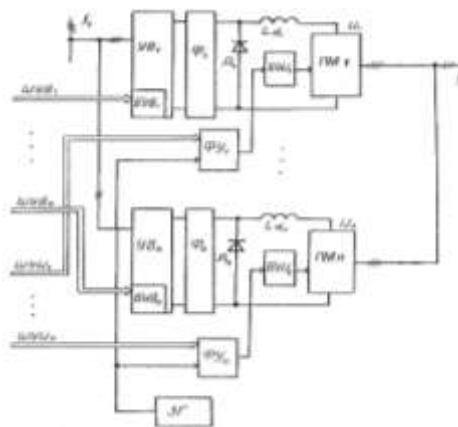
3) созданием системы управления на основе управляющего вычислительного комплекса (УВК) [5];

4) разработкой специального математического обеспечения задач управления оперативно перестраиваемой преобразовательной сетью по критерию минимума потерь.

Совокупность перечисленных мероприятий позволяет построить принципиально новую систему электроснабжения на частоте, отличающейся от общепромышленной 50 Гц, адаптивную к изменяющейся нагрузке. Структура такой системы оперативно перестраивается в зависимости от величины и характера нагрузки. При этом УВК оптимизирует на каждом шаге управления по критериям минимума потерь, максимальной надежности и качества электроэнергии состав преобразователей, обеспечивающих нагрузку активной мощностью, состав преобразователей, осуществляющих компенсацию реактивной мощности, реализует перевод преобразователей из одного режима в другой и вывод в резерв или из резерва. Тем самым обеспечивается поддержание КПД системы электроснабжения на максимально возможном уровне.

ОППС могут быть построены как на базе инверторов тока, так и на основе инверторов напряжения. Выбор того или иного класса инверторов для использования в универсальных преобразовательных модулях зависит от диапазона выходных частот и уровня мощности системы вторичного электроснабжения и, в конечном счете, определяется технико-экономическими расчетами.

На рисунке представлена обобщенная структура ОППС [6]. Синхронизация параллельно работающих модулей ($ПМ_1 - ПМ_n$) достигается тем, что все фазосдвигающие устройства (ФУ) подключены к одному задающему генера-



Структура ОППС

тору (ЗГ). Управляющие воздействия на блоки управления ($БУВ_1 - БУВ_n$) выпрямителями ($УВ_1 - УВ_n$) и на фазосдвигающие устройства ($ФУ_1 - ФУ_n$) подаются по шинам управления выпрямителями ($ШУВ_1 - ШУВ_n$) и инверторами ($ШУИ_1 - ШУИ_n$).

Широкое внедрение полупроводниковых преобразовательных систем позволит решить проблему перевода промышленности на повышенные частоты. Структура системы электроснабжения будущего может быть построена с применением разной степени централизации источников вторичного питания. При нижней степени централизации на цеховой преобразовательной подстанции устанавливается группа ОППС, преобразующих напряжение частоты 50 Гц в необходимые для данного цеха напряжения и частоты. Высший уровень централизации реализуется путем размещения преобразовательной подстанции в центре нагрузок предприятия по повышенной частоте. Совокупность ОППС осуществляет преобразование напряжения частоты 50 Гц в повышенные частоты с напряжением 6-10 кВ с последующей передачей энергии на цеховые подстанции, где осуществляется трансформация в напряжения, необходимые для питания потребителей.

Выбор той или иной степени централизации определяется технико-экономическими расчетами.

Наряду с источниками централизованного питания могут создаваться индивидуальные адаптивные системы электроснабжения на основе ВП (частотные приводы, индукционные агрегаты и другие), питающиеся от общепромышленной сети частоты 50 Гц.

С учетом всей совокупности источников вторичного питания повышенной частоты представляется целесообразным строить систему управления электроснабжением предприятия (АСУЭ) по иерархическому принципу. Высший уровень осуществляет связь с энергосистемами, с точки зрения минимума ущерба, управление конфигурацией сети в нормальных режимах электропотребления, в условиях ограничения мощности со стороны энергосистемы и в аварийных ситуациях. Средней уровень обеспечивает управление ОППС на подстанциях, нижний уровень реализует адаптивное управление индивидуальными электроприемниками. Вычислительные средства всех уровней информационно и программно должны взаимодействовать между собой, образуя единый комплекс.

Выводы

1. Сформулированы принципы построения адаптивных систем централизованного электроснабжения на основе широкого использования полупроводниковых преобразовательных систем.

2. Предложены структуры систем централизованного электроснабжения на повышенных частотах с разной степенью централизации.

3. Отмечена необходимость построения иерархической трехуровневой системы управления всей совокупностью источников вторичного питания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Артемьев А.А. Повышенная частота – прогрессивное направление в электроэнергетике / А.А. Артемьев, А.И. Артемьев // Известия вузов. Энергетика. 1979. № 10. С. 122-125.
2. Справочник по электроснабжению промышленных предприятий / Под ред. А.А. Федорова и Г.В. Сербиновского. М.: Энергия, 1974. Кн. 2. С. 11-37.
3. Поспелов Г.Ф. Программно-целевое планирование и управление / Г.Ф. Поспелов, В.А. Ириков. М.: Советское радио, 1976. С. 52-56.
4. Фомин В.Н. Адаптивное управление динамическими объектами / В.Н. Фомин, А.Л. Фрадков, В.А. Якубович. М.: Наука, 1981. 447 с.
5. Кантер И.И. Система управления вентильным энергетическим комплексом повышенной частоты / И.И. Кантер, Ю.М. Голембиовский, Ю.Б. Томашевский // Вопросы преобразовательной техники и частотного электропривода: межвуз. науч. сб. Саратов: Сарат. политехн. ин-т, 1981. С. 28-43.

6. Кантер И.И. Система централизованного электроснабжения на базе параллельно работающих преобразователей частоты / И.И. Кантер, Ю.Б. Томашевский, Ю.М. Голембиовский // Электричество. 1991. № 1. С. 39-47.

Резчиков Александр Федорович –

член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Системотехника»
Саратовского государственного технического университета

Голембиовский Юрий Мичиславович –

доктор технических наук, профессор кафедры «Системотехника»
Саратовского государственного технического университета

Статья поступила в редакцию 11.06.07, принята к опубликованию 05.12.07

УДК 662.7:621.3

С.П. Филиппов

ИНТЕГРИРОВАННЫЙ ПОДХОД К ПРОГНОЗИРОВАНИЮ ПОТРЕБНОСТЕЙ СТРАНЫ И РЕГИОНОВ В ЭНЕРГОНОСИТЕЛЯХ НА ДОЛГОСРОЧНУЮ ПЕРСПЕКТИВУ

Предложен интегрированный подход к разработке взаимосогласованных прогнозов спроса на энергоносители для страны и регионов. Прогнозы энергопотребления формируются в процессе разработки системы региональных и федеральных топливно-энергетических балансов.

S.P. Filippov

INTEGRATED APPROACH TO LONG-TERM ENERGY DEMAND FORECASTING FOR THE COUNTRY AND ITS REGIONS

Integrated approach to long-term forecasting of concerted energy demand for the country and its regions is developed here. The forecasts are as results of formation of a set of regional and total energy balances.

Введение

Прогнозные оценки спроса на энергоносители необходимы для решения многих задач, связанных с развитием энергетики страны и регионов, которые становятся все более актуальными. Однако получение их сопряжено с большими трудностями, что обусловлено:

- формированием спроса на энергоносители в новых условиях хозяйствования под воздействием хаотичных рыночных сил;
- большой неопределенностью будущих условий социально-экономического развития страны и ее внешнеэкономических связей, включая внешние связи топливно-энергетического комплекса (ТЭК);

- расширением возможностей взаимозамещения энергоносителей с развитием энергетических технологий.

Дополнительные сложности возникают при необходимости дезагрегирования прогнозов по территории страны. Связано это, прежде всего, с:

- неоднородностью сложившейся структуры экономики регионов;
- неравномерностью ожидаемого развития отраслей экономики страны и регионов.

Огромную проблему для прогнозирования спроса на энергоносители создает отсутствие обоснованных прогнозов социально-экономического развития страны на долгосрочную перспективу (до 2020-2030 гг.). В то же время, исходя из особенностей энергетики и ее исключительно важной роли в развитии страны и обеспечении ее безопасности, необходимо готовить и принимать принципиальные решения в сфере ТЭК заблаговременно. Это вызвано большой длительностью инвестиционных циклов в энергетике, высокой стоимостью инвестиционных проектов, многообразием альтернативных вариантов развития отраслей ТЭК, исключительной тяжестью последствий от реализации неверно выбранных решений. В таких условиях выработка суждений о возможных в будущем вариантах социально-экономического развития страны и регионов неизбежно становится неотъемлемой частью процесса прогнозирования спроса на энергоносители на долгосрочную перспективу.

Известно достаточно много методов прогнозирования энергопотребления. Наиболее активно в стране и за рубежом используются нормативные методы (прямой расчет энергопотребления на основе норм расхода энергоносителя на единицу продукции), эконометрические методы в различных модификациях, прогнозирование энергопотребления на основе межотраслевого (или межпродуктового) баланса, методы экспертных оценок, методы аналогий, эмпирические методы (анкетирование потребителей топлива и энергии, собеседование с ними) и др.

Для учета территориального фактора при прогнозировании энергопотребления традиционно используются два альтернативных подхода:

- 1) *«сверху-вниз»* – прогнозирование спроса на энергоносители на основе макроэкономических прогнозов (для страны в целом с последующим их дезагрегированием для регионов);

- 2) *«снизу-вверх»* – прогнозирование спроса на энергоносители по регионам страны на основе региональной информации (социально-экономической, технологической и др.) с последующим суммированием результатов региональных прогнозов с получением прогноза энергопотребления для страны в целом.

Важнейшим достоинством первого подхода является учет макроэкономических ограничений на формирование потребностей страны в топливе и энергии. Учет данных факторов при прогнозировании «снизу-вверх» практически невозможен. В связи с этим очевидно, что планируемые в регионах темпы социально-экономического развития и соответствующие им темпы изменения энергопотребления могут оказаться не реализуемыми из-за наличия макроэкономических ограничений. Такие ограничения могут стать настолько сильными, что будут в решающей степени определять спрос на энергоносители в регионах и, следовательно, в стране в целом.

В то же время известно, что при применении первого подхода («сверху-вниз») не удается в должной мере учесть региональные особенности и ограничения. В результате, при корректном прогнозе этим методом спроса на энергоносители по стране в целом прогнозы энергопотребления по конкретным субъектам Российской Федерации могут оказаться не достаточно обоснованными. Второй подход («снизу-вверх») свободен от этих недостатков благодаря возможности дезагрегирования территории региона и потребителей. Однако реализация второго подхода сопряжена с огромными трудозатратами и потребностями в больших объемах исходной информации, значительную часть которой очень трудно получить или которая может просто отсутствовать.

Фактор времени также оказывает существенное влияние на предпочтительность применения обсуждаемых подходов. Обычно в задачах развития энергетики выделяют:

- 1) краткосрочную перспективу (с горизонтом прогнозирования до 5 лет);
- 2) среднесрочную перспективу (с горизонтом прогнозирования до 10 лет);
- 3) долгосрочную перспективу (прогнозирование на период свыше 10-15 лет).

Область применения подхода «снизу-вверх» ограничена краткосрочной и, в пределе, среднесрочной перспективой. Подход «сверху-вниз» применим во всем диапазоне прогнозного периода. Для прогнозирования энергопотребления на долгосрочную перспективу он оказывается практически безальтернативным.

Из анализа достоинств и недостатков рассмотренных выше методов прогнозирования энергопотребления и опыта их применения следует необходимость разработки нового подхода, более адекватно отражающего особенности формирования спроса на энергоносители в России и ее регионах на современном этапе развития отечественной экономики.

1. Методология прогнозирования

Базовые принципы

В Институте энергетических исследований (ИНЭИ) РАН предложен интегрированный подход к разработке взаимосогласованных прогнозов спроса на энергоносители для уровней страны и регионов. Он базируется на следующих принципах:

- 1) прогнозирование энергопотребления на основе макроэкономических показателей с разделением производственных и энергетических переменных и учетом рыночных механизмов формирования спроса на энергоносители;
- 2) сценарный подход к учету неопределенностей;
- 3) учет территориального и временного факторов;
- 4) учет балансовых ограничений;
- 5) учет функциональных особенностей потребления топлива и энергии;
- 6) учет свойства эмерджентности (целостности) при прогнозировании энергопотребления по регионам;
- 7) активное вовлечение в процесс прогнозирования энергопотребления федеральных и региональных органов власти, ведущих энергопроизводящих компаний страны и крупнейших потребителей топливно-энергетических ресурсов (ТЭР).

Первый принцип требует увязки прогнозов энергопотребления с прогнозами социально-экономического развития страны и регионов. Прогнозы энергопотребления разрабатываются строго на экономическом базисе. Разделение производственных и энергетических переменных существенно повышает корректность прогнозов, поскольку позволяет учесть различия (часто весьма серьезные) в тенденциях изменения этих переменных в прогнозный период. Производственные переменные (выпуски продукции и т.п.) описывают масштабы развития секторов экономики, а энергетические (энергоёмкости) – интенсивности потребления ими энергоносителей. Энергоёмкости связываются с экономическими параметрами.

Второй принцип является традиционным для системного подхода. Его важность объясняется просто: от качества разработки сценарных условий в определяющей степени зависит качество прогноза. Более того, вся работа по формированию прогнозов может оказаться напрасной в случае неверно сформулированных исходных условий.

Требование корректного учета территориального фактора (третий принцип) обеспечивается комбинированием методов прогнозирования «сверху-вниз» (региональные прогнозы разрабатываются на базе федеральных) и «снизу-вверх» (федеральные прогнозы формируются на основе региональных) с последующей итеративной увязкой полученных результатов. Необходимость учета фактора времени обусловлена существенными различиями объемов и качества доступной информации при рассмотрении различных временных горизонтов.

Учет данного фактора требует применения разных методов для прогнозирования энергопотребления на различную перспективу. С увеличением горизонта прогнозирования используются более агрегированные показатели, объем исходной информации уменьшается. Прогноз на каждый последующий период должен опираться на результаты прогнозирования для предыдущего периода.

Важность учета балансовых ограничений (четвертый принцип) объясняется следующими обстоятельствами:

- взаимозаменяемостью энергоносителей у широкого круга потребителей (что определяет существование межтопливной конкуренции);
- наличием ограничений на объемы производства ТЭР по стране и регионам;
- наличием ограничений на межрегиональные потоки ТЭР.

Учет этих ограничений достигается путем разработки системы топливно-энергетических балансов (ТЭБ) страны и регионов. Окончательно прогнозы энергопотребления формируются в результате балансирования спроса на ТЭР и потребления ТЭР по каждому субъекту РФ и стране в целом. Следует отметить самостоятельную ценность прогнозных ТЭБ для управления развитием отраслей ТЭК, а также для управления энергопотреблением в стране и регионах.

Выдвижение пятого принципа вызвано существенными различиями тенденций в спросе на энергоносители по разным направлениям их потребления. Для реализации данного принципа необходима дезагрегация потребителей по а) видам экономической деятельности (ВЭД) и б) направлениям использования ТЭР (для производства электрической и тепловой энергии, производственных нужд, в качестве сырья и т.д.). Из-за различия экономической природы формирования спроса на ТЭР по направлениям их использования потребуются применение различных методов прогнозирования (аналитических, статистических), а также эвристических процедур.

Необходимость учета свойства целостности при исследовании иерархически построенных систем является одним из основополагающих требований системного подхода. В задачах прогнозирования энергопотребления при рассмотрении системы «страна – отрасли экономики – регионы» необходимость применения шестого принципа объясняется тем, что отрасли экономики и регионы развиваются по своим собственным законам, но это развитие нельзя считать независимым от социально-экономического развития страны в целом. Общеэкономическая ситуация в стране оказывает самое непосредственное влияние на развитие отраслей экономики и регионов. При выполнении согласительных процедур и балансовых ограничений приоритет отдается требованиям вышестоящего уровня. Заметим, что здесь и далее отрасли экономики трактуются в понятиях ВЭД.

Седьмой принцип отражает существующую реальность: никто лучше региональных органов власти не знает ситуацию с развитием экономики и социальной сферы регионов. Вовлечение их в процесс прогнозирования энергопотребления способно существенно повысить обоснованность региональных прогнозов и, что важно, ускорить их разработку. Подключение федеральных органов власти к формированию прогнозов спроса на энергоносители и прогнозных ТЭБ страны и регионов обеспечит наряду с повышением качества прогнозов существенную экономию средств и времени на их разработку за счет использования существующих организационных структур. Кроме того, без их участия сложно организовать процедуру согласования прогнозов, подготовленных на федеральном и региональном уровнях. Ведущие энергопроизводящие компании страны заинтересованы в независимой оценке емкости будущих рынков сбыта их продукции, в том числе и в территориальном разрезе. Крупнейшим потребителям ТЭР важно представлять будущую ситуацию на рынке ТЭР по территории страны. Следует отметить, что органы государственной власти всех уровней, производители и потребители ТЭР заинтересованы в получении качественных прогнозных результатов в данной сфере.

Интегрированный подход

Суть интегрированного подхода к разработке взаимосогласованных прогнозов спроса на энергоносители страны и регионов представлена на рис. 1. Выделены два уровня: федеральный (верхний) и региональный (нижний).

На верхнем иерархическом уровне методом «сверху-вниз» разрабатываются взаимосвязанные прогнозы энергопотребления страны и регионов и на их основе федеральные и региональные ТЭБ. На нижнем уровне силами субъектов Федерации формируются независимые прогнозы энергопотребления для каждого региона, а их суммирование дает прогнозные оценки спроса на энергоносители для страны в целом (метод «снизу-вверх»). Затем производится согласование прогнозов, полученных разными способами.

Задачи верхнего уровня. На федеральном уровне решаются следующие задачи:

1. На основе прогнозов государственных органов власти (федеральных министерств и ведомств) разрабатываются взаимосогласованные сценарии социально-экономического развития страны и регионов (в разрезе федеральных округов и субъектов Российской Федерации), увязанные со сценариями развития отраслей экономики в стране и регионах.

2. На основе подготовленных сценариев разрабатываются:

- прогнозы спроса на энергоносители, согласованные в системе «страна – сектора экономики – регионы (субъекты Федерации)»;
- прогнозы предложения ТЭР, вытекающие из прогнозов развития отраслей ТЭК (согласованные в системе «страна – регионы»).

3. На основе прогнозов спроса и предложения ТЭР формируется взаимосвязанная система прогнозных ТЭБ федерального и регионального уровней и получают окончательные оценки будущих потребностей страны и регионов в ТЭР.

Подготовленные прогнозы отражают видение «сверху» динамики социально-экономического развития регионов, спроса регионов на энергоносители, развития ТЭК регионов и межрегиональных перетоков топлива и энергии (возможностей поставки в регионы топлива из месторождений федерального значения).

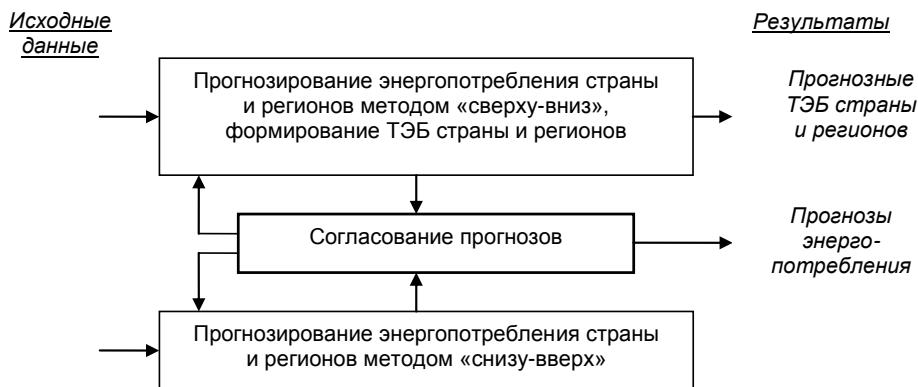


Рис. 1. К описанию интегрированного подхода к прогнозированию энергопотребления страны и регионов

Принципиально важно подчеркнуть, что корректные прогнозные ТЭБ субъектов Федерации (тем более ТЭБ страны в целом) могут быть разработаны только на федеральном уровне. Это связано с тем, что только здесь могут быть корректно сформированы приходные части региональных ТЭБ (на основе прогнозов предложения ТЭР с учетом ограничений на их межрегиональные перетоки). При разработке прогнозных ТЭБ на уровне субъекта РФ неизбежно потребуются прогнозные данные о возможных объемах поставок ТЭР в регион и

необходимых объемах вывоза ТЭР из региона. Соответствующая информация может быть получена опять же только в процессе формирования системы ТЭБ на федеральном уровне.

Ключевые аспекты прогнозирования энергопотребления методом «сверху-вниз» и подготовки ТЭБ страны и регионов рассматриваются ниже в разделе 3.

Задачи нижнего уровня. Результаты, полученные на верхнем уровне, передаются в субъекты Федерации и федеральные округа. Там они могут корректироваться или служить основой (ориентиром) для разработки собственных сценариев социально-экономического развития региона и соответствующих им прогнозов спроса в регионе на энергоносители и региональных ТЭБ.

Подготовленные в субъектах Федерации прогнозы передаются на федеральный уровень. К ним прикладываются обосновывающие материалы, в частности, данные о крупных инвестиционных проектах, предполагаемых к реализации на территории региона.

Согласование прогнозов. Полученные из субъектов Федерации прогнозы уточняются («сбиваются») с прогнозами для страны в целом), согласовываются с субъектами Федерации и профильными федеральными министерствами. Процедура согласования прогнозов неизбежно оказывается итеративной. В результате ее реализации формируются:

- взаимоувязанные сценарии социально-экономического развития страны и регионов;
- соответствующие этим сценариям прогнозы спроса страны, отраслей экономики и регионов на энергоносители;
- система взаимосогласованных федеральных и региональных ТЭБ.

Особенности задач прогнозирования энергопотребления

Задачи разработки долгосрочных прогнозов энергопотребления и прогнозных ТЭБ страны и регионов объективно являются достаточно сложными, что обусловлено:

- сложностью объекта прогнозирования: народное хозяйство страны, и ТЭК в частности, характеризуется сложной структурой и сложным поведением (сложностью законов его функционирования и развития);
- большой неопределенностью внешних условий развития (как в части потребления ТЭР, так и их производства) при рассмотрении долгосрочной перспективы. Задачи многократно усложняются в случае дезагрегирования спроса на энергоносители по территории страны и последующей разработки федеральных и региональных ТЭБ. Это связано:
- с прямым увеличением объема работ, пропорционального числу регионов;
- необходимостью согласования результатов (прогнозов энергопотребления и прогнозных балансов ТЭР) разного иерархического уровня;
- необходимостью учета региональных особенностей.

Последнее обстоятельство оказывается чрезвычайно важным, поскольку регионы характеризуются существенными различиями:

- структуры потребления энергоносителей (из-за различий в структуре секторов экономики);
- энергоемкостей секторов экономики регионов (из-за различий в структуре их подотраслей и их технического состояния);
- темпов социально-экономического развития, в том числе темпов развития отдельных отраслей экономики (что объективно отражает территориальную и отраслевую неравномерность развития страны).

Связь с экономикой

Следует отметить, что прогнозирование энергопотребления на среднесрочную, а тем более долгосрочную перспективу корректным образом может осуществляться только на основе ограниченного числа укрупненных социально-экономических показателей. К таким по-

казателям предъявляются определенные требования. Они должны быть измеряемыми, устойчивыми, прогнозируемыми, обобщенными.

Исходя из этих критериев, для целей среднесрочного прогнозирования энергопотребления подходят следующие основные экономические показатели:

- для страны и регионов – соответственно валовой внутренний продукт (ВВП) и валовые региональные продукты (ВРП);
- для отраслей экономики – валовые выпуски продукции в стоимостном выражении (в сопоставимых ценах); для домашних хозяйств – обеспеченность населения жилой площадью, душевые доходы населения и др.

Выбор при среднесрочном прогнозировании для отраслей экономики в качестве количественного измерителя их производственных характеристик выпуска продукции в стоимостном, а не натуральном выражении обусловлен следующими причинами:

- огромным ассортиментом продуктов, в том числе энергоемких;
- широкими возможностями замещения продуктов в отдаленной перспективе;
- большим влиянием экспорта/импорта на объемы производства отечественной промышленности (объемы экспорта/импорта зависят от конъюнктуры мирового рынка).

По этим причинам прогнозирование выпуска огромного числа конкретных продуктов отечественной промышленностью на среднесрочную перспективу в общем случае не представляется целесообразным и даже возможным.

При прогнозировании спроса на энергоносители на долгосрочную перспективу, как показывает опыт, достаточно ограничиться наиболее обобщенными экономическими показателями: ВВП страны и ВРП субъектов Федерации. Это обусловлено слишком большой неопределенностью развития отраслей экономики страны и тем более регионов на столь длительную перспективу.

2. Разработка прогнозных ТЭБ страны и регионов

Общая схема разработки прогнозов энергопотребления и прогнозных ТЭБ страны и регионов, реализованная в настоящее время в ИНЭИ РАН, представлена на рис. 2. Особенности решаемых задач приводят к тому, что схема прогнозирования неизбежно оказывается многоуровневой, а процедура формирования прогнозов – «многоитерационной», что отражено на схеме в виде многочисленных обратных связей между блоками различных иерархических уровней. Ниже кратко рассмотрим назначение и функциональные особенности основных блоков, представленных на рис. 2.

Блок I. Блок формирования сценариев развития ТЭК страны и его внешних связей (экспорт/импорт ТЭР) является исходным в рассматриваемой схеме. На данном этапе разрабатываются для страны в целом предварительные прогнозы: а) спроса на ТЭР; б) предложения ТЭР; в) экспорта/импорта ТЭР и г) цен на основные виды ТЭР.

Прогнозы разрабатываются с использованием формальных и эвристических процедур. Исходная информация во многом является экзогенной. Однако значительная ее часть генерируется на нижележащих уровнях и передается вверх в процессе реализации итерационных процедур.

Блок II («макроэкономический»). Здесь производится согласование сценариев развития экономики и энергетики страны. При этом рассматривается на макроуровне соответствие между прогнозируемыми показателями спроса на энергоресурсы и развития отраслей ТЭК (результаты из блока I) со сценариями социально-экономического развития страны. Последние формируются на основе различных документов, подготовленных и одобренных правительством страны, профильными министерствами и ведомствами.

Расчеты осуществляются с помощью разработанной в ИНЭИ РАН и хорошо известной специалистам нелинейной оптимизационной экономико-математической модели МЭНЭК («Модель энергетики в экономике»). Модель предназначена для комплексного ко-

личественного исследования влияния ценовой, налоговой, инвестиционной, таможенной и социальной политики государства на развитие экономики России, включая отрасли ТЭК и другие экономические субъекты страны.

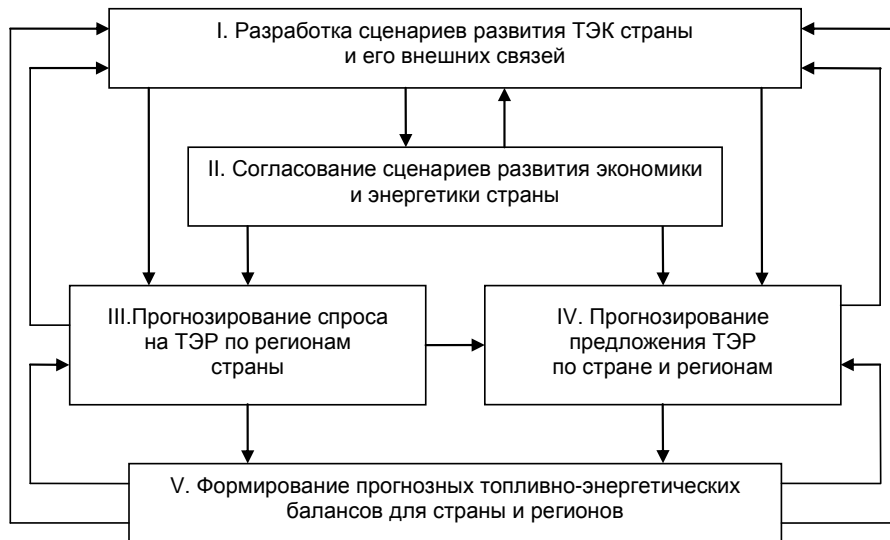


Рис. 2. Общая схема разработки прогнозных ТЭБ для страны и регионов

В итоге на данном этапе формируются количественные оценки рассматриваемых сценариев социально-экономического развития страны (ВВП, объемы выпуска продукции отраслями экономики страны, объемы инвестиций в основной капитал этих отраслей, доходы населения, цены на основные виды ТЭР и др.).

Блок III («потребительский»). Прогнозирование спроса на основные виды ТЭР является одним из ключевых элементов в представленной схеме.

Прогноз выполняется на основе разработанного в ИНЭИ РАН функционально-статистического подхода к прогнозированию энергопотребления. Он базируется на выделении направлений использования энергоносителей и дезагрегировании потребителей по видам экономической деятельности и заключается в получении прогнозных значений обобщенных производственных (выпуск продукции в сопоставимых ценах) и энергетических (энергоёмкостей) характеристик по отраслям экономики (видам экономической деятельности). При этом прогноз энергоёмкостей осуществляется на базе статистических оценок их связей с макроэкономическими факторами (инвестициями, ценами на энергоносители и др.) или аналитическими методами.

Блок IV («производственный»). В данном блоке производится формирование «приходной части» ТЭБ страны и регионов. Прогнозы предложения ТЭР по стране и регионам подготавливаются путем проведения расчетов с использованием разработанного в ИНЭИ РАН комплекса производственно-финансовых моделей отраслей ТЭК.

Количественные оценки объемов предложения ТЭР выступают в качестве естественных ограничений на объемы и структуру спроса на энергоносители. Соответствующие «сигналы» поступают в блок III через балансовый блок (блок V).

Именно в производственном блоке определяются прогнозные уровни добычи ТЭР по основным нефтегазовым провинциям и угольным месторождениям, а также размещение новых крупных электростанций по регионам страны.

Блок V («балансовый»). Балансовый блок является завершающим этапом в рассматриваемой схеме прогнозирования. В его рамках разрабатывается система прогнозных ТЭБ, которая включает:

- однопродуктовые балансы (т.е. балансы по всем рассматриваемым энергоносителям) для каждого региона и страны в целом;
- сводные балансы (котельно-печного топлива, моторного топлива и первичной энергии) также для каждого региона и страны в целом.

3. Прогнозирование спроса на энергоносители

Схема прогнозирования

Принципиальная схема прогнозирования спроса на энергоносители методом «сверху-вниз» (блок III на рис. 2) включает следующие этапы (рис. 3):



Рис. 3. Принципиальная схема прогнозирования спроса на энергоносители

- 1) разработку сценариев развития отраслей экономики по регионам России;
- 2) прогнозирование энергоемкостей отраслей экономики страны и регионов;
- 3) прогнозирование энергопотребления отраслей экономики регионов и страны в целом;
- 4) увязку территориальных и отраслевых прогнозов;
- 5) уточнение энергоемкостей отраслей экономики по регионам и стране в целом.

Включение последнего этапа в схему прогнозирования предоставляет возможность упрощения пересчета спроса на энергоносители (без большой потери точности) при небольших изменениях входных параметров.

Предусматривается следующая последовательность разработки прогнозов спроса на энергоносители (рис. 4):

- 1) прогнозируется спрос на *конечные виды энергии* (электрическую и тепловую);

2) полученные данные используются для определения будущих потребностей в *топливно-энергетических агрегатах*: котельно-печном топливе (КПТ), моторном топливе (МТ), возобновляемых видах энергии (ВВЭ) и вторичном тепле;

3) выполняется прогноз спроса на *конкретные виды топлив* – составляющих КПТ (мазут, природный газ и др.) и МТ (автобензин, дизтопливо и др.);

4) на заключительном этапе определяются потребности страны и регионов в *первичных ТЭР*, которые представлены ископаемыми органическими топливами, атомной энергией и возобновляемыми видами энергии (гидроэнергия, ветровая энергия и др.).



Рис. 4. Последовательность разработки прогнозов спроса на энергоносители

Разработанная методология прогнозирования энергопотребления обеспечивает учет:

- текущего состояния в энергопотреблении регионов: сложившуюся структуру использования ТЭР и существующие энергетические характеристики потребителей (их энергоэффективность);
- особенностей социально-экономического развития регионов в будущем;
- влияния социально-экономического развития страны и развития отраслей экономики по стране в целом на развитие отраслей экономики в регионах.

Прогнозы спроса на энергоносители разрабатываются с использованием формальных методов (аналитических и статистических), а также эвристических процедур. Включение последних в алгоритм прогнозирования представляется принципиально важным. При прогнозировании на достаточно отдаленную перспективу неопределенность исходной информации (прежде всего, описывающей условия развития страны и регионов) настолько велика, что ограничиться только формальными методами оказывается недостаточным. Результаты, получаемые с использованием формальных процедур, являются базой для последующего их экспертного анализа. При необходимости эти результаты могут корректироваться.

Разработка сценариев развития отраслей экономики регионов

Цель данного этапа (этап 1 на рис. 3) – оценка для каждого региона перспективных экономических показателей: ВРП, выпусков продукции отраслями экономики, доходов населения и др.

Состав рассматриваемых отраслей экономики формируется таким образом, чтобы он удовлетворял следующим требованиям:

• соответствовал общероссийскому классификатору видов экономической деятельности (ОКВЭД) и системе национальных счетов (СНС);

• был минимально достаточным для решения задачи прогнозирования спроса на энергоносители по стране в целом и по ее регионам;

• имел доступное информационное наполнение.

В итоге принят следующий состав отраслей экономики:

- промышленность (разделы ОКВЭД: C+D);
- энергетика (E);
- строительство (F);
- сельское хозяйство, включая охоту и лесное хозяйство (A);
- транспорт, включая связь (I);
- сфера услуг (прочие разделы ОКВЭД);
- домашние хозяйства.

Более детальное представление некоторых отраслей, например, промышленности, пока не обеспечено информационно. После перехода статистической отчетности в стране на ОКВЭД потерянными оказались многие динамические ряды, описывающие как экономику, так и энергетику. Очевидно, что для наработки новых рядов (или обновления старых) нужно время. По мере накопления статистической информации может стать целесообразной детализация представления отдельных отраслей экономики. В частности, промышленность уже в ближайшее время целесообразно разделить на две составляющих: добывающие производства (раздел С) и обрабатывающие производства (раздел D).

Выполняется данный этап на основе анализа:

- ретроспективных данных по отраслям экономики регионов;
- имеющихся программ социально-экономического развития субъектов РФ;
- подготовленных к реализации крупных инвестиционных проектов.

Проблема состоит в том, что далеко не все субъекты РФ имеют программы социально-экономического развития на долгосрочную перспективу. Кроме того, существующие программы обычно не соответствуют принятым в выполняемых исследованиях сценарным условиям развития экономики и социальной сферы страны и не согласованы между собой. Причина заключается в том, что эти программы создавались в разное время (значит, под разную макроэкономику) и разными коллективами (следовательно, на основе различных методических подходов). Тем не менее, имеющуюся в этих программах информацию целесообразно использовать.

Для каждой из рассматриваемых отраслей экономики прогнозы выпуска продукции по стране в целом и регионам осуществляются по следующему алгоритму.

1. Определяются выпуски продукции рассматриваемой отрасли экономики в прогнозный период для страны в целом (в сопоставимых ценах).

2. Рассчитываются выпуски продукции отрасли экономики каждого региона (в сопоставимых ценах).

3. Производится согласование выпусков продукции каждой отрасли экономики по регионам и стране в целом.

Аналогичным образом определяются прогнозные значения других экономических показателей (ВРП, доходы населения) по регионам страны.

В совокупности с внешними демографическими прогнозами полученные результаты формируют сценарии социально-экономического развития регионов, на основе которых в дальнейшем при выполнении этапа 3 (рис. 3) прогнозируется спрос на энергоносители по регионам страны.

Прогнозирование энергоемкостей отраслей экономики страны и регионов

Основные факторы, влияющие на изменение энергоемкости отраслей экономики:

- производственные (изменение загрузки производственных мощностей);
- структурные (изменение структуры производства);
- технологические (изменение технологических характеристик оборудования);
- территориальные (изменение территориальной структуры производства).

Производственные факторы приводят к изменению величины условно-постоянных расходов энергоносителей. Технологические факторы ответственны за изменение условно-переменной части энергопотребления. Структурные факторы влияют на обе составляющие.

Разработанный в ИНЭИ РАН подход к прогнозированию энергоемкостей отраслей экономики страны и регионов позволяет учесть: а) связи энергоемкостей отраслей экономики с макропоказателями, б) существующие территориальные различия энергоемкостей каждой отрасли экономики и неравномерности изменения этих показателей в будущем.

Алгоритм прогнозирования энергоемкостей. Оценки энергоемкости отраслей экономики делаются по каждому энергоносителю. Ниже представлены основные стадии обсуждаемого алгоритма.

1. Прогнозирование энергоемкости каждой рассматриваемой отрасли экономики для страны в целом в зависимости от прогнозов макроэкономических параметров. В результате получаем *базовый* вариант прогнозной энергоемкости, который отражает условие сохранения в будущем действия нынешних тенденций (рис. 5). Связи энергоемкости отраслей экономики с макропоказателями обсуждаются ниже.

2. Экспертная корректировка базовой энергоемкости отрасли экономики страны для учета влияния неформализованных факторов. В результате имеем *скорректированную* энергоемкости (рис. 5).

3. Определение базовых значений энергоемкости для каждой отрасли экономики в регионах в прогнозный период.

4. Корректировка базовых энергоемкостей отраслей экономики в регионах с целью учета реализации крупных инвестиционных проектов и других факторов с получением скорректированных энергоемкостей.

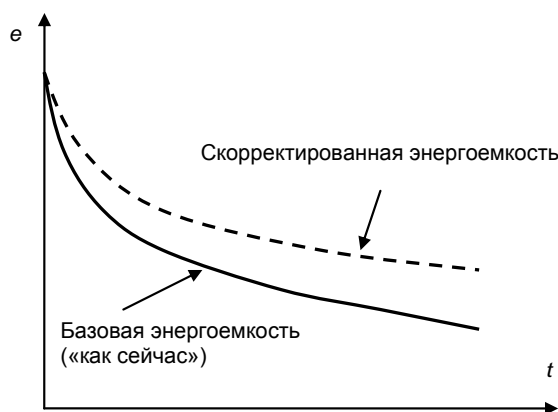


Рис. 5. Прогнозы энергоемкости отраслей экономики

Связи энергоемкостей с макропоказателями. Прогнозирование энергоемкостей отраслей экономики осуществляется с использованием статистических и аналитических методов. При этом устанавливаются связи энергоемкости с основными экономическими показателями, прогноз которых осуществляется в рамках макроэкономического анализа (блок II; рис. 2). Чаще всего, это инвестиции в основной капитал, цены на соответствующие энергоносители и некоторые другие. Опыт показывает, что из-за специфики энергопотребления от-

раслей экономики нецелесообразно стремиться к разработке универсального подхода к моделированию таких связей. Например, экономическая природа потребления электроэнергии и централизованного тепла домашними хозяйствами различна. Значит, могут потребоваться разные методы прогнозирования спроса на эти энергоносители.

Как показали наши исследования, в большинстве случаев решающей оказывается связь энергоемкости отрасли с инвестициями в основной капитал отрасли (рассчитанных в сопоставимых ценах), причем с кумулятивными инвестициями. Дело в том, что побудительным мотивом для повышения энергоэффективности производства (или, в частном случае, снижения его энергоемкости) является повышение цен на энергоносители (поскольку надо обеспечить конкурентоспособность бизнеса). Однако, цены являются только необходимым условием для изменения энергоемкостей. Средством для достижения этой цели (т.е. повышения энергоэффективности производства посредством реализации потенциала энергосбережения) являются инвестиции. Только наличие инвестиций обеспечивает достаточное условие для значимого повышения энергоэффективности любой отрасли экономики. Поскольку эффект от вложений инвестиций в общем случае получается не моментально (не в год вложений), то, как показали наши исследования, целесообразно принимать в расчет кумулятивные инвестиции (естественно, измеренные в сопоставимых ценах).

Для прогнозирования электроемкости домашних хозяйств (ДХ) используются зависимости этого показателя от двух факторов: 1) душевого дохода населения (в сопоставимых ценах) и 2) цены на электроэнергию. Количественные оценки электроемкости ДХ определяются путем проведения многофакторного регрессионного анализа на основе ретроспективной информации.

Эвристические процедуры. Следует подчеркнуть важность эвристических процедур (этапов экспертной корректировки энергоемкостей секторов экономики страны и регионов), предусмотренных в представленном выше алгоритме прогнозирования. Дело в том, что расчетные значения прогнозных энергоемкостей, полученные на основе формальных методов, отражают существующие тенденции изменения энергоэффективности инвестиций в соответствующие отрасли экономики. Вполне возможно, что в будущем энергоэффективность инвестиций в некоторые отрасли экономики не будет изменяться по тому же закону (т.е. следовать *базовой тенденции*). В частности, можно предположить для ряда отраслей замедление темпов снижения энергоемкости производства (относительно базовой тенденции), в частности, вследствие завершения реализации «дешевой части» потенциала энергосбережения.

В принципе, нельзя исключить ситуации повышения в будущем энергоемкости некоторых отраслей экономики (например, интенсивное развитие энергоемких подотраслей промышленности в некоторых регионах, замещение на трубопроводном транспорте газового привода электрическим, если это будет экономически выгодным, и т.д.). Тогда и определенные выше значения эластичностей, отражающие базовые тенденции в энергоэффективности инвестиций, не будут оставаться в прогнозный период величиной постоянной. В таком случае может потребоваться их экспертная корректировка.

Поэтому определенные на основе формальных методов *базовые* значения прогнозных энергоемкостей отраслей экономики страны и регионов можно рассматривать в качестве своеобразных ориентиров для последующей их корректировки, если такая корректировка будет необходимой. Результатом данной процедуры являются *скорректированные* значения энергоемкостей (рис. 5).

Надо особо отметить, что базовые значения энергоемкостей в большинстве случаев можно принимать в качестве «нижних оценок» энергоемкостей соответствующих отраслей экономики. Они соответствуют условиям и темпам развития отечественной экономики *«как сейчас»*.

Прогнозирование энергопотребления страны и регионов

Прогноз энергопотребления страны и регионов (этап 3; рис. 3) осуществляется на основе данных по выпускам продукции отраслями экономики страны в рассматриваемой пер-

спективе (результаты этапа 1) и прогнозов энергоемкости отраслей экономики (результаты этапа 2). Расчеты выполняются для каждого энергоносителя в отдельности. Алгоритм прогнозирования может быть представлен следующим образом.

1. Расчет спроса на энергоноситель каждой отраслью экономики по стране в целом.
2. Расчет спроса на энергоноситель каждой отраслью экономики по регионам страны.
3. Согласование спроса на энергоноситель для каждой отрасли экономики по регионам и стране в целом.
4. Определение спроса на энергоноситель в каждом регионе и по стране в целом.

Для каждого сценария развития экономики страны (и, соответственно, регионов) получаем область прогнозов энергопотребления рассматриваемыми отраслями экономики, ограниченную «базовой» и «скорректированной» энергоемкостью (рис. 6).

Традиционно расчеты выполняются, как минимум, для двух макроэкономических сценариев. Тогда в качестве прогноза энергопотребления отрасли экономики может быть принята область, ограниченная «скорректированной» энергоемкостью для каждого сценария развития экономики. Такие прогнозы, видимо, являются несколько завышенными. Если ориентироваться на базовую энергоемкость, то получаемые прогнозы оказываются несколько заниженными. Существует область перекрытия прогнозов, которую с определенной условностью можно охарактеризовать как «наиболее вероятную».

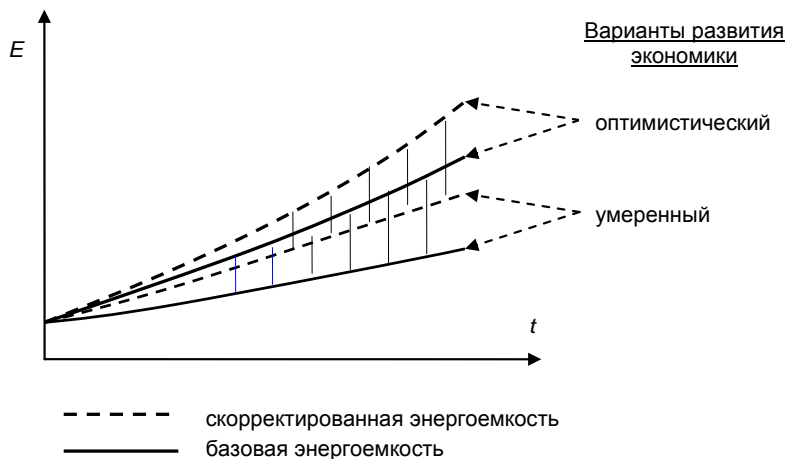


Рис. 6. Прогнозы спроса на энергоносители секторами экономики

Заключение

Представленный подход реализован в ИНЭИ РАН в виде распределенного информационно-вычислительного комплекса, полностью интегрированного в информационную и вычислительную среду института, прежде всего, посредством унификации протоколов обмена данными. В числе главных достоинств подхода следует отметить:

- адекватное описание процессов формирования спроса на энергоносители для условий современной российской экономики, перешедшей к рыночной форме хозяйствования;
- согласованность прогнозов энергопотребления с прогнозами социально-экономического развития страны и регионов (энергетические прогнозы разрабатываются на основе прогнозов экономических);
- разделение производственных (выпуски продукции и т.д.) и энергетических (энергоемкости) переменных при прогнозировании энергопотребления и определение связей энергоемкостей с экономическими факторами;

• корректный учет специфики формирования спроса на энергоносители в различных отраслях экономики путем применения как статистических, так и аналитических методов прогнозирования;

• гибкость и оперативность подготовки прогнозов, что достигается сочетанием в алгоритмах прогнозирования строгой формализации и эвристических процедур;

• корректный учет территориального фактора за счет интеграции методов прогнозирования энергопотребления «сверху-вниз» и «снизу-вверх»;

• использование доступного информационного обеспечения, базирующегося в своей основе на данных регулярных статистических наблюдений Росстата.

На протяжении нескольких последних лет с использованием данного подхода разрабатывались прогнозы спроса на энергоносители и прогнозные ТЭБ для страны и регионов по заданию государственных органов власти (Минэкономразвития, Минпромэнерго), ведущих отечественных энергетических компаний (ОАО Газпром, РАО ЕЭС России и др.) и ряда других организаций.

В 2007 г. планируется полномасштабное внедрение данного подхода в практику Минпромэнерго для прогнозирования спроса на энергоносители и формирования системы взаимосогласованных прогнозных ТЭБ страны и регионов с активным привлечением к данной работе региональных органов государственной власти. Блок прогнозирования спроса на энергоносители намечается в 2007 г. внедрить в Минэкономразвития России.

Филиппов Сергей Петрович –

член-корреспондент РАН, доктор технических наук, заместитель директора Института энергетических исследований РАН, г. Москва

Статья поступила в редакцию 14.06.07, принята к опубликованию 05.12.07

УДК 536.7:541.1:519.8

Б.М. Каганович, А.В. Кейко, С.П. Филиппов, В.А. Шаманский

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕРАВНОВЕСНЫХ ОТКРЫТЫХ СИСТЕМ МЕТОДАМИ РАВНОВЕСНОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ

Предложен метод анализа неравновесных открытых систем, основанный на положениях классической равновесной термодинамики. Он предполагает использование модели экстремальных промежуточных состояний (МЭПС). По сравнению с традиционными моделями классической термодинамики МЭПС позволяет не только находить точку конечного равновесия системы, но и просматривать всю область термодинамической достижимости из заданного исходного состояния и отыскивать в ней частичное (промежуточное) равновесие, соответствующее экстремальному значению интересующего исследователя свойства.

B.M. Kaganovich, A.V. Keiko, S.P. Filippov, V.A. Shamansky

**MODELLING OF NON-EQUILIBRIUM OPEN SYSTEMS
BY EQUILIBRIUM THERMODYNAMICS METHODS**

The analysis method of non-equilibrium open systems, based on classic equilibrium thermodynamics is suggested here. It assumes using a model of external intermediate states (MEIS). Comparing with traditional models of classic thermodynamics MEIS allows along with locating the final equilibrium point to look through a whole thermodynamic attainability region from given initial state and to locate partial (intermediate) equilibrium that corresponds to extreme magnitude of a property which may interest a researcher.

Введение. В прикладных исследованиях открытые системы, в которых происходящие процессы в той или иной мере характеризуются неравновесностью и необратимостью, составляют подавляющую часть изучаемых объектов, в том числе и в энергетике (технологии переработки и сжигания органических топлив, очистки дымовых газов от вредных выбросов и т.д.). Естественно, что применительно к таким системам развитие методов статистической механики и равновесной термодинамики привело к возникновению ряда новых научных направлений: неравновесной термодинамики [1, 2], синергетики [3], термодинамического анализа уравнений химической кинетики [4, 5] и др. Однако надо отметить, что и классическая термодинамика, начиная с момента своего зарождения и до наших дней, постоянно эффективно использовалась в анализе открытых систем, в том числе, неравновесных. Известная работа С. Карно «О движущей силе огня ...» (1824) [6] положила начало изучению с помощью моделей круговых процессов в закрытых системах незамкнутых процессов в теплосиловых установках, в которых энергия поступает от внешних источников и часть теплоты отводится в окружающую среду. Гиббсом были установлены условия равновесия открытых систем и экстремальность их характеристических функций для различных случаев взаимодействия с окружающей средой [7]. Классики физики: Гиббс, Планк, Эйнштейн, Ландау и другие, – дали прекрасные образцы изучения на основе положений равновесной термодинамики принципиально необратимых процессов: горения; излучения, распространения и поглощения света; диффузии; опалесценции, движения газа в трубах. Со второй половины XX века создаются многочисленные методы, компьютерные программы и вычислительные системы для термодинамического анализа в химической технологии, металлургии, геологии, энергетике, космонавтике, экологии и других областях науки и техники [8-17 и др.].

Развиваемый авторами подход также основывается на положениях классической термодинамики, но по сравнению с ее традиционными моделями обладает двумя принципиальными особенностями. Во-первых, он позволяет наряду с поиском точки конечного равновесия просматривать всю область термодинамической достижимости из заданного исходного состояния исследуемой системы и находить в ней равновесное состояние (промежуточное или конечное), соответствующее экстремальному значению интересующего исследователя свойства (например, максимальной концентрации полезных продуктов химической реакции). Во-вторых, в применяемую математическую модель включаются записанные в термодинамической форме (без использования переменной времени) ограничения на лимитирующие осуществимость равновесий процессы переноса или химическую кинетику.

Общее описание модели экстремальных промежуточных состояний (МЭПС). В первый период развития МЭПС (до включения в них описаний движения) [18-20] в качестве одной из теоретических основ использовался выполненный А.Н. Горбанем анализ возможных эффектов на пути термодинамических систем к конечному равновесию [4]. При созда-

нии в рамках МЭПС равновесных описаний процессов [21-25] авторы также в значительной мере опирались на результаты А.Н. Горбаня. Однако излагаемый ниже метод имеет и принципиальное отличие от методов термодинамического анализа уравнений химической кинетики [4, 5] и неравновесной термодинамики [1]. В нем непосредственно не исследуются траектории процессов, а рассматриваются только состояния, достижимые из заданной исходной точки. При этом согласно Больцману [26], принимается предпосылка, что любой возможный путь к конечному равновесию представляет непрерывную последовательность равновесных состояний. Эти состояния не зависят от предыстории их достижения, и из их описания может быть исключена переменная времени. Соответственно неравновесные состояния трактуются как состояния промежуточных (на пути к конечному равновесию) частичных равновесий.

Наряду с отмеченной физической предпосылкой во всех выполненных до сих пор исследованиях МЭПС принималась и математическая предпосылка о сводимости решаемой задачи к задаче выпуклого программирования (ВП). Эта сводимость может обеспечиваться и путем аппроксимации используемых математических выражений. В случае использования ограничений на процессы переноса и кинетику дополнительно предполагается, что они удовлетворяют автономным дифференциальным уравнениям первого порядка вида $\dot{x} = f(x)$.

В качестве цели вычислений намечается поиск равновесного состояния, интересующего исследователя, например состояния, соответствующего экстремальному выходу целевых или вредных продуктов изучаемого процесса.

Основанную на отмеченных предпосылках МЭПС физико-химических систем с фиксированными T, P и вектором исходного состава реагентов и их фаз y можно представить в виде:

найти

$$\max \left[F(x) = \sum_{j \in J^{ext}} c_j x_j \right] = F(x^{ext}) \quad (1)$$

при условиях

$$Ax = b, \quad (2)$$

$$D_i(y) = \{x : x \leq y\}, \quad (3)$$

$$\varphi(x) \leq \Psi, \quad (4)$$

$$G(x) = \sum_j G_j(x) x_j, \quad (5)$$

$$x_j \geq 0, \quad (6)$$

где $x=(x_1, \dots, x_n)^T$ – вектор количеств молей компонентов реакционной смеси; $y=(y_1, \dots, y_n)^T$ – вектор количеств молей исходных реагентов, $u \subset x$; c_j – коэффициент, ранжирующий полезность или вредность j -го компонента x ; A – $(m \times n)$ – матрица содержаний элементов в компонентах системы; b – вектор количеств молей элементов; $D_i(y)$ – область (множество) термодинамической достижимости из y ; Ψ – заданное предельное значение правой части уравнения движения; ext – индекс состояния равновесия, соответствующего экстремуму целевой функции; J^{ext} – множество индексов компонентов, экстремальная концентрация набора которых должна быть определена.

Матричное уравнение (2) представляет условие сохранения количеств молей элементов. Выражение (3) определяет область достижимости. Знак « \leq » внутри фигурных скобок имеет предложенную А.Н. Горбанем термодинамическую трактовку: $x \leq y$, если из y можно перейти в x по непрерывной траектории, вдоль которой характеристическая термодинамическая функция (в данном случае G) монотонно не возрастает. Очевидно, что в $D_i(y)$ соблюдаются неравенства: $G(x^{eq}) \leq G(x) \leq G(y)$. Неравенство (4) ограничивает значения правых ча-

стей лимитирующих уравнений движения, т.е. тех, которые приводят к сужению $D(y)$. Левая часть (4) представляет либо непосредственно правую часть уравнения $\dot{x} = f(x)$, либо интеграл уравнения, либо линейную аппроксимацию одной из двух возможных записей $\varphi(x)$.

Модель (1)-(6) в некоторых отношениях обладает потенциальными преимуществами по сравнению с моделями неравновесной термодинамики [1, 2] и термодинамическим анализом уравнений химической кинетики [4, 5]. Переход от рассмотрения траекторий к рассмотрению состояний существенно снижает требования к исходной информации. Так, в общем случае отпадает необходимость в знании полного механизма изучаемого процесса, т.е. всех составляющих его элементарных стадий. Сохраняется лишь потребность в данных о лимитирующих уравнениях движения. Кроме того, сильно упрощается используемый математический аппарат. Дифференциальные уравнения заменяются алгебраическими и трансцендентными. При этом с помощью конечных величин оказывается возможным описывать и пространственно неоднородные системы, в которых по отдельным направлениям претерпевают изменения интенсивные параметры [20]. Формулировка решаемой проблемы на языке МП позволяет дополнять используемую модель разнообразными ограничениями в виде равенств и неравенств с целью учета специфики рассматриваемого объекта.

Реализация отмеченных возможностей модели (1)-(6) связана с созданием эффективных вычислительных алгоритмов, которые, в свою очередь, должны основываться на анализе математических особенностей МЭПС. В достаточно большом объеме такой анализ был выполнен применительно к первым вариантам МЭПС, не содержащим ограничений на скорость движений [18-20]. Центральное место в нем заняла проблема сводимости решаемых задач к задачам ВП. Результатом ее исследований явились установление широкой области выпуклости термодинамических функций реальных газов, подчиняющихся двухпараметрическим уравнениям состояния; условий выпуклости $D(y)$ для аддитивных систем с нелинейными балансами и неаддитивных систем. На примерах была показана значительная вероятность сводимости к ВП задач с переменным исходным составом реагентов y .

Включение в МЭПС неравенства (4) в случае его линейности не отражается на сводимости решаемой задачи к выпуклому программированию. Для ситуации, когда линейная аппроксимация невозможна, допустимость изложения проблемы поиска частичных равновесий на языке ВП требует дополнительных исследований.

Значительная трудность решения задач на основе МЭПС, имеющая место даже при выпуклости $D(y)$, связана с заданием в неявном виде ограничений на монотонность изменения термодинамических функций (ограничение (3)). Эта трудность была преодолена Е.Г. Анциферовым [18], который предложил двухэтапную методику поиска вектора экстремальных концентраций x^{ext} . На первом этапе находится поверхность уровня термодинамической функции, на которой расположена точка x^{ext} , а на втором – на этой поверхности отыскиваются координаты искомой точки. Во всех выполненных до сих пор исследованиях термодинамических задач с помощью МЭПС использовались исключительно алгоритмы, основанные на идее Е.Г. Анциферова. Они нашли многочисленные применения в анализе процессов переработки и сжигания органических топлив, шлакования топочных поверхностей нагрева, загрязнения атмосферы антропогенными выбросами и др. [22-25, 27-29]. Ниже приводятся примеры использования последних модификаций МЭПС, включающих ограничения на скорость движений.

Примеры равновесных описаний неравновесных процессов. В качестве первого примера для наглядности рассмотрим простую модель процесса химической изомеризации. Предположим, что изучаемая система содержит три изомера, которым соответствуют компоненты вектора x : x_1 , x_2 , x_3 . Общее количество вещества в реакционной смеси равняется единице. В начальном состоянии присутствует только первый изомер. Нужно определить максимально достижимое количество третьего изомера при условиях, что механизм процесса включает реакции $x_1 \rightarrow x_2$ и $x_2 \rightarrow x_3$, заданы ограничения на скорость второй из них, температура T и давление P постоянны.

Так как реакции изомеризации являются мономолекулярными и описываются линейными дифференциальными уравнениями

$$\frac{dx_1}{d\tau} = -k_1x_1 \quad \text{и} \quad \frac{dx_3}{d\tau} = -k_2x_2,$$

то с учетом автономности этих уравнений модель (1)-(6) можно привести к виду:
найти

$$\max x_3 \tag{7}$$

при условиях

$$x_1 + x_2 + x_3 = 1, \tag{8}$$

$$D_i(y) = \{x : x \leq y\}, \tag{9}$$

$$k_2x_2 \leq \Psi, \tag{10}$$

$$G = \sum_1^3 G_j(x)x_j, \tag{11}$$

$$x_j \geq 0. \tag{12}$$

Графическая интерпретация модели (7)-(12) приведена на рис. 1. Изображенный на нем равносторонний треугольник – это многогранник материального баланса, определяемый уравнением (8) и неравенством (12).

Вершины соответствуют состояниям, в которых молярное содержание одного из компонентов равняется единице (индекс при символе вершины A совпадает с индексом этого компонента), а двух остальных – нулю. На площади треугольника выделены штриховкой зоны термодинамической недостижимости из-у по условию (8) и нанесены точки конечного равновесия x^{eq} , максимального значения x_3 при полной системе ограничений (8)-(12) x^{ext} . Прямая $k_2x_2 = \Psi$ отображает кинетическое ограничение (10) и делает недостижимой расположенную слева от нее часть $D_i(y)$ (незаштрихованную часть треугольника). Решение задачи (7)-(12) благодаря этому ограничению перемещается из \tilde{x}^{ext} в точку x^{ext} (точку пересечения прямой $k_2x_2 = \Psi$ с границей зоны недостижимости вблизи вершины A_3). Видно, что точка x^{ext} расположена дальше от вершины A_3 (точки максимума x_3 на треугольнике при единственном ограничении (8)), чем \tilde{x}^{ext} , и, следовательно, молярное содержание целевого продукта процесса в x^{ext} меньше, чем в \tilde{x}^{ext} .

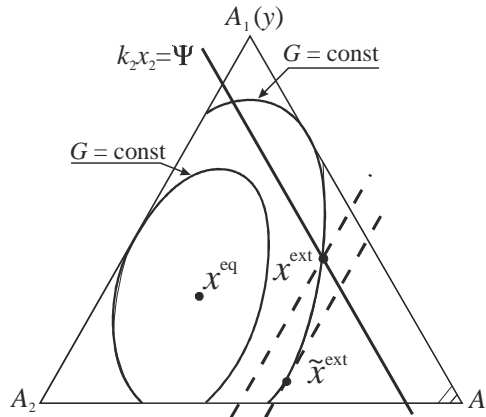


Рис. 1. Графическая интерпретация процесса изомеризации

Дополнительно отметим, что выбор целевой функции в рассмотренном примере (как и в большинстве случаев применения МЭПС) можно трактовать как выбор «субъективного» критерия порядка (самоорганизации) в реагирующей системе. Как известно, формализация такого критерия в задачах неравновесной термодинамики и синергетики часто связана с большими трудностями. МЭПС позволяет выбирать этот критерий в соответствии с целями исследования. В обсуждаемом примере наиболее упорядоченным естественно считать состояние с максимальным содержанием целевого продукта процесса.

Простота обсуждаемой термодинамической модели более заметна при сравнении ее с кинетическим описанием рассматриваемого процесса, которое имеет вид

$$x_1 + x_2 + x_3 = 1, \quad \frac{dx_1}{d\tau} = -k_1 x_1, \quad \frac{dx_2}{d\tau} = -k_2 x_2 + k_1 x_1, \quad x \geq 0.$$

Решение этой системы

$$x_1 = \exp(-k_1 \tau), \quad x_2 = \frac{k_1}{k_2 - k_1} [\exp(-k_1 \tau) - \exp(-k_2 \tau)],$$

$$x_3 = 1 - \frac{k_2}{k_2 - k_1} \exp(-k_1 \tau) + \frac{k_1}{k_2 - k_1} \exp(-k_2 \tau).$$

Кривые, соответствующие этим уравнениям при $k_1=1 \text{ с}^{-1}$ и $k_2=0,5 \text{ с}^{-1}$ (цифры выбраны для наглядности графической интерпретации, действительные значения констант скоростей мономолекулярных реакций могут отличаться на много порядков), приведены на рис. 2, из которого видно, что при $\tau \rightarrow \infty$ $x_3 \rightarrow 1$, а $x_1 \rightarrow 0$. Это не допускается термодинамикой (см. рис. 1). Следовательно, при кинетическом анализе процесса оказывается необходимым учет термодинамических требований¹. С увеличением размерности задачи (см. далее) сложность кинетического описания будет расти значительно быстрее сложности равновесной модели. Это свидетельствует о сравнительных достоинствах МЭПС в случаях, когда интерес представляют только результаты изучаемого процесса, а не время их достижения.

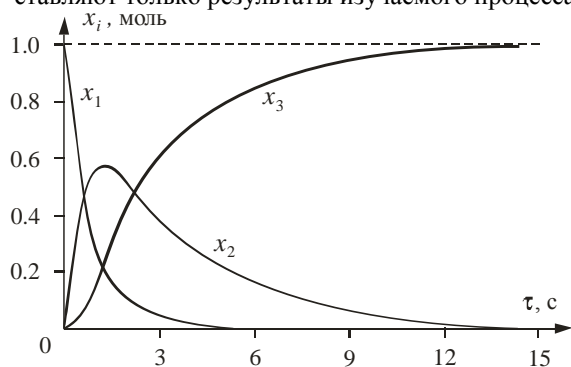


Рис. 2. Кривые уравнений кинетики процесса изомеризации

На втором, более сложном примере покажем формирование кинетического ограничения (4) для процесса образования термических оксидов азота при горении метана в камере сгорания ГТУ. В этом случае вектор исходных реагентов y включает три основных компонента: CH_4 , O_2 и N_2 . Температура и давление полагаются постоянными.

Рассмотрим две ситуации, когда образование NO происходит по прямому механизму (NO образуется одновременно с процессом окисления метана) и в соответствии с механизмом Я.Б. Зельдовича (образование NO начинается лишь после завершения горения метана).

В связи с этим общий процесс формирования продуктов сгорания можно представить в виде двух стадий с разными векторами исходных составов, зависимость между которыми описывается преобразованием

$$y = (y_{\text{CH}_4}, y_{\text{O}_2}, y_{\text{N}_2})^T \rightarrow y^z = (y_{\text{CO}_2}^z, y_{\text{H}_2\text{O}}^z, y_{\text{O}_2}^z, y_{\text{N}_2}^z)^T,$$

где y – вектор компонентов исходной смеси (воздух и метан); y^z – вектор количеств молей реагентов в начальный момент образования NO по механизму Зельдовича (избыток воздуха и продукты сгорания метана).

Механизм образования термических оксидов азота предложен Я.Б. Зельдовичем [30]. Согласно этому механизму образование NO состоит из следующих элементарных реакций:



¹ Эти требования были бы удовлетворены автоматически при включении в механизм процесса наряду с прямыми реакциями обратных и точном задании констант скоростей.

Лимитирующей является реакция (13), имеющая большую энергию активации из-за прочной тройной связи в молекуле азота. Для того чтобы найти ограничения на область термодинамической достижимости, запишем уравнение для скорости образования NO:

$$\frac{dx_{NO}}{d\tau} = k_{(13)}x_Ox_{N_2} + k_{(14)}x_Nx_{O_2} + k_{(15)}x_Nx_{OH}, \quad (16)$$

где k – скорость соответствующей реакции. Учитывая, что

$$\frac{dx_N}{d\tau} = k_{(13)}x_Ox_{N_2} - k_{(14)}x_Nx_{O_2} + k_{(15)}x_Nx_{OH} \quad (17)$$

и $dx_N/d\tau \approx 0$ в стационарном режиме горения (реакции (14) и (15) – быстрые), находим:

$$\frac{dx_{NO}}{d\tau} = 2k_{(13)}x_Ox_{N_2} \approx 2k_{(13)}x_Ox_{N_2}. \quad (18)$$

При интегрировании этого выражения в стационарных условиях среднюю по объему (вне зоны факела) концентрацию атомов кислорода x_O можно считать постоянной, поскольку реакции с их участием быстрые. Тогда

$$\int_0^{x_{NO}} dx_{NO} = \int_0^{\tau^b} 2k_{(13)}x_Ox_{N_2} d\tau = 2k_{(13)}x_Ox_{N_2}\tau^b = Kx_O, \quad (19)$$

где τ^b – среднее время прохождения реакционной смеси через камеру сгорания.

Учитывая вышеизложенное, модель МЭПС (1)-(6) для исследования образования термических оксидов азота при горении газа в камере сгорания ГТУ можно написать следующим образом:

С учетом ограничений на химическую кинетику обусловленных реакцией (13) модель (1)-(6) запишется следующим образом:

найти

$$\max x_{NO} \quad (20)$$

при условиях

$$Ax = b \quad (21)$$

$$D_i(y^z) = \{x : x \leq y^z\}, \quad (22)$$

$$x_{NO} \leq \Psi = Kx_O, \quad (23)$$

$$x \geq 0. \quad (24)$$

На рис. 3 показано формирование области термодинамической достижимости на основе модели (20)-(24) для прямого механизма образования NO и по механизму Зельдовича.

На рисунке показано формирование области термодинамической достижимости. Здесь приведено двухмерное сечение многогранника материального баланса, построенное по трем фиксированным точкам – (y, y^z) , x_{NO}^{mat} и x_O^{mat} , которые в этом случае являются его вершинами. Верхний индекс «mat» указывает на максимально возможное количество данного вещества в системе по условиям материального баланса. Внутри сечения проведены линии уровня энергии Гиббса, характеризующие ее топологию при данных фиксированных температуре и давлении. В отсутствие кинетических ограничений область термодинамической достижимости $D_i(y)$ ограничена линией $y^z - a - b - y^z$ (не заштрихована). Отрезок $a - b$ этой линии представляет собой уровень постоянной энергии Гиббса, имеющий точку касания a с ребром сечения $y^z - x_O^{mat}$. Касательная $x_{NO} = \text{const}$, проведенная к этой линии, определяет величину $\tilde{x}_{NO}^{z,ext}$ – максимальное термодинамически достижимое содержание NO в системе при горении газа по механизму Зельдовича. Эта величина, как видно из рисунка, значительно

больше равновесного значения \tilde{x}_{NO}^{eq} , которое находится в точке минимума энергии Гиббса системы. Условие $x_{NO} = Kx_O$ на рисунке изображено прямой линией $y^z - c$. То, что эта линия проходит через вершину y^z , обусловлено равенством $x_{NO} = x_O = 0$. Неравенство (22) приводит к появлению дополнительной области термодинамической недостижимости, которая обозначена на рисунке затемнением (треугольник $y^z - c - x_{NO}^{mat}$). Максимально достижимая концентрация NO при этом заметно уменьшается и переходит в точку $x_{NO}^{z,ext}$. Область термодинамической достижимости сужается и ограничивается линией $y^z - a - x_{NO}^{z,ext} - y^z$.

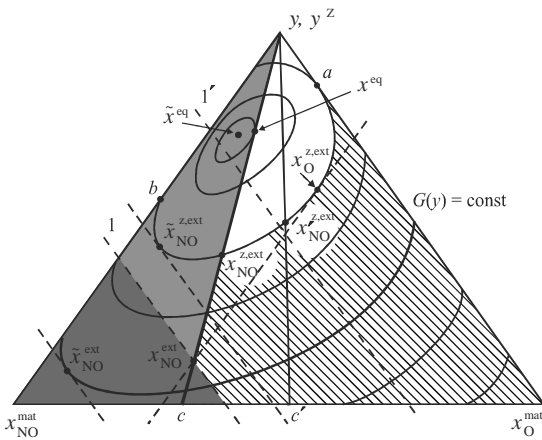


Рис. 3. Графическая интерпретация образования оксида азота в камере сгорания ГТУ

Таким образом, если в системе нет дополнительных ограничений, количество образовавшегося при горении термического оксида азота может быть много больше равновесного. Если не учитывать механизм Зельдовича, то в модели добавляется еще одна координата, связанная с появлением дополнительного компонента – метана. Проекция вершины многогранника материального баланса, соответствующей этому компоненту, на ребро сечения $y^z - x_O^{mat}$ совпадает с вершиной y^z . Касательная $x_{NO} = const$ к линии уровня $G(y)^1$, как и в предыдущем случае, определяет максимальное термодинамически достижимое содержание оксида азота x_{NO}^{ext} . Границей области термодинамической достижимости в этом

случае является линия $G(y)$. Расчет этой стадии проводится на основе блока конечного равновесия МЭПС.

Описанная новая модификация МЭПС позволяет оценить влияние кинетических факторов на состав и состояние системы. Так, например, если в рассмотренной ситуации уменьшить величину K в два раза, то линия ограничения области термодинамической достижимости сместится вправо (линия $y^z - c'$) и максимально возможное количество оксида азота, образующееся в системе, уменьшится (точка $x_{NO}^{z,ext}$), при этом изменится область термодинамической недоступности, обусловленная соотношением (23) (линия 1'). Уменьшение коэффициента K , как видно из соотношения (16), возможно за счет оптимизации времени пребывания реакционной смеси в топке (τ^b), уменьшения значения k путем изменения пирометрического уровня и др. В данном случае авторы не рассматривают практическую осуществимость и целесообразность таких мероприятий. Однако предлагаемая новая модификация МЭПС дает возможность *a priori* наглядно оценивать их возможности и эффективность. Таким образом, уже достаточно простое ограничение на химическую кинетику позволяет комплексно учитывать в модели перечисленные выше факторы, влияющие на образование термического NO.

Третий пример относится к анализу потокораспределения в многоконтурных гидравлических системах. Предварительный набросок модели нестационарных потоков в таких системах был приведен в [22, 23]. Здесь мы постараемся показать возможность определения на основе описания состояния конечного равновесия в гидравлической цепи различных степеней упорядоченности (ламинарный или турбулентный режимы) на ее ветвях.

Рассмотрим сеть, схема которой изображена на рис. 4. Заданными приняты давление, развиваемое нагнетателем P^{mov} (2 МПа); геометрические характеристики ветвей (длины, диаметры труб, коэффициенты местных сопротивлений); изотермический режим течения жидкости.

Блок конечного равновесия МЭПС для принятых условий имеет вид:
найти

$$\max \left(\Delta S = (1/T) \sum_i (\Delta P)_i x_i \right) \quad (25)$$

при условиях

$$Ax = 0, \quad (26)$$

$$P^{mov} x_1 - \sum_i (\Delta P)_i x_i = 0, \quad (27)$$

$$(\Delta P)_i = z_i x_i^{\beta_i}, \quad i = 1, \dots, 6, \quad (28)$$

где ΔS – производство энтропии, т.е. увеличение энтропии изолированной системы (цепь плюс окружающая среда) в единицу времени; $(\Delta P)_i$ и x_i – соответственно потеря давления и объемный расход на i -й ветви; $A=[a_{ij}]$ – матрица соединений независимых узлов и ветвей; z – коэффициент сопротивления ветви; показатель степени β принимается равным единице для ламинарного режима и двум для турбулентного.

Сумма внутри скобок в выражении для целевой функции (25) представляет общую кинетическую энергию потоков жидкости, превращаемую в теплоту, которая затем передается в окружающую среду. Уравнение (26) описывает первый закон Кирхгофа, который применительно к гидравлическим цепям выражает требование сохранения массы при потокораспределении. В уравнении (27) баланса производимой и потребляемой в цепи энергии знаки приняты в соответствии с принятым в термодинамике условием, что отводимая теплота $\sum_i (\Delta P)_i x_i$ отрицательна. Результаты расчета потокораспределения приведены в таблице.

Из таблицы видно, что при соответствующем максимуму энтропии равновесном стационарном распределении потоков на четырех ветвях цепи имеет место квадратичное замыкающее соотношение (турбулентный режим течения) и на двух – линейное (ламинарный режим). Таким образом, из данного примера выявляется возможность оценки с помощью классических моделей термодинамических равновесий уровней порядка (самоорганизации) в отдельных элементах (подсистемах) сложных систем (как известно, в неравновесной термодинамике и си-нергетике турбулентный режим принимается более организованным, чем ламинарный).

Последний, четвертый пример, представляющий описание гидравлического удара в трубе, возникающего при мгновенном перекрытии

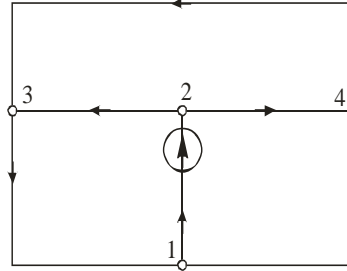


Рис. 4. Схема гидравлической сети: 1-4 – номера узлов; стрелка в кружке – источник действующего давления; стрелки – заданные направления потоков на ветвях

Результаты расчета
потокораспределения

Ветвь	z_i	ΔP_i , МПа	x_i , м ³ /с	β
1-2	$1.00 \cdot 10^{-2}$	1	10	2
2-3	$1.56 \cdot 10^{-3}$	0.1	8	2
2-4	$2.50 \cdot 10^{-2}$	0.05	2	1
1-3	$1.25 \cdot 10^{-2}$	0.9	8.5	2
3-4	$1.00 \cdot 10^{-1}$	0.05	0.5	1
1-4	$4.22 \cdot 10^{-1}$	0.95	1.5	2

Примечание. Размерность z не указана в связи с ее зависимостью от величины β .

потока, уже был описан в [20]. Здесь по сравнению с [20] несколько изменена трактовка используемой модели. Выбранное в качестве исходного уравнение

$$\pi(r + \delta r)^2 P dl - (\rho + \delta \rho) \pi(r + \delta r) dl \frac{dw}{dt} dl - 2\pi(r + \delta r) dl P d(\delta r) + \lambda d\varphi = 0 \quad (29)$$

интерпретируется не как уравнение равновесия Лагранжа, а непосредственно как уравнение равновесия термодинамической системы, подобное фундаментальным уравнениям Гиббса. В (29) P – максимальное давление в трубе, приближенно принятое равным его приросту; r и δr – радиус трубы и его увеличение при ударе; ρ и $\delta \rho$ – начальная плотность жидкости и ее изменение вследствие сжатия (растяжения); λ – множитель Лагранжа, в данном случае интерпретируемый как усилие в стенке трубы, возникающее при ее деформации; φ – деформация.

Запись (29) основана на предположении, что удар представляет адиабатический процесс (теплообмен и изменение энтропии не имеют места из-за исключительно высокой скорости процесса). Энергия рассматриваемой закрытой системы (жидкость плюс труба) также сохраняется постоянной. Поэтому уравнение равновесия сводится к балансу совершаемых в системе работ.

Первое слагаемое в левой части (29) представляет бесконечно малую работу силы давления, действующей на жидкость; второе слагаемое – работу силы инерции; третье – работу давления, связанную с увеличением радиуса трубы; четвертое – работу сил трения в стенке при ее деформации. Работа сил трения в уравнение не включена, поскольку эти силы из-за быстроты возрастания давления не успевают проявиться, т.е. жидкость оказывается идеальной.

Если принять, что 1) работы сопротивления стенки (третье слагаемое) и ее деформации (четвертое) пренебрежимо малы по сравнению с первыми двумя слагаемыми в (29); 2) δr и $\delta \rho$ также пренебрежимо малы; 3) dw – по модулю равняется начальной скорости потока жидкости, и учесть равенство производной dl/dt скорости ударной волны (звука) c , то уравнение (29) приобретает более простой вид

$$P - \rho c w = 0, \quad (30)$$

т.е. сводится к известной формуле Жуковского для гидравлического удара.

Конечно, если бы мы попытались уточнить уравнение (29), выразив c , как это сделал Жуковский, в виде функции от упругих свойств жидкости и стенки, то нам не только не удалось бы упростить выражение (29), но и пришлось бы конкретизировать формулу для деформации стенок и возникающих в них усилий. Но и при выбранном уровне абстракции в описании гидравлического удара, допущении, что скорость ударной волны равна скорости звука в свободной жидкости, приведенный пример иллюстрирует богатые возможности равновесных описаний. Из него видно, что модели «покоя» оказываются эффективными не только при анализе стационарных процессов, но и при исследовании принципиально нестационарных движений.

Создать специальную модификацию МЭПС многоконтурных гидравлических систем, предназначенную для анализа результатов различных возмущений (например, определения максимальных скачков давления в сети), пока удалось только для случая, когда «быстрые» возмущения режимов течения оказываются настолько медленными, что силы трения успевают проявиться, т.е. жидкость не становится идеальной [22, 23]. Приведенное простейшее описание мгновенного возмущения в одиночной трубе, возможно, станет исходным пунктом построения МЭПС нестационарного потокораспределения при таких возмущениях в сложных гидравлических сетях.

Заключение. Достигнутый уровень равновесных описаний и нерешенные проблемы. На рассмотренных примерах авторы стремились показать новые возможности равновесных описаний принципиально неравновесных систем, каковыми являются каме-

ра сгорания ГТУ или гидравлическая система с нестационарными потоками. Такой подход позволяет дополнить современные научные направления, такие как неравновесная термодинамика, синергетика [1-3], старыми испытанными моделями равновесий.

Конечно, чтобы «равновесное» направление заняло подобающее место в исследованиях неравновесных систем, необходимо дать на его основе формализованные описания основных процессов переноса и химической кинетики и проверить их справедливость на достаточно большом количестве примеров анализа реальных объектов.

Существенный задел в развитии равновесных описаний уже создан. Применительно к исходному варианту МЭПС (не содержащему ограничений на скорости движений) проведен достаточно детальный анализ математических особенностей, разработаны ряд вычислительных алгоритмов и основные блоки вычислительной системы, и их эффективность проверена на многочисленных расчетах технических и природных систем.

Однако МЭПС, включающая описания кинетики и процессов переноса, в определенной мере детализирована только применительно к отдельным химическим реакциям и одномерной гидродинамике (правда, многоконтурных систем). Соответственно, только для отмеченных случаев выполнен анализ математических особенностей новых модификаций МЭПС и разработаны вычислительные алгоритмы. Создание, анализ и проверка описаний многомерной гидродинамики, диффузии, тепло- и электропроводности, химической кинетики в общем виде еще предстоит. При этом возможно, в ряде случаев придется перейти от задач ВП к многоэкстремальным задачам вогнутого программирования. Неизбежно возникнут и сложные проблемы физической постановки задач.

Теоретическая и практическая актуальность равновесных описаний неравновесных процессов и связанные с созданием таких описаний принципиальные трудности позволяют надеяться на новый сулящий интересные открытия виток в развитии классической равновесной термодинамики.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Проект 05-02-16626.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пригожин И.Р. Введение в термодинамику необратимых процессов / И.Р. Пригожин. М.: Изд-во иностр. лит., 1960. 127 с.
2. Пригожин И.Р. Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур / И.Р. Пригожин, Д. Кондепуди. М.: Мир, 2002. 461 с.
3. Хакен Г. Синергетика / Г. Хакен. М.: Мир, 1980. 404 с.
4. Горбань А.Н. Обход равновесия: уравнения химической кинетики и их термодинамический анализ / А.Н. Горбань. Новосибирск: Наука, 1984. 226 с.
5. Feinberg M. On chemical kinetics of a certain class / M. Feinberg // Arch Rat. Mech. Anal. 1972. Vol. 46. № 1. P. 1-41.
6. Карно С. Размышления о движущей силе огня и машинах, способных развивать эту силу / С. Карно // Второе начало термодинамики. М.; Л.: Гостехиздат, 1934. С. 17-62.
7. Гиббс Д.В. О равновесии гетерогенных веществ / Д.В. Гиббс // Термодинамика. Статистическая механика. М.: Наука, 1982. С. 61-349.
8. Введенский А.А. Термодинамические расчеты процессов в топливной промышленности / А.А. Введенский. М.: Гостоптехиздат, 1949. 320 с.
9. Dantzig G. A linear programming approach to the chemical equilibrium problem / G. Dantzig, S. Johnson, W. White // Management Science. 1958. Vol. 5. № 1. P. 38-43.
10. White W.B. Chemical equilibrium in complex mixtures / W.B. White, S.M. Johnson, G.B. Dantzig // J. Chemical Physics. 1958. Vol. 28. P. 751-755.

11. Киреев В.А. Методы практических расчетов в термодинамике химических реакций / В.А. Киреев. М.: Химия, 1975. 536 с.
12. Карпов И.К. Моделирование природного минералообразования на ЭВМ / И.К. Карпов, А.И. Киселев, Ф.А. Летников. М.: Недра, 1976. 256 с.
13. Карпов И.К. Физико-химическое моделирование на ЭВМ в геохимии / И.К. Карпов. Новосибирск: Наука. Сиб. отд., 1981. 247 с.
14. Применение ЭВМ для термодинамических расчетов металлургических процессов / Г.Б. Синярев, М.А. Ватолин, Б.Г. Трусов, Г.К. Моисеев. М.: Наука, 1982. 263 с.
15. Термодинамические исследования процессов переработки и сжигания углей: сб. науч. трудов. М.: ЭНИН, 1984. 154 с.
16. Прикладная химическая термодинамика: Модели и расчеты. М.: Мир, 1988. 255 с.
17. Термодинамическое моделирование в геологии: минералы, флюиды и расплавы. М.: Мир, 1992. 534 с.
18. Каганович Б.М. Моделирование термодинамических процессов / Б.М. Каганович, С.П. Филиппов, Е.Г. Анциферов. Новосибирск: Наука, 1993. 101 с.
19. Каганович Б.М. Равновесная термодинамика и математическое программирование / Б.М. Каганович, С.П. Филиппов. Новосибирск: Наука, 1995. 236 с.
20. Горбань А.Н. Термодинамические равновесия и экстремумы: анализ областей достижимости и частных равновесий в физико-химических и технических системах / А.Н. Горбань, Б.М. Каганович, С.П. Филиппов. Новосибирск: Наука, 2001. 296 с.
21. Об осуществимости равновесий в процессах преобразования вещества и энергии / Б.М. Каганович, С.П. Филиппов, В.А. Шаманский, И.А. Ширкалин // Энергетика. 2004. № 5. С. 123-131.
22. Каганович Б.М. Анализ осуществимости равновесий в многокомпонентных и многофазных средах / Б.М. Каганович, В.А. Шаманский, И.А. Ширкалин // Материалы XVII сессии Международной школы по моделям механики сплошной среды. Казань: Изд-во Казан. математического общества. 2004. С. 136-143.
23. Описание неравновесных процессов в энергетических задачах методами равновесной термодинамики / Б.М. Каганович, А.В. Кейко, В.А. Шаманский, И.А. Ширкалин // Известия РАН. Энергетика. 2006. № 3. С. 64-75.
24. Thermodynamic Equilibria and Extrema Analysis of Attainability Regions and Partial Equilibria / A.N. Gorban, B.M. Kaganovich, S.P. Filippov et al. Springer, 2006. 305 p.
25. Каганович Б.М. Термодинамические исследования горения топлив, связанные с использованием газотурбинных технологий в малой энергетике / Б.М. Каганович, А.В. Кейко, В.А. Шаманский. Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2006. 37 с. Препринт № 6.
26. Больцман Л. О связи между вторым началом механической теории теплоты и теорией вероятностей в теоремах о тепловом равновесии / Л. Больцман // Избр. тр. М.: Наука, 1984. С. 190-235.
27. Kaganovich B.M. Studies of the environmental pollution using thermodynamic models / B.M. Kaganovich, S.P. Filippov, E.G. Antsiferov // Int. J. of Energy, Environment, Economics. 1992. Vol. 2. № 1. P. 7-13.
28. Keiko A.V. Thermodynamic analysis of secondary pollution of the atmosphere / A.V. Keiko, S.P. Filippov, B.M. Kaganovich // Int. J. of Energy, Environment, Economics. 1997. Vol. 4. № 4. P. 247-260.
29. Filippov S.P. Thermodynamic modelling of nitrogen oxides formation during coal combustion / S.P. Filippov, B.M. Kaganovich, P.P. Pavlov / Int. J. of Energy, Environment, Economics. 1997. Vol. 6. № 1. P. 47-65.
30. Зельдович Я.Б. Кинетика химических реакций в пламенах / Я.Б. Зельдович // Теория горения и взрыва. М.: Наука, 1981. С. 150-184.

Каганович Борис Моисеевич –

доктор технических наук, профессор
Института систем энергетики (ИСЭМ) СО РАН, г. Иркутск

Кейко Александр Владимирович –

кандидат технических наук, заведующий отделом
Института систем энергетики (ИСЭМ) СО РАН, г. Иркутск

Филиппов Сергей Петрович –

член-корреспондент РАН, доктор технических наук, заместитель директора
Института энергетических исследований РАН, г. Москва

Шаманский Виталий Алексеевич –

кандидат химических наук, старший научный сотрудник
Института систем энергетики (ИСЭМ) СО РАН, г. Иркутск

Статья поступила в редакцию 18.06.07, принята к опубликованию 05.12.07

УДК 697.34.

А.И. Андрющенко, Ю.Е. Николаев

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕПЛОФИКАЦИИ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ
И ФАКТОРЫ, ЕЕ ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ**

Произведен анализ причин снижения эффективности теплофикации в последние десятилетия и показаны пути ее повышения для каждой конкретной условий размещения и работы проектируемых ТЭЦ. Рекомендуются к внедрению комбинированные системы, сочетающие однотрубные и двухтрубные сети при централизованном теплоснабжении, и системы теплоисточников непосредственно у потребителя.

A.I. Andrjushchenko, Yu.E. Nikolaev

**EFFICIENCY OF CENTRAL HEATING IN MODERN CONDITIONS
AND FACTORS OF ITS DETERMINATION**

The analysis of the reasons of decrease in efficiency of central heating during the last decades and the ways of its increase for each concrete condition of accommodation and work of designed thermal power stations is presented here. The combined systems combining one-trumpet and two-trumpet heat supply systems at the centralized heat supply are recommended for introduction and systems of heat sources directly at a consumer.

Многочисленный опыт централизованного теплоснабжения на базе комбинированной выработки тепловой и электрической энергии показывает, что ее термодинамическая и технико-экономическая эффективность является функцией многих факторов как положитель-

ных, так и отрицательных, к тому же влияющих друг на друга. Этим и объясняется тот факт, что в современных условиях теплофикация не всегда обеспечивает положительный эффект [1]. Важными факторами, которые определяли высокую экономическую эффективность теплофикации в первые десятилетия ее успешного применения (30-40-е годы XX в.), являлись:

– низкий КПД тепловых электростанций конденсационного типа (25-30%), что обеспечивало до 40% экономии топлива в системе централизованного энергоснабжения городов и предприятий;

– недостаток в стране добываемого топлива, его низкое качество, высвобождение рабочей силы для бурного строительства новых промышленных предприятий и т.п.

Эти условия в последние 15-20 лет значительно изменились. Прежде всего, в стране открыты и введены в эксплуатацию месторождения высококачественного относительно дешевого топлива, в частности природный газ, отпускаемый электростанциям почти вдвое дешевле, чем каменный уголь. Изношенность оборудования действующих ТЭЦ и отсутствие в последние 20 лет модернизации теплофикационных систем, большие потери в тепловых сетях, широкое применение парогазовых установок без конденсационной выработки электрической энергии с КПД 52-56% и теплоты в котельных с КПД 90-95%, приводят к снижению экономии топлива от комбинированной выработки энергии почти в 2 раза. Имеются определенные ошибки при тарификации отпускаемых потребителям электрической энергии и теплоты, а также злоупотребления. В частности эта «система» построена таким образом, что действующим ТЭЦ выгодно не снижение тепловых потерь в сетях, а их рост, поскольку это увеличивает количество электроэнергии, вырабатываемое комбинированным способом. Цена вырабатываемой продукции на таких ТЭЦ определяется по фактическим затратам, что не стимулирует какое-либо совершенствование эксплуатируемой системы. Этим можно объяснить нежелание соответствующих организаций дальше внедрять положительный опыт модернизации теплоснабжающих систем и финансировать научную работу по совершенствованию систем энергоснабжения. Изменились и социальные условия жизни людей в нашей стране. Если в 30-х годах прошлого столетия одной из главных задач теплофикации было высвобождение рабочей силы, занятой в мелких отопительных котельных, эксплуатируемых к тому же на твердом топливе, то в настоящее время, когда в стране появилась значительная безработица, задача стала обратной. Надо не уменьшать, а всемерно увеличивать число рабочих мест. Определенное влияние оказывает и деградация всей нашей промышленности, которая проявляется в сокращении выпуска продукции, репрофилировании предприятий. Изменилась и экологическая обстановка в городах в связи со значительным ростом автомобилей, выбрасывающих в атмосферу массу опасных для человека выбросов. В этих условиях стало экономичнее удалять новые ТЭЦ на большие расстояния от городов, где затраты на очистку выхлопных газов требуются значительно меньшие, чем в городах с высокой фоновой концентрацией загрязняющих веществ [2]. Этому способствует создание новых коррозионно-стойких материалов для изготовления трубопроводов, снижающих капитальную составляющую тепловых сетей (из расчета на период их эксплуатации до 50 лет) почти на «порядок».

Надо объективно учитывать и тот факт, что благодаря возможности широкого использования природного газа в отопительных котельных и их полной автоматизации децентрализация теплоснабжения стала более выгодной.

Таким образом, в новых экономических условиях целесообразность дальнейшего развития и широкого применения теплофикации не стала однозначной. Эффект от теплофикации стал сложной функцией многих факторов, зависящих, как от местных, так и от общегосударственных интересов. В общем случае эта функция может быть представлена в виде зависимости

$$\Delta B_{эк} = \varphi(\eta_{э}^{кэс}; \eta_{ком}; y_{э}^{ТЭЦ}; K_{ит}^{ТЭЦ}; \Delta B_{ком}), \quad (1)$$

где $\Delta B_{эк}$ – экономия топлива и его качества с учетом того, что теплофикация уменьшает расход низкосортного топлива на загородных КЭС и увеличивает количество высококачественного топлива на ТЭЦ, расположенных в городе; $\eta_э^{КЭС}$, $\eta_{кот}$ – электрический КПД замещающей КЭС и тепловой КПД отопительной котельной; $y_э^{ТЭЦ}$, $K_{ум}^{ТЭЦ}$ – удельная выработка электроэнергии на тепловом потреблении и коэффициент использования теплоты топлива на ТЭЦ; $\Delta B_{мон}$ – суммарное приращение потерь топлива и электроэнергии.

При уменьшении экономии топлива от теплофикации при повышении КПД КЭС и отопительных котельных все же необходимо указать на существование предельного значения $\Delta B_{эк}$, ниже которого она в идеальной системе быть не может. Ее величину можно рассчитать по формуле

$$\Delta B_{прео} = B_э^{мин} + B_{кот}^{мин} - B_{тэц}^{мин}, \quad (2)$$

где $B_э$, $B_{кот}^{мин}$, $B_{тэц}^{мин}$ – величины расхода топлива на КЭС, отопительной котельной и ТЭЦ, рассчитанные при максимально возможных КПД. В частности, при электрическом и тепловом КПД КЭС и котельной, равных 1, $K_{ум}^{ТЭЦ} = 1$; $y_э^{ТЭЦ} = \max$, температурах окружающей среды и подвода теплоты ($T_о = 300K$ и $T_1^{max} = 1800K$) предельная экономия топлива не может быть ниже 7,5% от ее расхода при раздельном энергоснабжении. Однако, если в такой теплофикационной системе будет затрачено на перекачку сетевой воды и общестанционные нужды свыше 5% выработанной электроэнергии, то осуществление теплофикации в этих условиях приведет только к росту капиталовложений без экономии топлива, т.е. будет убыточной. На величину этого ущерба будет влиять, кроме дальности теплоснабжения, еще и разница в стоимости расходуемого топлива, как на ТЭЦ, так и на загородной КЭС. Так, если на ТЭЦ будет расходоваться более дорогое, а на КЭС – более дешевое (местное) топливо, то ущерб от этого в рублях составит:

$$\Delta R_{эк}^{мон} = C_{мон}^{КЭС} \cdot \Delta B_{КЭС} - C_{мон}^{гор} (\Delta B_{ТЭЦ} - \Delta B_{КОТ}), \quad (3)$$

где $C_m^{КЭС}$ и $C_{мон}^{гор}$ – стоимости топлива (на месте потребления), сжигаемого на ТЭЦ и в городе; $\Delta B_{КЭС}$, $\Delta B_{ТЭЦ}$ – приращение расходов топлива на КЭС и ТЭЦ; $\Delta B_{КОТ}$ – уменьшение расхода топлива в отопительных котельных города.

При этом следует иметь в виду, что в нашей стране сложилось ненормальное положение, когда цена самого высококачественного топлива (природного газа) оказывается намного дешевле, чем низкосортный уголь. Большая разница в ценах на экспортируемый природный газ и расходуемый внутри страны приносит значительную потерю поступающей валюты.

Значительное влияние на эффективность теплофикации оказывают приращения тепловых потерь, как в системе транспорта теплоты, так и потерь в отапливаемых зданиях. Соответственно этому необходимая выработка теплоты на ТЭЦ оказывается намного большей, чем в отопительной котельной. Определенную роль здесь играет и установленный [3] факт меньшего влияния указанных потерь на действительный перерасход топлива в системе энергоснабжения. При одинаковых параметрах теплоснабжения указанные потери одинаковы при теплоснабжении от ТЭЦ и районной котельной, однако в теплофикационной системе они вызывают почти в два раза меньший перерасход топлива. Это объясняется тем, что потери отработавшей низкопотенциальной теплоты на ТЭЦ вызывают меньший перерасход теплоты топлива в системе отопления, чем при теплоснабжении от котельной, и частично компенсируются уменьшением конденсационной выработки электроэнергии на КЭС. Особое влияние оказывают фоновая концентрация вредных выбросов в городе и величина выбросов на проектируемой ТЭЦ. В отдельных случаях оказывается целесообразным переводить отопление города полностью на электроэнергию. Горячее водоснабжение при этом можно осуществлять от загородной ТЭЦ.

Одной из схем теплофикации является использование тепловых выбросов имеющихся в городе предприятий. Это может осуществляться как с помощью тепловых насосов, так и систем аккумуляторов, нагревающих подпиточную воду для теплосети.

В Европейской части России, где имеется разветвленная сеть газопроводов и газоперекачивающих станций (ГПС) с приводом компрессоров от газовых турбин, имеется большое количество продуктов сгорания. Надстраивать такие ГТУ малой мощности паротурбинными установками не всегда рекомендуется. Более просто для ГПС, размещенных относительно недалеко от городов, использовать их как теплоисточник для нагрева воды и направлять ее в городские системы водоснабжения. Важно здесь отметить, что все тепловые сети за городом будут однотрубными, при низкой температуре воды и соответственно низком давлении, что значительно снижает расход электроэнергии на ее перекачку и тепловые потери в сетях.

Определенное значение для решения вопроса о целесообразности теплофикации имеют годовой температурный график наружного воздуха, продолжительность стояния низких температур. Хотя их изменения за последние десятки лет незначительны и за сотни лет небольшие, все-таки их надо учитывать, поскольку изменилась эффективность пиковых покрытий максимума зимней нагрузки. Здесь важно определять место расположения пиковых теплоисточников, либо на ТЭЦ, либо у потребителей. В случае размещения ТЭЦ за городом при однотрубной сети, пиковые установки, покрывающие всю отопительную нагрузку, должны размещаться непосредственно у потребителей.

Из приведенного следует, что в нынешних условиях возможны следующие варианты схем транспорта теплоты от ТЭЦ:

- традиционная двухтрубная сеть с прямым водоразбором и закрытая при размещении ТЭЦ как внутри города, так и вне его (рис. 1);
- однотрубная магистральная сеть и двухтрубная внутригородская сеть от районных котельных (рис. 2);
- полностью однотрубная сеть горячего водоснабжения с устройством двухтрубных внутриквартальных отопительных сетей, питаемых от независимых теплоисточников (рис. 3).

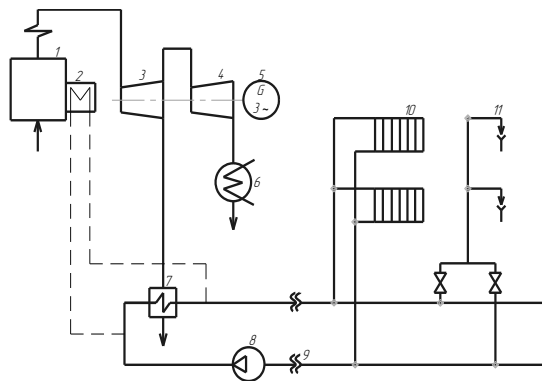


Рис. 1. Традиционная схема теплоснабжения от ТЭЦ с прямым водоразбором:

- 1 – паровой котел; 2 – теплоутилизатор; 3, 4 – паровые турбины высокого и низкого давления;
- 5 – электрогенератор; 6 – конденсатор; 7 – сетевой подогреватель; 8 – насос;
- 9 – теплосеть; 10 – отопительные приборы; 11-водоразборный кран

Наши расчеты показывают, что каждая из этих схем имеет право на существование и определяется заданными условиями работы будущей ТЭЦ. Главными факторами здесь являются:

- относительная экономичность конденсационных ТЭС, наличие и цена высококачественного топлива (природного газа) для его сжигания на городских ТЭЦ;
- фоновая концентрация вредных веществ в атмосфере города;
- дальность расположения источников питьевой воды и степень сложности ее очистки на загородных ТЭЦ;
- наличие нетрадиционных (в том числе вторичных) источников теплоты.

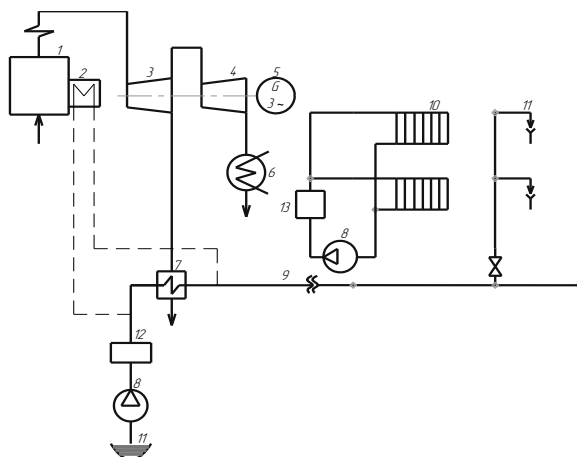


Рис. 2. Комбинированная система дальнего низкотемпературного теплоснабжения

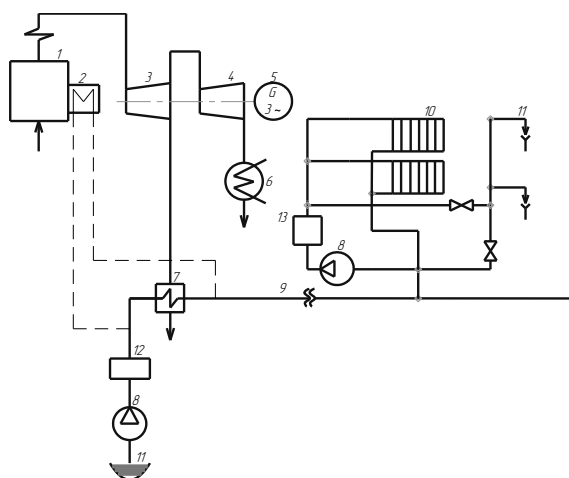


Рис. 3. Однотрубная система дальнего теплоснабжения с районными котельными (обозначения см. рис. 1, 2)

Выводы

1. Теплофикация может обеспечивать значительный экономический эффект еще многие годы, если в каждом отдельном случае будут учитываться все факторы, ее определяющие. При этом оптимальные схемы, параметры теплоносителей и транспорта теплоты могут значительно отличаться друг от друга.

2. Восстановление устаревших теплофикационных систем может привести не к экономии, а к экономическому ущербу.

3. Во всех случаях решающее влияние должна оказывать экология.

ЛИТЕРАТУРА

1. Доброхотов В.И. Теплофикация: проблемы и возможности реализации в современных условиях / В.И. Доброхотов, Ю.А. Зейгарник // Теплоэнергетика. 2007. № 1. С. 9-10.

2. Андриященко А.И. Экологическая и экономическая эффективность замены устаревшего оборудования ТЭЦ на газотурбинное и парогазовое / А.И. Андриященко, Ю.Е. Николаев // Промышленная энергетика. 2006. № 7. С. 2-6.

3. Николаев Ю.Е. Повышение эффективности систем теплофикации с учетом взаимного влияния источника и тепловых сетей / Ю.Е. Николаев, А.И. Андриященко // Проблемы теплофикации. Опыт и перспективы: сб. докл. науч.-техн. конф. М.: РАО ЕЭС, 2006. С. 51-58.

Андриященко Анатолий Иванович –

доктор технических наук, профессор кафедры «Теплоэнергетика»
Саратовского государственного технического университета

Николаев Юрий Евгеньевич –

доктор технических наук, профессор кафедры «Теплоэнергетика»
Саратовского государственного технического университета

Статья поступила в редакцию 05.06.07, принята к опубликованию 05.12.07

УДК 536

В.М. Бродянский

О ТЕРМИНОЛОГИЧЕСКОЙ БАЗЕ СОВРЕМЕННОЙ ИНЖЕНЕРНОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ

Рассмотрено состояние терминологии технической термодинамики. Показано, что терминология отстает от требований современной науки, что может тормозить ее дальнейшее развитие. Предложены возможные направления модернизации термодинамической терминологии, выделены три группы терминов, требующих модернизации в соответствии с современным уровнем развития науки и техники.

V.M. Brodjansky

TERMINOLOGICAL BASE OF THE MODERN ENGINEERING THERMODINAMICS

The condition of the terminology of technical thermodynamics is presented here. It is shown that the terminology remains behind from the demands of the

modern science, which may influence on its further development. The ways of possible directions of modernization of thermodynamics terminology in connection with the modern level of development of science and technology.

Термодинамика имеет развитую терминологию, включающую основные понятия и многочисленные приложения. Однако в ней, как и в каждой науке, по мере развития возникает необходимость в обновлении терминологического аппарата – устранение устаревших и неточных терминов и введение новых, соответствующих современному уровню. Это происходит в отечественной и иностранной (главным образом англоязычной и немецкой) литературе.

Нельзя сказать, что разработке такого терминологического аппарата в научной литературе уделяется недостаточное внимание. В нашей стране, кроме многочисленных термодинамических монографий, статей и учебников, где в числе прочих рассмотрены вопросы терминологии, Академией наук были в 1952, 1973, 1980 и 1984 гг. изданы специальные сборники определений «Термодинамика», в которых даны основные понятия, термины и буквенные обозначения величин. Они сыграли положительную роль в развитии и упорядочении терминологической базы термодинамики [2].

Аналогичное полезное влияние оказали и сборники терминов: «Теория теплообмена», вып. 83 и «Энергетический баланс», вып. 84, изданные в 1973 г. В дальнейшем такие сборники не выпускались.

В последнее время возникло некоторое отставание терминологической базы термодинамики от требований, выдвигаемых в связи с дальнейшим развитием науки в конце XX [1] и в начале XXI веков.

Это касается общих и частных понятий, связанных с различными процессами и системами. Естественно, все они не могут и не должны входить в официальный сборник определений; тем не менее их содержание и область корректного использования должны диктоваться как дальнейшим развитием самой термодинамики, так и расширением областей ее применения.

В связи с этим полезно проанализировать сложившуюся ситуацию и наметить возможные направления модернизации термодинамической терминологии.

Вопросы, возникающие в связи с описанной ситуацией, целесообразно разделить на три группы в зависимости от назначения рассматриваемых терминов.

1. Термодинамическая система и ее связи с окружением. Контрольная поверхность системы.
2. Коэффициенты полезного действия (КПД), коэффициенты эффективности (качества).
3. Отдельные некорректные термины.

1. Термодинамическая система и ее связи с окружением. Контрольная поверхность системы

В сборнике определений «Термодинамика» (вып. 103, 1984 г.) в разделе 1 даны достаточно полные определения 1-9, относящиеся к термодинамической системе и ее разновидностям. Однако в современных условиях наблюдается явная и вполне объяснимая тенденция рассматривать в ряде случаев систему и ее окружение в едином комплексе. Поэтому приходится уделять все большее внимание внешним условиям работы системы, которые оказывают существенное влияние на результаты ее действия.

Прежде всего необходимо выделить и определить понятие «окружающая среда», о которой (без объяснения этого термина) упоминается только в п. 115 в пояснении к термину «эксергия». Между тем термин «окружающая среда» достаточно содержателен, и его строгое определение совершенно необходимо. За границами системы в ее окружении могут происходить процессы, влияние которых на систему современная термодинамика не может не учитывать.

Окружающая среда может быть в реальных условиях равновесной и неравновесной, характеризоваться как постоянными, так и переменными параметрами; все это так или иначе может сказываться на результатах действия системы и оценке как ее термодинамических параметров, так и протекающих в ней процессов.

В этой связи представляется целесообразным ввести и узаконить наряду с понятием «эксергия» [2] строгое определение понятия «окружающая среда» в следующей редакции: «Окружающая среда (англ. environment) – равновесная часть окружения термодинамической системы, интенсивные параметры которой не меняются при взаимодействии с системой; характеризуется нулевой эксергией».

Практика показала, что этого недостаточно; во многих случаях необходимо выйти за пределы системы и рассмотреть энергетическую ситуацию в ее окружении. Поэтому наряду с понятием «окружающая среда», характеризующим равновесную часть окружения системы, все чаще используется более широкое понятие – «окружение системы», включающее все взаимодействующие с ней внешние объекты. Необходимость появления этого понятия связана с тем, что вне контрольной поверхности системы существуют и (в общем случае) взаимодействуют с ней не только источники работы W и тепла Q , но и потоки вещества, отличные по своим параметрам и химическому составу от равновесной окружающей среды. Потоки вещества, пересекающие контрольную поверхность системы, должны во многих случаях характеризоваться не только энтальпией, но и химическим составом, определяемым их «родословной» – источниками в окружении системы. Без этого определение их эксергии, следовательно, составление и анализ как энергетического, так и эксергетического балансов системы, будут неполными.

Это значит, что более широкое понятие «окружение системы» (англ. surrounding) тоже необходимо узаконить. Оно должно включать наряду с равновесной окружающей средой все элементы внешних объектов, которые в каждом случае могут взаимодействовать с системой (например, топливо, руда, минералы, элементы атмосферы, излучение и т.д.).

В случае необходимости эксергия каждого из них должна рассчитываться по соответствующей методике [3, 4]. В ряде случаев и термодинамическую ценность элементов биосферы (например, древесины и других органических продуктов) следует учитывать через эксергию [4].

Таким образом, понятие «окружение системы» (surrounding) – совокупность равновесной окружающей среды и всех находящихся в ней внешних объектов, взаимодействующих с рассматриваемой системой, закономерно войдет в комплекс базовых терминов термодинамики.

2. Коэффициенты полезного действия и коэффициенты эффективности

Одна из величайших заслуг термодинамики – введение в науку и практику понятия коэффициента полезного действия – КПД.

Следует отметить, что этот термин прошел длительную эволюцию и в последнее время стал употребляться в обыденной жизни, за пределами науки. Кто только не использует этот термин: коэффициент полезного действия? Все – педагоги, писатели, биологи, психологи, экономисты, политики, инженеры.

Бороться с этим явлением бесполезно; научные термины часто проникают в бытовой язык и там «размываются», теряя строгую определенность. Однако, обратный процесс очень опасен; очевидно, что в сфере науки необходимо исключить любые неточности в определении терминов, и в особенности тех, которые используются за ее пределами.

Применительно к самому «размытому» из них – термину КПД полезно вспомнить краткую историю его возникновения и трактовки.

Идея КПД появилась впервые от понятия «*effet utile*», которое было введено в науку в конце XVIII века для оценки эффективности механических и гидравлических машин фран-

цузскими учеными – С. Карно, Л. Навье и Ж. Понселе. Метод оценки был элегантно простым и однозначным: КПД (пользуясь современным термином) определялся отношением полученной работы W_1 к затраченной W_2 . До этого соответствующее понятие использовал еще Леонардо да Винчи.

Для механических и гидравлических машин такое определение было (и осталось) вполне строгим и однозначным, что естественно: сопоставляемые величины качественно однородны и легко измеряются.

Обе величины работы W_1 и W_2 определялись просто и однозначно. Разность $W_2 - W_1$ показывала величину потери работы (от трения, утечек и т.д.).

С появлением паровой машины ситуация с определением КПД усложнилась. Надо было сравнивать качественно различные величины: на входе – расход топлива, на выходе – механическую работу. Кроме того, тогда было вообще неясно, сколько работы можно получить (т.е., говоря словами С. Карно, «ограничена или не ограничена движущая сила тепла»). Когда С. Карно установил определенно, что она имеет пределы, связанные с верхней и нижней температурами, перед ним возник вопрос о том, как определить, насколько результат работы реальной паровой машины близок к этому пределу. Механика тут была бессильна: результат действия машины, работу, нужно было сопоставить с теплом, величиной совершенно иной качественной природы.

С. Карно на основе своей работы нашел гениально простое и безупречное по логике решение [5]. Он сопоставил работу W_p , производимую реальной машиной, с той $W_{ид}$, которую могла бы дать идеальная машина в тех же температурных условиях. Пользуясь введенным им идеальным циклом, эту работу можно было вычислить, что он и сделал, получив для самой лучшей из тогдашних паровых машин значение

$$\text{КПД} = W_p / W_{ид} = 5\% .$$

Это было первое (еще до открытия первого закона термодинамики) строгое, безупречное и с современной точки зрения определение КПД теплового двигателя. Более того, в дальнейшем стало понятно, что оно имеет универсальный характер и подходит к любому процессу преобразования энергии, независимо от ее форм.

Важно отметить, что С. Карно при этом обобщении сохранил в неприкосновенности классический принцип определения КПД, предложенный французскими механиками. Далее с понятием КПД все сложилось иначе, его развитие шло не вперед, а «вбок»; первоначальный четкий смысл был утерян.

Несмотря на появление понятия «теплотворная способность топлива», эффективность тепловых машин продолжали определять по традиции, идущей от Уатта – по отношению полученной работы к затрате топлива. Разница была только в том, что в знаменателе формулы для определения эффективности стали подставлять не вес израсходованного топлива, а его теплотворную способность. Здесь сопоставляются два энергетических показателя – израсходованное тепло Q и полученная работа W .

Так появился и действует термический коэффициент полезного действия (№ 112 в [2]). В нем, в отличие от КПД по Карно, сопоставляются две качественно различные величины: тепло и работа. Пока этот коэффициент применялся только для оценки тепловых двигателей, работающих на основе сжигания органического топлива, такая подмена отношения двух работ (идеальной и реальной) на отношение реальной работы к теплу мало влияла на величину показателя эффективности.

Теплотворная способность топлива близка к той максимальной работе («движущей силе тепла», по Карно), которая может быть получена при его окислении в идеальном процессе (хотя разница может превышать 10%). Однако, когда для производства работы используется тепло от источников с относительно низкой температурой (например, атомных и геотермальных), то в силу закона, установленного Карно, его «движущая сила» становится

намного меньше. Термический КПД этого не учитывает и его численное значение для таких станций оказывается существенно ниже, чем у станции, работающей на органическом топливе (при том же или более высоком уровне технического совершенства), т.е. этот КПД, в отличие от КПД Карно, дает искаженную информацию.

Дальше в процессе «размывания» понятия КПД появились, кроме термического, и многие другие КПД (эффективный, тепловой, относительный, термодинамический и др.); каждый из них определяет эту величину по-своему.

В результате использования различных вариантов таких КПД, в которые подставлялись без уточнения любые виды энергии, как затраченной, так и полученной (электроэнергия, тепло различного потенциала, химическая энергия (энергия Гиббса) и т.д.), «семейство» КПД превратилось в беспорядочную толпу. Ситуация оказалась очень удобной для выгодных «хозяйственных» умозаключений. Например, КПД ТЭЦ (теплоэлектроцентрали), определяемые по распространенной формуле: $\eta = (W + Q_m)/Q_1$, в которой на равных складываются «полученные для пользы дела» электроэнергия W и тепло Q , низкого потенциала, отнесенные к высокопотенциальной теплоте сгорания топлива Q , оказались значительно выше (до 80%), чем у КЭС (конденсационная электростанция) (38-45%), работающих на таких же параметрах пара. На основе этого, поскольку доля ТЭЦ в нашей стране больше, чем в других странах (выработка электроэнергии на тепловом потреблении – 20%), было показано, что удельный расход топлива на 1 кВт·ч у нас ниже, чем в других странах [6].

По этим же представлениям КПД котельной (до 82%) намного выше, чем у самой совершенной КЭС. Но еще более удивительный КПД получается у топливных элементов (ТЭ): например, у угольно-кислородного ТЭ КПД превышает 120%! Такие псевдо-КПД используются в серьезных работах, анализируют и комментируют, включают в статистические данные и основывают на них рекомендации по развитию энергетики.

Жертвой непонимания причин появления таких странных значений КПД стал даже автор статьи на эту тему в таком авторитетном издании, как Большая советская энциклопедия (БСЭ), попытавшийся объяснить читателям смысл этого понятия. Вначале он справедливо утверждает, что КПД не должен быть больше единицы. Но в дальнейшем возникает необходимость объяснить, откуда на практике берутся КПД больше единицы. Не имея возможности установить причину этого, он находит выход из противоречия, вводя странное представление о том, что бывают как «истинные» КПД, так и «другие». Он пишет: «Хотя истинный КПД установки меньше единицы, рассмотренный КПД может оказаться больше единицы». Мысль о том, что рассмотренный «другой» «неистинный» КПД получился из-за нарушения завета Карно – соотносить качественно однородные величины «движущей силы», т.е. работы, и что «неистинный» КПД не имеет права носить это звание, у автора не возникла.

Эта путаница с КПД вызвала недоумение прежде всего у научной общественности, далекой от теплоэнергетики. В этом отношении характерна статья акад. А.А. Маркевича [8]. Он писал: «Методические трудности здесь носят фундаментальный характер. Главная из них состоит в определении того, что именно следует рассматривать в качестве полезного действия данного устройства, и подыскания количественной меры этого полезного действия».

Выход был найден введением понятия эксергии [3, 4], обобщившего идею Карно об универсальной мере – «движущей силе» для всех форм энергии. Он позволил применить к любым видам энергии единую количественную характеристику, определяющую ее работоспособность в данных условиях окружающей среды, т.е. создалась возможность дать четкое определение КПД. Такой эксергетический КПД (Exergy Efficiency или Carnot Efficiency) все в большей мере используется как в теоретических работах, так и на практике в энергетике и других, связанных с ней, отраслях.

Тем не менее, без уточнений часто используются под названием КПД самые разнообразные показатели термодинамической эффективности, в которых «принцип Карно» – качественная однородность сопоставляемых величин – не соблюдается.

В настоящее время необходимо узаконить термодинамически строгое универсальное определение КПД, что не должно исключать все другие коэффициенты, определяющие эффективность различных преобразований энергии; однако четкое терминологическое различие между ними установить необходимо.

С этой целью вместо «термического коэффициента полезного действия термодинамического цикла» (термин 112 [2]) необходимо ввести два фундаментальных понятия.

Эксергетический КПД η_e системы преобразования вещества и энергии (Exergy Efficiency) – отношение суммарной полезной эксергии на выходе системы к ее затрате на входе системы:

$$\eta = \Sigma E'' / E'.$$

Это определение справедливо для любой системы преобразования вещества и (или) энергии, в которой осуществляется как замкнутый цикл, так и разомкнутый процесс, а также для любой ее части.

Эксергетическая потеря (потеря эксергии) ΣD – разность значений суммарной эксергии $\Sigma E''$ на входе в систему (или ее часть) или на выходе из нее $\Sigma E''$:

$$\Sigma D = \Sigma E'' - \Sigma E''.$$

Использование этих понятий дает возможность получить полную количественную картину преобразования вещества и энергии в технической системе любой сложности [3, 4] и в отдельном ее элементе.

Такой обобщенный подход не исключает использования частных коэффициентов, которые показывают степень приближения процессов к принимаемому в рассматриваемом случае за образец. Количество таких коэффициентов очень велико (в отечественной термодинамической литературе больше двух десятков). Среди них есть и такие, которые достаточно наглядно показывают качество отдельных процессов (например, сжатия и расширения – изотермический и адиабатный).

Однако большинство терминов, относящихся к системам, не дает без сложных дополнительных пояснений (иногда и с ними) наглядной информации об их термодинамическом качестве.

Разумное сокращение числа таких коэффициентов облегчит и изложение термодинамики, и усвоение существа дела, необходимого для практики.

3. Термины, относящиеся к переносу энергии и энергетическим балансам

Большую группу терминов, не связанных непосредственно с термодинамической эффективностью систем и отдельных процессов, составляют те, которые характеризуют термодинамические свойства вещества и процессы переноса энергии. Многие из них связаны с вещественной теорией тепла, некоторые были вытеснены новыми (например, «теплосодержание» было заменено на «энтальпию»). Однако дезориентирующие термины: теплоемкость (теплосодержание), скрытая теплота, теплопадение – остаются, хотя физическую сущность процессов они не только не отражают, но соответствуют ушедшим в прошлое представлениям вещественной теории тепла.

Несколько иное, но научно некорректное содержание имеет термин «теплообмен». Как известно, во всех случаях, кроме лучистого теплообмена, никакого обмена энергией нет, есть только передача энергии (а не тепла) в одном направлении.

Если в этих случаях при замене терминов нужно преодолевать языковые трудности, то в других аналогичных ситуациях таких затруднений не возникает, нужно только использовать верные слова русского языка.

Примером могут служить совершенно некорректные термины, относящиеся к тем случаям, где слово «источник» используется в смысле, противоположном его значению в русском языке.

«Источником» во многих руководствах называют не только тот объект, который снабжает систему энергией (или эксергией), но и тот, куда энергия (или эксергия) сбрасывается. Это делается вопреки логике, называть «источником» (независимо от того, верхний он или нижний по температуре) тот объект, куда сбрасывается что-либо отработанное и в данной системе ненужное, по крайней мере, странно. Этому способствует неточная формулировка термина «источник теплоты» (№ 111) в [2], где к «источникам теплоты» относится «система, способная отдавать или воспринимать теплоту и характеризующаяся определенной неизменной температурой».

Здесь содержится два спорных положения. – «Отдавать или воспринимать тепло». Источник, который не отдает, а воспринимает – это никак не источник (скорее приемник). – Требование «неизменной температуры» устарело – оно излишне. На практике и источники, и приемники тепла могут менять в ходе процесса свою температуру (и часто меняют).

В русском языке есть для всех этих случаев вполне корректный термин – «приемник». Тогда тот объект, который отдает тепло, будет «теплоотдатчик», а тот, который принимает – «теплоприемник», и все становится на свое место. Эти примеры можно продолжить.

Нельзя не учитывать, что термодинамика занимает ведущее место в теоретической базе энергетики, а ее термины и их производные широко используются. Поэтому все неточные и ошибочные термодинамические термины оказывают негативное воздействие на всю теплоэнергетику.

Ошибки и неточности в терминологии могут привести (и приводят) к ошибкам в понимании (что часто происходит), а ошибки в понимании – к неправильным действиям и практическим решениям; правильные термины, напротив, дают мыслям нужное направление.

Заключение. Ситуация, сложившаяся в последнее время с термодинамической терминологией, аналогична той, которая характерна как для теории теплопередачи (Термодинамика. Сб. определений. Теория теплообмена. Вып. 83), так и энергетического баланса (Термодинамика. Сб. определений. Энергетический баланс. Вып. 84).

Последний сборник отражает давно устаревшие взгляды на вопросы, связанные с развитием и оптимизацией энергетического баланса нашей страны; он требует существенной переработки, основанной на анализе всего нового, что появилось за прошедшие десятилетия. Эти вопросы требуют специального квалифицированного рассмотрения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бродянский В.М. Классическая термодинамика на рубеже XXI века. Состояние и перспективы развития / В.М. Бродянский // Известия РАН. Энергетика. 2001. № 5. С. 56-65.
2. Термодинамика: сб. определений. Вып. 103. М.: Наука, 1984. 34 с.
3. Szargut I. Exergy method / I. Szargut. UK: Witpress, 2005. 207 p.
4. Бродянский В.М. Эксэнергетический метод и его приложения / В.М. Бродянский, В. Фратшер. М.: Энергоиздат, 1988. 288 с.
5. Карно С. Размышления о движущей силе огня и машинах, способных развивать эту силу / С. Карно // Второе начало термодинамики. М.-Л.: ГТТИ, 1934. 38 с.
6. Бродянский В.М. По поводу дискуссии о распределении затрат на ТЭЦ / В.М. Бродянский // Теплоэнергетика. 1992. № 9. С. 17-29.
7. Бродянский В.М. Вечный двигатель прежде и теперь / В.М. Бродянский. М.: Физматлит, 2002. 202 с.
8. Маркевич А.А. Рассуждение о КПД / А.А. Маркевич // Вестник АН СССР. 1965. № 6. С. 27-33.

Бродянский Виктор Михайлович –
доктор технических наук, профессор кафедры «Криогенная техника»
Московского энергетического университета

Статья поступила в редакцию 07.06.07, принята к опубликованию 05.12.07

УДК 621.31:658.26

В.А. Эткин

ТЕРМОДИНАМИКА НА РУБЕЖЕ СТОЛЕТИЙ

Обсуждаются состояние и перспективы развития термодинамики начала XXI столетия. Отмечается возрастающая роль термодинамических концепций в естественных науках и рассматривается возможность создания на ее основе единой теории реальных процессов.

V.A. Etkin

THERMODYNAMICS ON THE BOUNDARY OF CENTURIES

The conditions and perspectives of development of thermodynamics of the beginning of the 21st century are discussed in this article. The increasing role of thermodynamic concepts in natural sciences and possibility of creation on its base the unique theory of the real processes is studied here as well.

Произошедшие в XX столетии революционные изменения в ряде областей знания (физике, астрономии, биологии, геологии и др.) дали толчок к становлению новой парадигмы естествознания, в которой термодинамические концепции будут играть, по-видимому, все возрастающую роль [1]. И дело здесь не столько в появлении ряда новых ветвей термодинамики – теории необратимых процессов [2, 3], термодинамики сред с памятью [4], релятивистской термодинамики [5], термодинамики спиновых систем [6], термодинамики при конечном времени [7], теории образцовых циклов [8], термодинамики биологических процессов [9] и т.д. – сколько в установлении совместимости с нею идей саморазвития, самоорганизации живой и неживой материи [10].

Продолжающееся проникновение термодинамического метода в пограничные области знаний оказывает благотворное влияние на многие дисциплины. Одним из достоинств этого метода всегда была возможность получения огромного множества следствий, относящихся к различным явлениям, на основе небольшого числа первичных принципов (начал), носящих характер опытных законов. Будучи последовательно феноменологическим (т.е. исходящим из опыта), этот метод позволял выявлять основные закономерности разнообразных процессов, не вскрывая их молекулярного механизма и не прибегая к модельным представлениям о строении и структуре исследуемой системы. За эти свойства классическую термодинамику издавна называли «королевой наук». Как справедливо отмечал М. Планк, «это замечательная научная система, детали которой ни по красоте, ни по блестящей законченности не уступают всей системе в целом».

«Безгипотезный» в своих основаниях и непреложный в своих следствиях характер термодинамики резко контрастирует с подавляющим большинством научных дисциплин, в которых гипотезы о строении материи и представления о «механизме» внутренних процессов на различных иерархических уровнях предшествуют составлению математической модели изучаемого явления. Отсюда – та высокая оценка, которую дал классической термодинамике А. Эйнштейн, писавший в своей научной автобиографии: «это единственная физическая теория общего содержания, относительно которой я убежден, что в рамках применимости ее основных понятий она никогда не будет опровергнута (к особому сведению принципиальных скептиков)».

Естественно поэтому стремление положить термодинамические концепции в основу построения и изложения того круга фундаментальных дисциплин, которые входят в программы отечественных вузов. Актуальность этой задачи подтверждается включением темы «Фундаментальные основы инженерных наук» в перечень важнейших исследований, поддерживаемых Российским фондом фундаментальных исследований. Шагом на этом пути было издание монографии «Термодинамика неравновесных процессов переноса и преобразования энергии» (Саратов, СГУ, 1991) и учебного пособия для технических вузов «Термокинетика» [10]. В них на основе введения времени как физического параметра в уравнения термодинамики был дан синтез трех ее направлений – технической термодинамики, теории процессов переноса (в том числе теории теплообмена) и термодинамики при конечном времени. Важнейшими результатами при этом явились последовательно термодинамическое (не требующие привлечения гипотез статистико-механического характера) обоснование всех положений теории необратимых процессов и разработка основ теории производительности энергетических установок, дополняющей классический анализ их эффективности учетом взаимосвязи мощности, экономичности и себестоимости продукции.

Предстояло сделать еще один шаг на пути к построению более общей теории, которая позволяла бы рассматривать реальные процессы переноса и преобразования любых форм энергии независимо от их принадлежности к той или иной области знания [11]. Обсуждаемый здесь вариант теории такого типа, подготовленный к изданию, мы назвали для краткости энергодинамикой¹.

1. Методологические особенности энергодинамики. Стремление сохранить в энергодинамике достоинства термодинамического метода обусловило выбор ее базовых принципов, исходя из максимально бережного отношения к классическому термодинамическому наследию. Это выражается в том, что энергодинамика базируется только на тех положениях существующей общенаучной парадигмы, которые не подлежат сомнению и воспринимаются как аксиомы. Одним из таких положений является «аксиома различимости» процессов, согласно которой существуют процессы, вызывающие особые, качественно отличимые и несводимые к другим изменения состояния. Другое исходное положение – аксиома «самоненарушимости» равновесия, согласно которой система, достигшая равновесия, самопроизвольно выйти из него не может. Еще одной аксиомой является существование энергии E как функции состояния системы. И наконец, это общенаучный «принцип соответствия», согласно которому любая теория, претендующая на более глубокое описание объективной реальности и на более широкую область применимости, чем старые, должна включать в себя последние как частный случай. Этих очевидных положений оказывается достаточно для построения единой теории процессов переноса и преобразования энергии, наследующей «безгипотезный» и междисциплинарный характер термодинамики и ее системный подход к выбору объекта исследования [12].

¹ Замена приставки «термо» на «энерго» подчеркивает, что энергодинамика изучает общие закономерности процессов переноса и преобразования любых форм энергии.

В отличие от равновесной термодинамики, объектом исследования энергодинамики является вся интересующая исследователя совокупность взаимодействующих тел или их частей, рассматриваемая как единое неравновесное целое (подобное «расширенным» системам). Такой подход стал возможным благодаря отказу от гипотезы локального равновесия и переходу от описания поведения элементов континуума к рассмотрению процессов в системе в целом подобно тому, как в механике переходят от изучения движения каждой точки твердого тела к описанию движения его как целого. Не вдаваясь в подробности, отметим, что это осуществляется путем перехода от полей плотности ρ_i каких-либо i -х экстенсивных свойств системы Θ_i (массы системы M , ее объема V , числа молей k -х компонент N_k , энтропии S , заряда области Q_e , компонент P_α импульса P ($\alpha = 1, 2, 3$) и т.п.), к моментам их распределения в системе $Z_i = \Theta_i \Delta R_i$, где R_i – радиус-вектор центра величины Θ_i . Таким образом, в энергодинамике энергия E становится функцией не только «термостатических» свойств системы Θ_i , но и моментов их распределения Z_i . Поскольку же их полные дифференциалы содержат три составляющие, энергодинамика рассматривает три независимые группы (категории) процессов перераспределения: пополнения (координаты – величины Θ_i), переноса (координаты – компоненты $\Delta R_{i\alpha}$ вектора ΔR_i) и переориентации (координаты – эйлеровы углы $\varphi_{i\alpha}$ вектора R_i). Первая из этих категорий в частном случае равновесных систем и обратимых процессов (когда единственной причиной изменения параметров Θ_i является внешний энергообмен) описывает теплообмен, работу сжатия, массообмен, диффузию k -х веществ через границы системы, ускорение системы как целого и т.п., т.е. процессы, рассматриваемые классической термодинамикой; две другие появляются в результате обобщения термодинамики на пространственно неоднородные системы. Благодаря такому расширению «пространства переменных» энергодинамика охватывает все категории процессов, связанных с переносом и преобразованием различных форм энергии. При этом энергия системы как функция ее состояния приобретает в общем случае вид $E = E(\Theta_i; R_{i\alpha}; \varphi_{i\alpha})$. Это позволяет на основе полного дифференциала энергии системы получить основное уравнение термодинамики в форме тождества:

$$dE \equiv \sum_i \Psi_i d\Theta_i - \sum_i \sum_\alpha F_{i\alpha} dR_{i\alpha} - \sum_i \sum_\alpha M_{i\alpha} d\varphi_{i\alpha}, \quad (i = 1, 2, \dots, n; \alpha = 1, 2, 3), \quad (1)$$

где $\Psi_i \equiv (\partial E / \partial \Theta_i)$ – «обобщенные потенциалы» (температура T , давление p , химический μ_k и др. потенциалы); $F_{i\alpha} \equiv -(\partial E / \partial R_{i\alpha})$ – компоненты обобщенных сил $F_i = -\Theta_i \nabla \Psi_i$ в их обычном (ньютоновском) понимании; $M_{i\alpha} \equiv -(\partial E / \partial \varphi_{i\alpha})$ – компоненты крутящих моментов $M_i = F_i \times R_i$. Фактическое число переменных Θ_i , $R_{i\alpha}$ и $\varphi_{i\alpha}$ равно числу реально протекающих в системе независимых процессов соответствующей категории.

Принципиально важно, что основное уравнение энергодинамики (1) сохраняет характер тождества независимо от того, чем вызвано изменение состояния – внешним энергообменом или внутренними самопроизвольными процессами в ней. Предотвращение возникновения термодинамических неравенств типа $dQ \neq T dS$ достигается в данном случае изменением способа классификации процессов¹.

Таким образом, математический аппарат энергодинамики также базируется на свойствах полного дифференциала энергии системы как функции ее состояния. Будучи дополненным условиями однозначности – уравнениями связи между переменными Ψ_i , $F_{i\alpha}$, $M_{i\alpha}$ и Θ_i , $R_{i\alpha}$, $\varphi_{i\alpha}$ (уравнениями состояния), а также между Ψ_i , $F_{i\alpha}$, $M_{i\alpha}$ и производными по времени от параметров Θ_i , $R_{i\alpha}$, $\varphi_{i\alpha}$ (уравнениями процесса), этот математический аппарат позволяет решать широкий круг задач, относящихся к различным дисциплинам и различным системам – открытым и закрытым (M , $N_k = \text{const}$); однокомпонентным и многокомпонентным

¹ Таковы, например, объемная деформация или теплопроцесс, состоящие в изменении объема или температуры независимо от того, чем они вызваны – работой сжатия или расширением в пустоту, теплообменом или диссипацией.

($k > 2$); простым и сложным ($i > 2$), изолированным ($E = \text{const}$) и неизолированным. Поскольку же общий вид упомянутых уравнений состояния и процесса также вытекает из теории, а знание величины входящих в них эмпирических коэффициентов требуется лишь на заключительной стадии исследования, энергодинамика и ее математический аппарат становятся не зависящими от гипотез, постулатов, соображений статистико-механического характера и модельных представлений о механизме процессов, т.е. всех тех факторов, изучение которых в других дисциплинах предшествует составлению математической модели исследуемого явления. Это обуславливает уникальность энергодинамики и позволяет сохранить в ней, несмотря на общность, основное достоинство термодинамического метода – непреложную справедливость его следствий в границах применимости указанных условий однозначности. Сохраняется и подкупающая простота математического аппарата термодинамики, который не выходит за рамки программ технических вузов.

2. Энергодинамика как синтез фундаментальных дисциплин. Известно, что для построения единой картины мира необходима теория, которая позволила бы дать единообразное описание физических, химических, биологических и тому подобных свойств и форм движения материального мира. Самые большие научные достижения прошлого были шагами к этой цели. К ним можно отнести объединение земной и небесной механики Ньютоном в XVII столетии; оптики с теорией электричества и магнетизма Максвеллом в XIX столетии; химии и атомной физики в квантовой механике XX столетия. К такого рода «объединительным» теориям можно с полным основанием отнести и энергодинамику. Благодаря сведению любых явлений к процессам переноса и преобразования энергии ее математический аппарат в форме (1) применим к явлениям любой физической природы (к любой i -й форме энергии). Благодаря этому она позволяет аналитическим путем не только вывести соотношения, отражающие основополагающие принципы целого ряда инженерных дисциплин, но и получить основные законы и уравнения, составлявшие ранее их экспериментальный фундамент. В механике это принцип наименьшего принуждения и основные законы механики Ньютона и Эйлера, включая закон тяготения Ньютона; в термодинамике – принципы эквивалентности теплоты и работы, существования и возрастания энтропии, исключенного вечного двигателя 2-го рода и недостижимости абсолютного нуля температур; в теории теплообмена – основные законы кондуктивного, конвективного и лучистого теплообмена; в гидродинамике – уравнения Навье – Стокса, Бернулли, Гюгонио и законы трения; в электродинамике – уравнения Максвелла и законы Кулона и Ома; в теории необратимых процессов – феноменологические законы Онсагера (уравнения переноса тепла, вещества, заряда и импульса в условиях наложения разнородных сил) и его соотношения взаимности; в химии – основные законы химической кинетики и т.д. Характерно, что некоторые из них (например, законы Ньютона, Кулона, Максвелла, Онсагера и др.) считались ранее не выводимыми из каких-либо первичных принципов.

Это позволяет осуществить дедуктивное изложение основ ряда инженерных дисциплин, изучаемых в вузах, наиболее лаконичным по объему понятий, строгим логически и математически наиболее прямым путем. Это делает энергодинамику ценным подспорьем на завершающей стадии подготовки магистрантов, аспирантов и инженеров-исследователей. Принципиально важно, что такой подход позволяет не только «перекинуть мостик» между отдельными дисциплинами, но и наиболее убедительным образом подтвердить единство законов материального мира. В этом отношении энергодинамику можно рассматривать как средство реализации программы объединения фундаментальных основ инженерных наук в вузах технического профиля и междисциплинарной подготовки специалистов различных профессий.

3. Энергодинамика как дальнейшее развитие термодинамического метода. Построение энергодинамики на основе математической модели, относящейся в равной мере ко всем формам энергии, не только подтвердило незыблемость принципов термодинамики в равновесных системах, но и позволило существенным образом развить термодинамический метод. Прежде всего это коснулось логической структуры термодинамики. Классическая термо-

динамика закрытых систем обходилась, как известно, двумя началами (принципами исключенного вечного двигателя первого и второго рода). С переходом к открытым системам понадобилось третье начало (принцип недостижимости абсолютного нуля температур). Позднее углубленный анализ логической структуры термодинамики в трудах К. Каратеодори (1907), Т.А. Афанасьевой-Эренфест (1926), А.А. Гухмана (1947, 1986) и их последователей привел к пониманию необходимости разделения второго начала на два независимых принципа (существования и возрастания энтропии). Дальнейшие исследования в этом направлении выявили основополагающую роль принципа «самоненарушимости» равновесия, которому стали отводить роль «общего начала термодинамики», а также принципа транзитивности равновесия, получившего название «нулевого начала термодинамики» (Гельфер, 1981). Если к этому добавить принцип взаимности Л. Онсагера, который с феноменологических позиций иногда называют «четвертым началом», то в основе современной термодинамики оказывается уже не два, а семь начал! Тем не менее выход термодинамики в каждую новую пограничную зону достигается путем ее экстраполяции за строгие рамки справедливости этих начал и сопровождается возникновением парадоксов и паралогизмов, представляющих прямую угрозу ее репутации математически строгой и логически безупречной теории. В открытых системах это проявляется в признании термодинамической неразрешимости «парадокса Гиббса» – утверждения о не зависящем от природы смешиваемых газов скачка энтропии в процессе их смешения [13] и в отрицании справедливости принципа исключенного вечного двигателя 2-го рода [14]; в релятивистской термодинамике – в утверждении достижимости в тепловых машинах с быстродвижущимся источником тепла КПД, превышающего таковой в цикле Карно [15]; в термодинамике спиновых систем – в утверждении о необходимости «инверсии» второго начала при «отрицательных абсолютных температурах» [16]; в теории необратимых процессов – в представлении о наличии «локального равновесия», несмотря на протекание в элементах континуума необратимых процессов [17]; в биологической термодинамике – в отрицательном вкладе «негаэнтропии» в скорость процессов рассеяния энергии [16] и т.д., и т.п. Как шутливо заметил по этому поводу Р. Фейнман (1968), «у нас столько прекрасных начал, ... и все-таки у нас не сходятся концы с концами!» [19].

Предложенное дедуктивное построение энергодинамики (от общего к частному) не требует разделения существующей парадигмы на какие-либо «начала» (в подражание И. Ньютону), что делает излишней экстраполяцию ее исходных принципов в последующем. В этом отношении энергодинамика следует «структурно-математическому» (в терминологии Н. Бурбаки) подходу, основная идея которого – использование всего арсенала имеющихся математических средств, относящихся к кругу решаемых задач (в данном случае к исследованию процессов переноса и преобразования энергии). В ней преобладает метод термодинамических потенциалов – характеристических функций, математические операции над которыми определяют все относящиеся к предмету исследований свойства системы. Этот метод, берущий свое начало от работ Массье и Гиббса, получил дальнейшее развитие благодаря делению энергии системы на превратимую Y и непревратимую \bar{U} (работоспособную и неработоспособную) части

$$E = Y + \bar{U} = \sum_i X_i Z_i + \sum_i \Psi_i \Theta_i, \quad (2)$$

являющиеся функцией соответственно «неравновесных» X_i, Z_i и «равновесных» Ψ_i, Θ_i параметров системы. Эти части, названные соответственно «инергией» и «анергией», обобщают понятия «свободной» $U - TS$ и «связанной» TS энергии Гельмгольца на открытые поливариантные системы. В отличие от свободной энергии и энтропии, инергию можно найти непосредственно по известным полям «термостатических» переменных Ψ_i и Θ_i и притом не только для системы в целом, но и для каждой степени ее свободы в отдельности (Y_i и \bar{U}_i). Это позволяет проследить за эволюцией каждой степени свободы системы как в процессах релаксации ($dY_i < 0$), так и при удалении от равновесия ($dY_i > 0$). Поскольку в состоянии равно-

весия инергия, в отличие от энтропии S , обращается в нуль, ее можно рассматривать как абсолютную меру упорядоченности системы и удаленности ее от равновесия. Это дает в руки исследователей весьма «физичный», удобный и информативный инструмент для анализа проблем эволюции и самоорганизации объектов живой и неживой природы, легко выводящий исследователя на новый уровень их понимания. Таким образом, *энергодинамический метод* сохраняет все черты термодинамического метода потенциалов, обобщая его введением характеристических функций неравновесного состояния.

Дальнейшее развитие термодинамического метода связано с введением в ее уравнения времени t в качестве физического параметра, а также понятия обобщенной скорости процесса переноса i -го энергоносителя $w_i = dR_i/dt$. Это позволило естественным образом синтезировать идеи неравновесной и классической термодинамики как ее частного случая при $w_i \rightarrow 0$. Введение понятий потока $J_i = \partial Z_i / \partial t = \Theta_i w_i$ и термодинамической силы $X_i = F_i / \Theta_i = -\nabla \Psi_i$ как отрицательного градиента одного из обобщенных потенциалов намного облегчило понимание проблем физической кинетики и теории необратимых процессов и упростило их математический аппарат. Помимо устранения исторически сложившегося странного размежевания термодинамики и теории теплообмена, решения проблемы термодинамических неравенств, разрешения упомянутых выше парадоксов термодинамики, это способствует обнаружению в каждой из фундаментальных дисциплин резервов их дальнейшего обобщения и развития. Коснемся кратко некоторых из них.

4. Теория скорости процессов переноса. Введение параметров пространственной неоднородности F_i и R_i (или X_i и Z_i) позволило дать последовательно термодинамическое (не основанное на гипотезах, постулатах и соображениях статистико-механического характера) обоснование всех важнейших положений теории необратимых процессов переноса (ТНП) [10]. В частности, удалось показать, что обобщенная скорость какого-либо независимого процесса w_i и поток энергоносителя J_i зависят не от всех действующих в системе сил X_i (постулат Онсагера), а от всех компонент единственной (результатирующей) силы F_i . Это позволило резко упростить феноменологические законы процессов переноса путем преобразования их из матричной (онсагеровской) формы $J_i = \sum_j L_{ij} X_j$, ($i, j = 1, 2, \dots, n$) в диагональную [20]:

$$J_i = L_{ii} F_i \quad (i = 1, 2, \dots, n). \quad (3)$$

Это позволило предложить новый метод исследования эффектов наложения разнородных процессов, основанный на взаимной компенсации составляющих этой силы в стационарном состоянии [21]. Этот метод не требует применения соотношений взаимности Онсагера, нарушающихся в нелинейных системах. Он позволил преодолеть известную ограниченность термодинамики необратимых процессов линейными системами и состояниями вблизи равновесия и привел к дальнейшему сокращению числа кинетических коэффициентов в уравнениях переноса. Дальнейшее обобщение ТНП на нелинейные системы было достигнуто за счет обоснования более общих (дифференциальных) соотношений взаимности:

$$(\partial Z_i / \partial X_j) = (\partial Z_j / \partial X_i). \quad (4)$$

Это позволило установить ряд новых физических эффектов, обусловленных взаимосвязью скоростей разнородных необратимых процессов. Все это сделало этот важный раздел термодинамики вполне доступным для включения в программы технических вузов.

5. Теория подобия процессов энергопревращения. Термодинамическое обоснование теории скорости процессов переноса (ТНП) позволило поставить вопрос о расширении этой теории на процессы полезного преобразования энергии в энергетических, технологических и биологических системах. Такое обобщение основано на единстве математической модели взаимосвязанных процессов переноса и преобразования энергии, имеющих вид уравнений Онсагера. Приведение этих уравнений с использованием соотношений взаимности к безразмерной форме обнаруживает возможность объединения всех факторов, влияющих на относительный (мощностной) КПД линейных энергопреобразующих систем $\eta_N = X_j J_j / X_i J_i$ в

два безразмерных критерия подобия – критерий нагрузки B и критерий добротности установки Φ . Универсальный характер зависимости

$$\eta_N = (1 - B) / (1 + 1 / B\Phi), \quad (5)$$

подтверждающийся на ряде установок (от ракетных двигателей до термоэлектрических генераторов) [22], свидетельствует о единстве законов преобразования энергии в тепловых и нетепловых, циклических и нециклических, прямых и обратных машинах. Обращение этого КПД в нуль дважды (при $J_j = 0$ и при $X_j = 0$) свидетельствует о зависимости экономичности энергопреобразующих систем от режима их работы. Тем самым энергодинамика дополняет классический анализ эффективности тепловых машин учетом взаимосвязи их мощности и экономичности, распространяя найденные при этом закономерности на нетепловые двигатели. Это дополнение приближает термодинамическую оценку эффективности тепловых машин к реальности. Вместе с тем еще раз подтверждается универсальность принципа исключенного вечного двигателя 2-го рода при его корректном обобщении на нетепловые машины. Она заключается в единстве выражения абсолютного КПД тепловых и нетепловых, циклических и нециклических машин:

$$\eta_i = 1 - \bar{\psi}_i'' / \bar{\psi}_i' < 1, \quad (6)$$

где $\bar{\psi}_i', \bar{\psi}_i''$ – усредненные значения обобщенного потенциала на участках подвода и отвода i -й формы энергии.

Практическая ценность теории подобия процессов энергопревращения состоит в возможности переноса результатов исследования одних типов энергоустановок на другие (малоисследованные) с целью повышения их эффективности.

6. Теория производительности технических систем. Еще одним важным результатом стало построение основ теории производительности технических систем [22]. Эта теория дополняет классический анализ термодинамической эффективности энергоустановок установлением взаимосвязи термодинамических, режимных и стоимостных факторов. Тем самым осуществляется синтез термодинамики циклов энергетических установок, «термодинамики при конечном времени» и «термоэкономики», первая из которых устанавливает взаимосвязь экономичности преобразователей энергии с параметрами источника энергии; вторая – условия достижения их максимальной мощности; третья – взаимосвязь термодинамических и экономических факторов.

$$B_{opt} = 0,5 (1 - \eta_N c_m), \quad (7)$$

где c_m – доля топливной составляющей в цене электроэнергии.

Благодаря использованию теории подобия выводы теории производительности оказываются справедливыми для целого класса установок (энергетических, технологических и транспортных), работающих в различных режимах («крейсерской скорости», максимально длительной мощности, номинальном и «форсажном»). Учет всех этих факторов позволяет оценить реальную эффективность разных классов энергопреобразующих установок на оптимальных для каждого из них нагрузках.

7. Энергодинамика как теоретическая база альтернативной энергетики. Особый интерес представляет приложение энергодинамики к тому классу энергоустановок небольшой мощности, которые используют полевые формы энергии и потому не нуждаются в каком-либо топливе. Речь идет об установках, использующих энергию естественных силовых полей (гравитационного, электростатического, электромагнитного и т.п.) с помощью промежуточных тел (ферромагнетиков, сегнетоэлектриков, тел со смещенным центром тяжести, постоянных магнитов, плазмы и т.п.). Эти установки часто ошибочно относят к «вечным двигателям» на том основании, что источник первичной энергии у них не поддается идентификации, а его расход – измерению. Альтернативный подход, предлагаемый энергодинамикой, состоит в измерении средних значений термодинамических сил \bar{X}_i' и \bar{X}_i'' или крутящих

моментов *в рабочем теле* циклически действующей установки на участках получения им энергии от источника и совершения полезной работы, что освобождает от необходимости измерения расхода первичной энергии:

$$\eta_N = \bar{X}_i'' / \bar{X}_i' \leq 1. \quad (8)$$

Тем самым понятийный и математический аппарат энергодинамики позволяет утверждать, что большинство установок, которые обычно некорректно называют «генераторами избыточной мощности», «сверхъединичными устройствами» (с КПД выше 100%), «генераторами мощности», а то и просто «вечными двигателями», в действительности не нарушают никаких законов физики и должны быть отнесены к классу «альтернаторов», т.е. устройств, использующих альтернативные известным возобновляемые источники энергии. Тем самым энергодинамика снимает теоретический запрет на создание таких устройств и позволяет дать всесторонний энергодинамический анализ большому числу уже существующих и сотням запатентованных устройств, способных решить проблему энергетического кризиса. В этом отношении энергодинамику можно рассматривать как теоретическую базу бесплодной энергетике.

8. Энергодинамика как метод познания. «Безгипотезный» в своей основе и строго математический в своих приложениях метод энергодинамики приводит к нетривиальным результатам практически в каждой области ее приложения. Так, энергодинамика изменяет сложившиеся представления о происхождении многочисленных термомеханических, термоэлектрических, термохимических, термомагнитных и т.п. эффектов, объясняемых в настоящее время усилением диссипативных явлений при «наложении» нескольких необратимых процессов. Энергодинамика, напротив, вскрывает их антидиссипативную природу, объясняя эти эффекты достижением системой состояния «частичного» равновесия, при котором прекращается один из протекающих в системе процессов. Исчезновение в этом состоянии его движущей силы F_i обусловлено взаимной компенсацией ее составляющих $\Theta_i \nabla \psi_i$ и $\Theta_j \nabla \psi_j$, что и обуславливает возникновение стационарных неравновесных состояний с отличными от нуля градиентами потенциалов $\nabla \psi_i$ и $\nabla \psi_j$. Это означает, что при приближении к равновесию одних степеней свободы системы другая удаляется от него. Именно это и порождает неперiodические колебательные процессы, самоорганизацию систем и кругооборот энергии и вещества в системах различного иерархического уровня, начиная с атомов и кончая Вселенной в целом [23].

В квантовой механике энергодинамика дает классическое объяснение квантованию энергии излучения и происхождению спектральных серий. В электродинамике она обосновывает возможность передачи энергии по однопроводной линии и генерации продольных электромагнитных волн. В биофизике энергодинамика вскрывает векторную природу обратимых реакций, объясняя причину их сопряжения с процессами транспорта веществ в биосистемах их одинаковым тензорным рангом (в полном соответствии с принципом Кюри). Она позволяет дедуктивным путем получить (с точностью до эмпирических постоянных) ряд уравнений и соотношений, считавшихся не выводимыми из первых принципов. К ним можно отнести уравнения Шрёдингера и Максвелла, соотношения Планка и Бойля, законы Ньютона и Кулона, уравнения переноса и преобразования энергии. При этом она указывает пути дальнейшего обобщения этих законов. В термодинамике она вскрывает ограниченность принципа возрастания энтропии и недостижимости абсолютного нуля температур; в физической химии – предлагает новый метод нахождения трудноизмеримых термодинамических параметров путем измерения стационарных эффектов наложения; в квантовой механике – неизвестные ранее способы определения параметров электронных орбит; в классической механике – возможность преобразования импульса вращательного движения системы в поступательное; в электродинамике – возможность возникновения продольных волн и передачи энергии по однопроводной линии; в теории эволюции – наличие самопроизвольных процес-

сов, приводящих к упорядочению систем в полном соответствии с более общими неэнтропийными критериями их эволюции; в химии – связь моментов распределения валентных электронов с периодической системой элементов. Все это указывает на полезность и эвристическую ценность энергодинамического метода исследования, способного систематизировать наши знания об окружающем нас мире и порой внести коррективы в существующую научную парадигму.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пригожин И. Время, структура и флуктуации (Нобелевская лекция) / И. Пригожин // Успехи физических наук. 1980. Т. 131. С. 185.
2. Денбиг К. Термодинамика стационарных необратимых процессов / К. Денбиг. М.: ИИЛ, 1954. 119 с.
3. Де Гроот С.Р. Неравновесная термодинамика / С.Р. Де Гроот, Р. Мазур. М.: Мир, 1964. 456 с.
4. Дей У.А. Термодинамика простых сред с памятью / У.А. Дей. М.: Мир, 1974. 356 с.
5. Толмен Р. Относительность, термодинамика и космология / Р. Толмен. М.: Наука, 1974. 372 с.
6. Гольдман М. Спиновая температура и ЯМР в твердых телах / М. Гольдман. М.: Мир, 1972. 312 с.
7. Руденко А.В. Термодинамика при конечном времени (обзор) / А.В. Руденко, В.Н. Орлов // Теплоэнергетика. 1984. № 9. С. 68-71.
8. Андрющенко А.И. Основы термодинамики циклов энергетических установок / А.И. Андрющенко. М.: Высшая школа, 1985. 98 с.
9. Рубин А.Б. Термодинамика биологических процессов / А.Б. Рубин. М.: МГУ, 1984. 280 с.
10. Гленсдорф П. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций / П. Гленсдорф, И. Пригожин. М.: Наука, 2003. 330 с.
11. Эткин В.А. Термокинетики (термодинамика неравновесных процессов переноса и преобразования энергии) / В.А. Эткин. Тольятти: ТГТУ, 1999. 228 с.
12. Эткин В.А. К единой теории реальных процессов / В.А. Эткин // Фундаментальные проблемы естествознания и техники: труды конгресса. СПб., 2006. Т. 1. С. 577-587.
13. Кедров Б.М. Парадокс Гиббса / Б.М. Кедров. М.: Наука, 1969. 212 с.
14. Мамонтов М.А. Основы термодинамики тел переменной массы / М.А. Мамонтов. Тула: ТГТУ, 1970. 270 с.
15. Кричевский Р.И. Понятия и основы термодинамики / Р.И. Кричевский. М.: Химия, 1970. 320 с.
16. Базаров И.П. Термодинамика. Изд. 4-е / И.П. Базаров. М.: Высшая школа, 1991. 210 с.
17. Дьярмати И. Неравновесная термодинамика. Теория поля и вариационные принципы / И. Дьярмати. М.: Мир, 1974. 304 с.
18. Руденко А.П. Теория саморазвития открытых каталитических систем / А.П. Руденко. М.: Наука, 1969. 280 с.
19. Фейнман Р. Характер физических законов / Р. Фейнман. М.: Мир, 1968. 340 с.
20. Эткин В.А. Альтернативная форма обобщенных законов переноса / В.А. Эткин // Инженерно-физический журнал. 1999. Т. 72. № 4. С. 770-776.
21. Эткин В.А. Метод исследования линейных и нелинейных необратимых процессов / В.А. Эткин // Журнал физической химии. 1991. Т. 65. № 3. С. 642-648.

22. Эткин В.А. К термодинамической теории производительности технических систем / В.А. Эткин // Известия АН СССР. Энергетика. 2000. № 1. С. 99-106.

23. Эткин В.А. Свободная энергия биологических систем / В.А. Эткин // Биофизика/ 2003. Т. 48. № 4. С. 740-746.

Эткин Валерий Абрамович –

доктор технических наук, профессор кафедры «Теплоэнергетика»
Тольяттинского государственного технического университета

Статья поступила в редакцию 18.06.07, принята к опубликованию 05.12.07

УДК 621.31:658.26

В.С. Степанов

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССОВ С ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИМИ ПРЕВРАЩЕНИЯМИ ВЕЩЕСТВ

Предложена методика оценки энергетической эффективности технологических процессов, полученная на основе эксергетического анализа. В качестве показателя сравнительной эффективности используются относительные энергетический и эксергетический КПД. В качестве примера приведен анализ производств черной и цветной металлургии.

V.S. Stepanov

RESEARCH OF THERMODYNAMIC EFFICIENCY OF THE PROCESSES WITH PHYSICAL AND CHEMICAL TRANSFORMATIONS

An estimation method of energy efficiency of technological processes received on the base of exergetic analysis is offered in this article. As an example of comparing efficiency relative energetic and exergetic coefficient of efficiency is used. And as an example production of ferrous metallurgy and non-ferrous metallurgy is taken.

Все процессы, происходящие в природе и различных технических системах, являются следствием преобразования одних видов энергии в другие. Каждая техническая система, потребляющая энергию, нуждается в энергетическом анализе, в результате которого определяется, насколько эффективно энергия используется для выполнения ее функций – производства продукта, преобразования энергии из одного вида в другой, обеспечения комфорта или оказания услуги. Для того, чтобы осуществить такой анализ, нужен соответствующий инструмент (метод).

В настоящее время научно обоснованные методы оценки эффективности использования энергии существуют, а значит, и используются, только применительно к энергетическим процессам и техническим системам, базирующимся на них. Все остальные оцениваются какими-либо условными показателями с использованием принципов сравнения, аналогий и то-

му подобных не слишком обоснованных приемов. В этот разряд попадают практически все энергопотребляющие процессы, в том числе и технологические процессы промышленности.

Вместе с тем повышение эффективности энергоиспользования в технологических процессах является весьма актуальной задачей научных исследований и инженерных разработок. Рост цен на энергоресурсы, наблюдающийся в последние десятилетия, усиливает актуальность проблемы энергосбережения в промышленности, самом крупном потребителе энергии. Понятие *экономия энергии* подразумевает уменьшение энергопотребления не любой ценой, а лишь при условии достижения тех же экономических и социальных показателей, т.е. энергосбережение означает сокращение потерь и повышение коэффициента полезного использования энергии.

Однако общепринятые методы для оценки энергетической эффективности технологических процессов в настоящее время отсутствуют, поскольку для этой цели нельзя использовать такой универсальный термодинамический показатель, каким является КПД, из-за невозможности выразить в энергетических единицах их целевую продукцию. Поэтому основным показателем, используемым для оценки энергетического совершенства процессов промышленности, остается удельный расход энергии на выпускаемую продукцию.

Для оценки относительной эффективности рассматриваемого производства часто используется сопоставление достигнутого удельного расхода энергии с аналогичными показателями лучших отечественных и зарубежных предприятий. Очевидно, что подобный способ может быть пригодным только для ориентировочной оценки, поскольку специалистам известно, что не существует одинаковых технологических схем, абсолютно одинаковых по составу и свойствам перерабатываемого сырья и энергоресурсов, что подтверждается многочисленными исследованиями специалистов. В связи с этим уже давно назрела необходимость разработки единой методологии исследования процессов и установок промышленности, научно обоснованных показателей их энергетической эффективности. Актуальность решения этой задачи чрезвычайно возросла в период мирового энергетического кризиса 70-х годов прошлого века. В это время рядом зарубежных ученых было предложено весьма простое соотношение для определения энергоэффективности любых процессов:

$$\eta = \frac{I_{\min}}{I_{\text{затр}}} \quad (1)$$

Здесь I_{\min} – величина минимально необходимых затрат энергии на выпуск единицы целевой продукции, а $I_{\text{затр}}$ – фактические удельные затраты энергии на рассматриваемом производстве.

Именно такое соотношение было узаконено конгрессом США в 1973 году в качестве показателя энергоэффективности любых потребителей энергии. К сожалению, авторы предлагаемого показателя не дали никаких рекомендаций по вопросу, как определять величину минимально необходимых затрат энергии/эксергии для различного рода технологических процессов и установок.

Что касается производств, в основе которых лежат физико-химические процессы, то задача установления для них минимально необходимых затрат упростилась, когда были введены понятия химической энергии и эксергии веществ. В соответствии с трактовкой этих понятий, данной Я. Шаргутом, значения химической энергии и эксергии веществ как раз и характеризуют минимальные затраты энергии и эксергии на получение различных материалов независимо от используемой при этом технологии, т.е. эти затраты являются *предельными*. Силами целого ряда ученых в итоге была разработана методика расчета значений химической энергии и эксергии практически всех элементов Периодической таблицы Д.И. Менделеева [2-5]. На основании этих характеристик для элементов (простых веществ) можно рассчитать химическую энергию и эксергию для любого химического соединения по следующим формулам:

$$i_{\text{хз}} = \sum m_j \cdot i_{\text{хз}}^0 + \Delta H_z^0; \quad e_{\text{хз}} = \sum m_j \cdot e_{\text{хз}}^0 + \Delta G_z^0, \quad (2)$$

где i_{xj}^0 , e_{xj}^0 – соответственно химическая энергия и эксергия j -го элемента (простого вещества), входящего в состав вещества z ; m_j – количество j -го элемента в химической формуле вещества z , в молях; ΔH_z^0 и ΔG_z^0 – соответственно стандартная теплота и стандартная свободная энтальпия (энергия Гиббса) образования вещества z .

Таким образом, не нарушая положений термодинамики, мы получаем большие удобства при проведении энергетического анализа различных технических систем. Определив величины i_{xj}^0 , e_{xj}^0 для всех элементов и располагая данными по ΔH_z^0 и ΔG_z^0 образования веществ, можно заранее рассчитать значения их химической энергии и эксергии. Автор настоящей статьи выполнил эту работу, рассчитав i_x и e_x для более 2000 чистых неорганических и 1300 органических веществ [6].

Нами разработаны методики, которые на основе данных о химическом и минералогическом составе технических топлив, сырьевых материалов, а также целевых продуктов позволяют рассчитать значения их химической энергии и эксергии (табл. 1).

Таблица 1

Пределные затраты энергии / работы на производство промышленной продукции

Продукт	Химическая формула, состав	Минимальные затраты, ГДж/т		Примечание
		энергии	эксергии	
1. Металлы и их сплавы				
Чугун	Fe + ≈4 % C	9,511	7,676	Чугунное литье, сырье для производства стали
Сталь углеродистая	Fe + до 1,7% C	8,954	7,071	Производство стальных изделий путем литья, вальцовки, протягивания иликовки
Алюминий	Al	35,360	31,023	Проводники для электропромышленности; производство бытовых приборов, сосудов; профилей, деталей различных форм, упаковочной фольги; в алюмотермии; в сплавах; конструкционный материал
Свинец	Pb	1,544	1,472	В сплавах; материал для защиты от радиоактивного излучения; производство кабелей и труб; изготовление аккумуляторов
Хром	Cr	12,656	11,002	Легирующая добавка; в качестве покрытия поверхности других металлов (для защиты от коррозии и износа)
Медь	Cu	3,541	2,754	Электропроводящий материал в электропромышленности, изготовление труб для аппаратов химической промышленности; легирующая добавка
Марганец	Mn	9,501	8,464	Легирующая добавка
Никель	Ni	6,217	5,553	Легирующая добавка; в качестве покрытия поверхности других металлов (против коррозии и износа); пластинки аккумуляторов; изготовление радиоламп
Серебро	Ag	0,788	0,464	Легирующая добавка; изготовление драгоценностей, приборов, зеркальных поверхностей, контактов выключателей, серебряных соединений для фотографии
Цинк	Zn	7,006	5,935	В качестве покрытия поверхности жести, трубок, проводов, гвоздей и других изделий из сплавов железа. Производство жести, батарей для карманных фонариков; легирующая добавка
Олово	Sn	5,004	4,364	Легирующая добавка; в качестве покрытия поверхности стальной жести (белая жесь)
Титан	Ti	19,729	18,580	Конструкционный материал; изготовление химической аппаратуры
Бронза	70–96 % Cu, 30–4 % Sn	3,980– 3,599	3,273– 2,818	Изготовление деталей, находящихся под большой нагрузкой, и арматуры

Окончание табл. 1

Продукт	Химическая формула, состав	Минимальные затраты, ГДж/т		Примечание
		энергии	эксергии	
Константан	60% Cu, 40% Ni	4,612	3,873	Электрические сопротивления
Латунь	54-90% Cu, 46-10% Zn	5,135–3,887	4,217–3,073	Производство проволоки, жести, профилей, арматуры, деталей для электропромышленности
Мельхиор	60% Cu, 22% Ni, 18% Zn	4,754	3,942	Материал для медицинских и точных механических приборов
Томпак (красное литьё)	86% Cu, 4% Zn, 10% Sn	3,825	3,041	Производство деталей машин
2. Основные неорганические химикаты				
Азотная кислота	HNO ₃	-0,495	0,598	Производство удобрений, красителей, лаков, пластмасс, лекарственных и взрывчатых веществ, а также химических волокон
Аммиак	NH ₃	20,509	19,348	Производство азотной кислоты, удобрений, соды; хладагент
Водород	H ₂	143,000	118,500	Синтез аммиака, углеводородов, метанола, соляной кислоты и т.д. Применяется при автогенной сварке и резке металлов
Едкий натр (гидроксид натрия)	NaOH	3,449	2,943	Производство мыла и реактивов; вспомогательное вещество при производстве целлюлозы и для очистки жиров и минеральных масел
Обожженная известь (оксид кальция)	CaO	3,870	3,431	Добавка при производстве стали; вспомогательное вещество при изготовлении сахара и получении соды; сырье для производства гашеной извести и карбида кальция; удобрений
Карбид кальция	CaC ₂	24,680	23,755	Производство цианида кальция, пластмасс, синтетического каучука, химических волокон, растворителей, медикаментов, этанола, уксусной кислоты
Сера	S	19,464	16,313	Производство сероуглерода, красителей, лекарственных дезинфицирующих препаратов, а также ядохимикатов; вулканизирующий агент при производстве резины
Серная кислота	H ₂ SO ₄	0,971	0,706	Производство удобрений, красителей, химических волокон, пластмасс, лекарственных веществ; используется при подготовке руд, очистке нефти; осушитель
Сода (карбонат натрия)	Na ₂ CO ₃	1,022	1,026	Производство мыла, стекла, соединений натрия, удобрений
Хлор	Cl	0,705	0,367	Производство пластмасс, красителей, лекарственных веществ, ядохимикатов; дезинфицирующее и отбеливающее средство

Значения минимальных затрат энергии и эксергии различных материалов могут использоваться при решении целого ряда важных инженерных и научных задач:

- при определении энергоэффективности как промышленных производств в целом, так и отдельных их подразделений;
- при расчетах полных энергетических балансов предприятий и технологий со сложными физико-химическими процессами;
- при решении задач прогнозирования энергопотребления на перспективу.

В данной статье мы приведем лишь результаты использования минимальных затрат энергии для определения энергоэффективности некоторых металлургических производств. В качестве показателей их энергетической эффективности мы использовали энергетические и эксергетические КПД, фактически достигнутые, идеализированные и относительные, определяемые по методике, изложенной в статье Т.Б.Степановой (в настоящем журнале).

В соответствии с этим КПД реальных производств определялись по выражениям:

$$\eta_{\text{эн}} = \sum_k I_k^* / \sum_k I_{\text{затр}}^{\text{реал}}; \quad \eta_{\text{экс}} = \sum_k E_k^* / \sum_k E_{\text{затр}}^{\text{реал}}. \quad (3)$$

При разработке идеализированных аналогов технологических процессов, связанных с химическими превращениями, нами приняты следующие допущения.

В качестве аналога принимается процесс, который описывается одной (или несколькими) основной необратимой реакцией, как и в реальном производстве рассматриваемого продукта. В таком идеализированном процессе используется сырье из химически чистых соединений и получается химически чистый продукт, потери материалов отсутствуют, реакции протекают при стехиометрических количествах реагирующих веществ и идут до конца. Температура потребляемых и отдаваемых веществ принимается равной температуре окружающей среды. Принимается, что в идеализированном процессе отсутствуют затраты на транспорт материалов. Естественно, что такой процесс протекает с затратами материалов и энергии, меньшими, чем в реальных процессах рассматриваемой технологии.

Соединением идеализированных аналогов отдельных процессов в соответствии с той или иной технологической схемой были получены аналоги рассматриваемых реальных производств.

Составив удельный материальный и полный энергетический балансы такого идеализированного аналога, можно рассчитать его КПД:

$$\eta_{\text{эн}}^{\text{ид}} = i_x / I_{\text{затр}}^{\text{ид}}; \quad \eta_{\text{экс}}^{\text{ид}} = e_x / E_{\text{затр}}^{\text{ид}}. \quad (4)$$

Значения этих КПД показывают предельную эффективность получения данного продукта из определенного сырья по принятой технологии. Степень энергетического совершенства реального технологического процесса, перерабатывающего это сырье по той же технологии, может быть оценено значением относительного КПД, представляющего собой соотношение соответственно значений энергетического и эксергетического КПД реального и идеализированного процессов:

$$\eta_{\text{эн}}^{\text{отн}} = \eta_{\text{эн}}^{\text{реал}} / \eta_{\text{эн}}^{\text{ид}} = I_{\text{затр}}^{\text{ид}} / I_{\text{затр}}^{\text{реал}}; \quad \eta_{\text{экс}}^{\text{отн}} = \eta_{\text{экс}}^{\text{реал}} / \eta_{\text{экс}}^{\text{ид}} = E_{\text{затр}}^{\text{ид}} / E_{\text{затр}}^{\text{реал}}. \quad (5)$$

Результаты расчетов таких показателей для рассмотренных нами металлургических производств приведены в табл. 2.

Чем выше $\eta^{\text{отн}}$, тем совершеннее в энергетическом смысле реальный технологический процесс и тем труднее найти пути дальнейшего повышения его КПД. На основе относительного КПД можно сравнивать различные технологические процессы и прогнозировать рациональную структуру производства одного и того же продукта.

Таблица 2

Энергетические и эксергетические КПД
в некоторых производствах черной и цветной металлургии

Продукт, технологическая схема	Реальные		Идеализированные		Относительные	
	$\eta_{эн}$	$\eta_{экс}$	$\eta_{эн}$	$\eta_{экс}$	$\eta_{эн}$	$\eta_{экс}$
Сталь из железной руды, в среднем по отрасли:						
– мартеновский процесс	38,0	34,6	82,6	79,6	46,0	43,5
– кислородно-конвертерный процесс	41,7	38,4	82,6	79,6	50,5	48,2
Медь (отражательная плавка):						
– действующий завод	6,5	4,6	23,4	22,8	27,8	20,2
– при полном использовании ВЭР и интенсификации процессов за счет применения кислорода	19,4	10,9	23,4	22,8	82,9	47,8
Свинец (шахтная плавка):						
– без утилизации SO ₂	7,8	4,7	25,7	27,0	30,4	17,4
– с утилизацией SO ₂	9,35	5,63	33,4	33,1	28,0	17,0
Цинк (гидрометаллургический способ)	21,4	20,0	41,7	39,4	51,3	50,8
Глинозем из нефелинов	9,5	6,6	83,4	73,3	11,4	9,0
Алюминий из глинозема	42,1	37,8	87,1	81,6	48,3	46,3

ЛИТЕРАТУРА

1. Rant Z. Exergie, ein neues Wort für «technische Arbeitsfähigkeit» / Z. Rant // Forsch. Ing. Wes. 1956. Bd. 22, № 1. S. 36-37.
2. Шаргут Я. Эксергия / Я. Шаргут, Р. Петела. М.: Энергия, 1968. 279 с.
3. Бродянский В.М. О моделях окружающей среды для расчета химической эксергии / В. М. Бродянский, М.В. Сорин // Теоретические основы химической технологии. 1984. Т. XVIII, № 6. С. 816-824.
4. Озолинг И.Х. Упрощенная методика расчета химической энергии и эксергии вещества / И.Х. Озолинг, В.С. Степанов // Известия вузов. Энергетика. 1979. № 10. С. 60-64.
5. Yamauchi S. New thermodynamic functions theta function and reference exergy of elements / S. Yamauchi, K. Fueki // Data for science and technology: Proc. 7th CODATA conf., Kyoto, 1980. Oxford, 1981. P. 242-245.
6. Степанов В.С. Химическая энергия и эксергия веществ / В.С. Степанов. Новосибирск: Наука, 1990. 163 с.
7. Степанов В.С. Эффективность использования энергии / В.С. Степанов, Т.Б. Степанова. Новосибирск: Наука, 1994. 257 с.

Степанов Владимир Сергеевич –

доктор технических наук,
профессор кафедры «Теплогасоснабжение, вентиляция и охрана воздушного бассейна»
Иркутского государственного технического университета

Статья поступила в редакцию 08.06.07, принята к опубликованию 05.12.07

Т.Б. Степанова

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЗЕРВОВ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ И ПРОГНОЗ
ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА
ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Описаны основные принципы комплексного энергетического анализа технических систем различного типа. Приведена методика такого анализа, позволяющая получить совместную оценку термодинамической эффективности использования энергии, выявления резервов энергосбережения и определения удельных затрат энергии на перспективу.

T.V. Stepanova

**ENERGY SAVINGS DETERMINATION AND ENERGY
CONSUMPTION FORECAST ON THE BASE
OF TECHNICAL SYSTEMS THERMODYNAMIC ANALYSIS**

The major principles of complex different type technical systems energy analysis are described here. The methodic of such analysis is given here which gives an opportunity of estimation of thermodynamic efficiency as well as of energy usage and revealing of reserves of energy savings and determination of specific determination of energy in future.

Проведение энергосберегающей политики невозможно без серьезных исследований эффективности использования энергии в различных сферах ее применения – промышленности, транспорте, коммунально-бытовом хозяйстве и т.д. Однако здесь пришлось столкнуться с серьезными методическими трудностями, поскольку для многих сфер потребления энергии до сих пор отсутствуют объективные показатели для оценки энергетической эффективности. Без решения этой проблемы невозможно прогнозировать энергопотребление на перспективу, разрабатывать региональные, отраслевые и государственные энергосберегающие программы, оценивать энергетические последствия технического прогресса в энергопотребляющей сфере [1, 2].

В настоящей статье описаны основные принципы комплексного энергетического анализа технических систем различного типа, который позволяет:

- определить термодинамическую эффективность технической системы посредством определения энергетического и эксергетического КПД;
- выявить резервы энергосбережения в процессе с учетом его термодинамических возможностей;
- подготовить качественную исходную информацию для прогнозирования энергопотребления отраслей с учетом технического прогресса и энергосберегающей политики.

Согласно современным представлениям, термодинамическая эффективность процессов должна оцениваться двумя КПД – энергетическим ($\eta_{эн}$) и эксергетическим ($\eta_{экс}$), представляющими отношение полезного эффекта в единицах энергии (I) или работы (E) к суммарным затратам энергии или эксергии [1-3].

Однако для огромного многообразия энергопотребляющих процессов, производящих металлы, изделия из них, промышленные материалы, химические вещества, продукты, услу-

ги, создающих комфорт и т.д., понятие «полезная энергия» теряет свой истинный смысл. Это означает, что для них не может быть рассчитан КПД в общепринятом смысле.

Для выхода из этой проблемы было предложено заменить *полезную энергию* в числителе выражения КПД величиной *предельных (теоретических) затрат энергии/эксергии* на осуществление процесса или производство какого-либо продукта – $I_{\min}^* \cdot E_{\min}^*$. Эта величина определяется из энергетического баланса идеального аналога реального процесса с $\eta_{\text{эн}}^{\text{ид}} = 1$; $\eta_{\text{экс}}^{\text{ид}} = 1$ (предельная степень идеализации). Другими словами, абсолютные энергетический и эксергетический КПД любого технологического процесса равны отношению теоретических затрат энергии к фактическим:

$$\eta_{\text{эн}}^{\text{реал}} = I_{\min}^* / I_{\text{затр}}^{\text{реал}}; \quad \eta_{\text{экс}}^{\text{реал}} = E_{\min}^* / E_{\text{затр}}^{\text{реал}}. \quad (1)$$

Из этого следует, что абсолютный энергетический КПД реального процесса может быть определен только в том случае, когда энергетические затраты идеального аналога не равны нулю, т.е. при $I_{\min}^* \neq 0$.

Поскольку такая предельная степень идеализации не позволяет глубоко анализировать реальные процессы, необходимо разрабатывать *идеализированные аналоги* реальных производств, более приближенные к реальным условиям. В первую очередь, в них должны найти отражение два наиболее важных фактора, влияющих на энергетические затраты – это сырье, из которого мы получаем продукт, и используемая технология.

На основе энергетического баланса идеализированного аналога определяются *минимально необходимые затраты энергии/работы* для каждого исследуемого процесса – I_{\min} , E_{\min} . Для идеализированного аналога могут быть рассчитаны энергетический и эксергетический КПД, как и для реального процесса:

$$\eta_{\text{эн}}^{\text{ид}} = I_{\min}^* / I_{\min}; \quad \eta_{\text{экс}}^{\text{ид}} = E_{\min}^* / E_{\min}. \quad (2)$$

Сопоставление реальных процессов с идеализированными аналогами по КПД означает по существу оценку степени совершенства исследуемого процесса по величине *относительных* КПД по выражениям:

$$\eta_{\text{эн}}^{\text{отн}} = \eta_{\text{эн}}^{\text{реал}} / \eta_{\text{эн}}^{\text{ид}}; \quad \eta_{\text{экс}}^{\text{отн}} = \eta_{\text{экс}}^{\text{реал}} / \eta_{\text{экс}}^{\text{ид}}. \quad (3)$$

Для разработки общих принципов формирования идеализированных аналогов исследуемых процессов и определения теоретически необходимых затрат энергии предложена следующая группировка процессов по целевому назначению:

1. Процессы производства энергии.
2. Физико-химические процессы производства материалов, химикатов и прочих веществ.
3. Процессы производства различных изделий, совершение работы.
4. Процессы, имеющие цель обеспечить нормальные условия для жизни и работы людей.
5. Перемещение людей и грузов в пространстве.

В зависимости от сложности исследуемой системы она может быть разбита на разное число элементов с многообразными энергетическими потоками, связывающими их друг с другом. В общем случае при рассмотрении эффективности системы следует учитывать только энергетические потоки, пересекающие контрольную поверхность системы.

Характер изменения КПД реального процесса во времени представляет собой возрастающую кривую, асимптотически приближающуюся к пределу – идеализированному КПД данного процесса. Соответственно этому энергозатраты на производство продукта с течением времени стремятся к некоторой предельной, практически недостижимой величине – энергозатратам его идеализированного аналога.

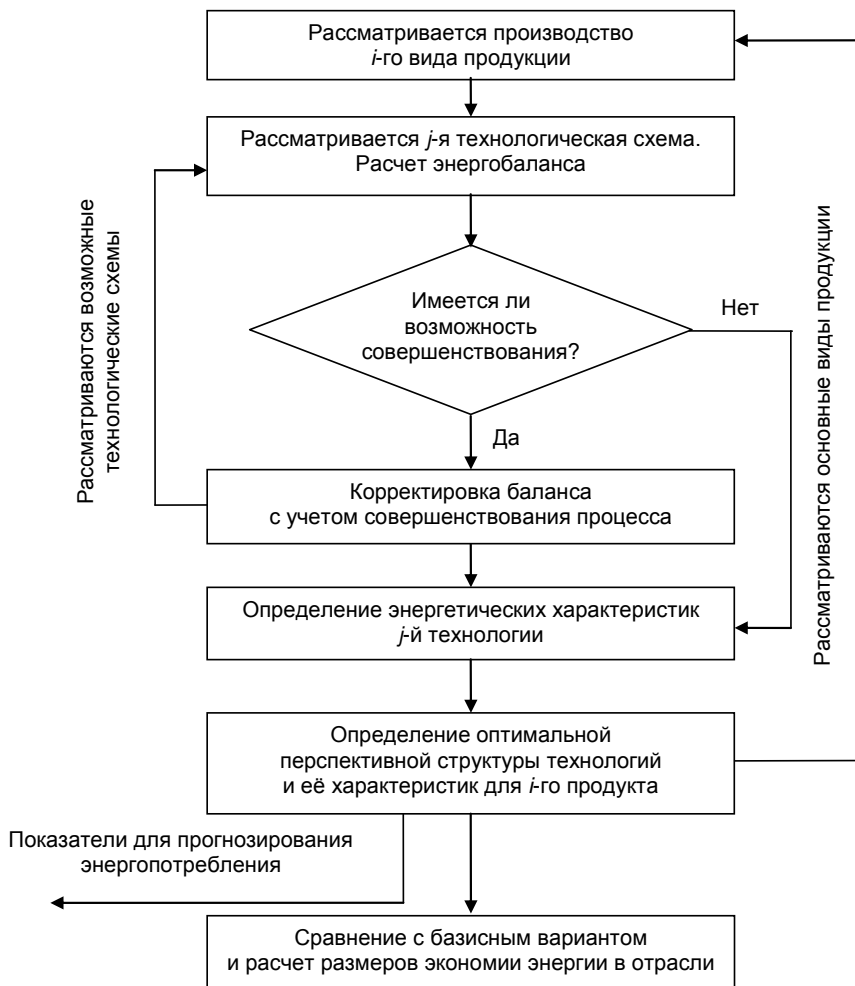
Исходя из этого, под *потенциалом энергосбережения* Π_t в момент t понимается теоретически возможная величина снижения энергозатрат в технологическом процессе I'_t до уровня затрат энергии в его идеальном аналоге I_{\min}^* .

Суммарный резерв экономии энергии представляет собой по существу разницу между энергопотреблением процесса (технологической схемы) на базовом и перспективном уровнях:

$$P_t = I'_t - I'_{t+\Delta}. \quad (4)$$

Следует также отметить, что численная величина КПД зависит от выбранного идеализированного аналога, поэтому, чтобы использовать этот показатель при проведении научных исследований и проектных работ, нужно разработать и принять общепризнанное стандартное Положение о параметрах идеализированного аналога.

Разработанные методы могут быть использованы для исследования энергетической эффективности технических систем различных размеров и сложности – крупного комбината, отрасли и даже народного хозяйства в целом. Принципиальный подход к определению резервов экономии энергоресурсов (ЭР) в отрасли промышленности показан на рисунке.



Алгоритм расчета энергетических характеристик отрасли с использованием полных энергетических балансов отдельных процессов

Первым шагом при моделировании энергопотребления отрасли является формирование ее продуктивно-технологической схемы, на основе которой формируется сама модель. Основным объектом исследования является единичный процесс. Для моделирования его энергопотребления, т.е. для выражения связи между основными входными и выходными параметрами использована форма балансов, материального и энергетического, рассчитанных на единицу полезного продукта рассматриваемого объекта.

В результате по каждому процессу должна быть получена следующая система показателей:

$$\begin{aligned}
 I_{ijl} &= i_{ijl} M_{ijl} \\
 &\dots \dots \dots \\
 I_{ijk} &= i_{ijk} M_{ijl} \\
 &\dots \dots \dots \\
 I_{ilm} &= i_{ilm} M_{ijl} \\
 \hline
 I_{ijl} &= \sum_{k=1}^m \alpha_k I_{ijk}
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

Здесь i_{ijk} , I_{ijk} – соответственно удельный и полный расход k -го энергоресурса при производстве продукта l -го процесса на основе j -й технологии; M_{ijl} – масса продукта, производимого в l -м процессе, для получения единицы конечного продукта технологической цепочки; m – число рассмотренных энергоресурсов; I_{ijl} – удельный расход энергии на производство продукта l -го процесса на основе j -й технологии в условных единицах энергии; α_k – коэффициент перевода k -го энергоресурса в условные единицы энергии.

Удельные расходы всех видов энергоресурсов по всем процессам схемы, пересчитанные на единицу конечного продукта, суммируются для технологической схемы:

$$I_{ijk} = \sum_{l=1}^N I_{ijlk} .
 \tag{6}$$

Здесь l – индекс звена технологической цепочки; N – число звеньев.

Суммарный расход энергии на производство единицы продукции по j -й технологической схеме составит

$$I_{ij} = \sum_{k=1}^m \alpha_k \sum_{l=1}^N I_{ijlk} .
 \tag{7}$$

Варьируя долю каждой технологической схемы β_{ij} в производстве основного i -го продукта цепочки, можно определить средневзвешенный удельный расход по каждому виду энергоресурсов:

$$I_{ik} = \sum_{j=1}^d \beta_{ij} \sum_{l=1}^N I_{ijlk}
 \tag{8}$$

и суммарные отраслевые энергозатраты на единицу i -го продукта:

$$I_i = \sum_{k=1}^m \alpha_k I_{ik}
 \tag{9}$$

для соответствующей технологической структуры отрасли. Здесь d – число рассмотренных технологических схем.

Проводя подобные расчеты для всех основных, наиболее энергоемких продуктов с использованием экзогенно заданной или полученной на основе специально проведенных расчетов информации о динамике изменения структуры применяемых технологий их производства в рассматриваемый период, мы получаем информацию для прогнозирования технологического энергопотребления отрасли на перспективу.

Разница между показателями энергопотребления на производство i -го продукта для базового и перспективного уровней, помноженная на объем его выпуска в перспективе M_i^n , определяет резервы экономии ЭР при данном направлении развития и совершенствования этой подотрасли:

$$P_i = (I_i^{\delta} - I_i^n) M_i^n. \quad (10)$$

Здесь I_i^{δ}, I_i^n – удельные расходы энергии на производство рассматриваемого продукта на базовом и перспективном уровнях.

Отраслевая экономия энергоресурсов складывается из резервов каждой подотрасли:

$$P_{\text{отр}}^{\text{эко}} = \sum_i P_i = \sum_i (I_i^{\delta} - I_i^n) M_i^n. \quad (11)$$

Затраты эксергии легче прогнозировать и анализировать, поскольку она, в отличие от энергии разных видов, обладает свойством аддитивности. Это дает возможность суммировать ее расходы по отдельным процессам технологической схемы, не прибегая к помощи соответствующих переводных коэффициентов, как это требуется для разных видов энергии. Совместный анализ прогнозируемых затрат энергии и эксергии позволяет не только определить требуемое количество подведенной энергии, но и оценить ее работоспособность, необходимую для осуществимости технологических процессов, т.е. увязать прогноз по количеству и качеству энергии.

Ниже приведены результаты экспериментальных расчетов, выполненных с применением разработанной методики и модели, по оценке резервов энергосбережения в черной металлургии по основным направлениям: внедрение новых перспективных технологий, совершенствование технологической структуры производства продукции; совершенствование существующих процессов и оборудования; использование вторичных энергоресурсов.

В качестве крупных энергосберегающих мероприятий, намеченных для реализации в отрасли, рассмотрены: изменение технологической структуры выплавки стали; внедрение непрерывной разливки стали; повышение степени использования потенциальной энергии доменного газа, химической энергии конвертерного газа, тепла раскаленного кокса; интенсификация и совершенствование существующих технологических процессов (повышение температуры дутья и подача кислорода в процессы; подогрев металлолома, загружаемого в сталеплавильные печи; повышение степени утилизации всех видов ВЭР и многие другие).

Резервы энергосбережения выявлялись для некоторого расчетного перспективного уровня (уровень II) развития отрасли по сравнению с базовым, соответствующим примерно ее состоянию на 1985 г., для которого имелась достаточно подробная информация по отрасли (уровень I).

Для выплавки стали рассмотрены три основные технологические схемы: агломерация – доменный процесс – мартеновский процесс; агломерация – доменный процесс – кислородно-конвертерный процесс; электроплавка металлолома. При составлении энергобалансов этих процессов принимался среднеотраслевой уровень энергоиспользования, достигнутый на базовом уровне.

На основе результатов энергобалансов и в соответствии с принятой структурой выплавки стали для базового и расчетного уровней были определены среднеотраслевые удельные расходы энергоресурсов. Далее была выполнена оценка резервов энергосбережения за счет совершенствования процессов и оборудования в основных процессах металлургического производства жидкой стали – агломерационном, доменном, сталеплавильных. В таблице показано совокупное снижение среднеотраслевых удельных расходов энергоресурсов за счет как изменения структуры технологий, так и совершенствования существующих процессов и оборудования в металлургическом производстве.

Изменение среднеотраслевых удельных расходов энергоресурсов
в процессах выплавки стали за рассматриваемый период

Показатель	Доля техно- логических схем		Энергия, ГДж/т стали						
			хими- че- ская сырья	химическая топлива		элек- триче- ская	теп- ловая	суммарные затраты	
	уро- вень I	уро- вень II		всего	в т.ч. кокса, электродов			всего	в т.ч. традици- онных видов
По технологи- ческой схеме (уровень I)									
1	0,46	0,24	4,705	18,670	9,526	0,162	-	23,537	18,832
2	0,36	0,40	4,054	18,061	12,618	0,259	0,371	22,745	18,691
3	0,18	0,36	7,657	0,839	0,839	2,232	0,126	10,854	3,197
В среднем по отрасли:									
уровень I			5,008	15,949	9,156	0,640	0,316	21,913	16,905
уровень II			5,515	11,948	7,524	0,954	0,191	18,608	13,093
Изменение:									
ГДж			+0,507	-4,001	-1,632	+0,314	-0,125	-3,305	3,812

Таким образом, разработанная методика позволяет выполнить комплексное энергетическое исследование технических систем с целью получения совместной оценки термодинамической эффективности использования энергии, выявления резервов энергосбережения и определения удельных затрат энергии на перспективу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Степанов В.С. Потенциал и резервы энергосбережения в промышленности / В.С. Степанов, Т.Б. Степанова. Новосибирск: Наука, 1990. 248 с.
2. Степанов В.С. Эффективность использования энергии / В.С. Степанов, Т.Б. Степанова. Новосибирск: Наука, Сиб. отд., 1994. 257 с.
3. Степанов В.С. Система показателей для оценки эффективности использования энергии / В.С. Степанов, Т.Б. Степанова // Промышленная энергетика. 2000. № 1. С. 2-5.

Степанова Татьяна Борисовна –
доктор технических наук,
профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий»
Ангарской государственной технической академии

Статья поступила в редакцию 28.05.07, принята к опубликованию 05.12.07

УДК 539.3, 534.1

А.В. Крысько, Я. Авреичевич, Э.С. Кузнецова

**О ВЛИЯНИИ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ НА СЛОЖНЫЕ КОЛЕБАНИЯ
ЗАМКНУТЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ БАЛЛОНОВ**

Изучается влияние температурного поля на сложные колебания замкнутых цилиндрических оболочек при неравномерном внешнем давлении.

Построена математическая модель исследования напряженно-деформированного состояния и динамической потери устойчивости. В качестве метода исследования используется метод Бубнова – Галеркина по пространственным координатам, что сводит искомую задачу к изучению системы обыкновенных дифференциальных уравнений и системы алгебраических уравнений. Исследования проводятся с помощью качественной теории дифференциальных уравнений и нелинейной динамики. Показано, что учет температурного поля приводит к существенному увеличению площади хаотических колебаний в картах с управляющими параметрами $\{q_0, \omega_p\}$.

A.V. Krysko, J. Awrejcewicz, E.S. Kuznetsova

**ABOUT EFFECT OF THE TEMPERATURE FIELD
ON THE COMPOSITE VIBRATIONS
OF CLOSED CYLINDRICAL SHELLS AT THE EXTERNAL PRESSURE**

The effect of a temperature field on the composite of vibrations of closed cylindrical shells at action of cross sign-variable loading is in process studied here. For this purpose, the mathematical model of research of a tense - state of strain and dynamic losses of sustainability built. Researches will be spent by of Bubnov-Galerkin method on spatial coordinates that reduces a required problem to study of a system of ordinary differential equations and systems of the algebraic equations is used. The research is done with the help of the qualitative theory of differential equations and nonlinear dynamic. It is shown here, that the registration of a temperature field reduces in essential increase of the area of random of vibrations in « maps» with managing parameters $\{q_0, \omega_p\}$.

Введение

Замкнутые оболочечные системы находят широкое применение как элементы приборов и аппаратов в теплоэнергетике, в емкостном оборудовании атомной энергетики. В настоящий момент во многих случаях показано, что линейный анализ недостаточен для изучения колебаний сложных систем, из-за высоких внешних нагрузок и серьезных перегревов оболочечных систем. Это требует усложнения расчетных схем.

Энергетическая стратегия России предусматривает, что к 2010 году газовыми видами топлива должно быть заменено до 5 млн. тонн, а к 2020 году до 10-12 млн. тонн нефтепродуктов. Сегодня в России природный газ является основой топливно-энергетического баланса. На его долю приходится более 55% потребления энергоресурсов. Если говорить о природных ресурсах метана, то они на порядок превышают запасы нефти. В связи с актуальностью проблемы экономии топлива и утилизации вторичных энергоресурсов большое значение приобретают работы по созданию эффективной теплообменной аппаратуры. Баллоны для сжиженного природного газа, как правило, имеют цилиндрическую форму, то есть являются цилиндрическими оболочками, и условно подразделяются на четыре конструктивных типа, которые включают как баллоны, традиционно изготавливаемые из стали, так и облегченные баллоны, изготавливаемые с использованием полимерных композиционных материалов на основе стеклянных углеродных или органических волокон. Баллоны, устанавливаемые на передвижных автозаправщиках, рассчитаны на рабочее давление 250 или 320 атмосфер. Сжиженный природный газ хранится в специальной системе хранения, основу которой составляет криогенный бак.

Новые конструкторские разработки криогенных баков для транспортных средств с более дешевой тепловой изоляцией вместо дорогостоящей экранно-вакуумной, использование тепловых насосов – это экологически чистые компактные хладоновые установки, позволяющие использовать низкопотенциальное тепло для отопления, горячего водоснабжения и в технологических процессах, теплообменных аппаратов (эжекторы отсоса пара, маслоохладители, воздухоохладители, бойлерные установки) и т.д. – требуют дальнейшего развития анализа оболочек, которые находятся под воздействием внешних и температурных нагрузок.

При проектировании и эксплуатации энергетических установок большое внимание уделяется трубопроводам, связывающим тепловое оборудование в единое целое. Требование надежности трубопроводов – недопущение перегрузок или больших усилий на оборудование, а также сокращение их длин и габаритов придает расчетному анализу прочности и устойчивости трубопроводов весомое практическое значение. Трубопроводы энергоустановок находятся в сложных и тяжелых условиях нагружения, поэтому проблемы расчета прочности и устойчивости с учетом температурных напряжений, возникающих при нестационарных режимах работы, стали в последние годы весьма актуальными.

Вопросам исследования хаотических колебаний гибких пластин и оболочек в последнее время уделяется значительное внимание [1-12], в этих работах оболочечные системы рассмотрены как системы с N степенями свободы.

Существенный вклад в изучение нелинейных колебаний оболочек внесли J.M. Thomson и S.R. Bishop [13], A.N. Nayfen, D.T. Mook [14], R. Benamar [15], A.C. Вольмир [16], В.В. Болотин [17] и др. Авторы этих работ рассматривали цилиндрические оболочки как системы с одной степенью свободы, при этом метод Бубнова – Галеркина применялся в форме П.Ф. Папковича [18]. Первый обзор по проблеме исследования цилиндрических оболочек был сделан D.A. Evensen в 1974 [19]. В дальнейшем появились обзорные работы M. Sathyamorthy и K.A. Pandalai [20, 21], W. Leissa [22], M. Amabili [23] и других. В этих работах изучались системы с одной, максимум тремя степенями свободы, что явно недостаточно при изучении столь сложных с учетом геометрической нелинейности колебаний. Учет геометрической нелинейности в теории колебаний дает возможность выявить новые явления, которые совершенно не могут быть открыты на основе линейной теории.

Основные уравнения

В рамках нелинейной классической теории пологих оболочек рассмотрим замкнутую цилиндрическую оболочку кругового сечения конечной длины с постоянной жесткостью и плотностью при действии неравномерного знакопеременного внешнего давления, находящуюся в температурном поле. Введем систему координат: ось x направлена по продольной координате, ось y – по окружной координате, ось z – по нормали к срединной поверхности (рис. 1, а).

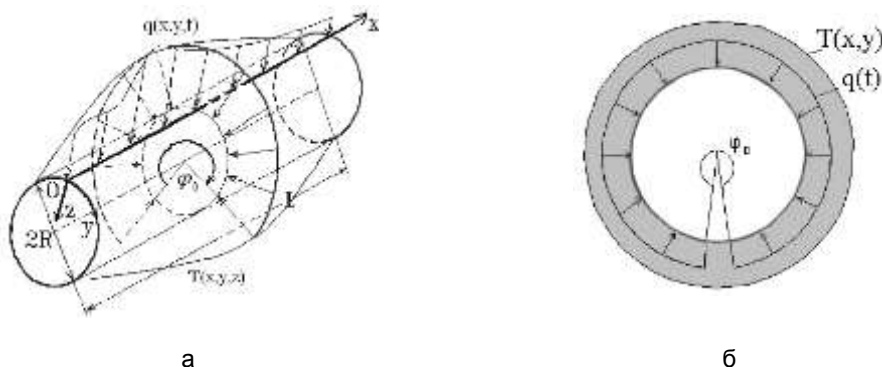


Рис. 1. Расчетная схема

Цилиндрическая оболочка как трехмерная область Ω в данной системе координат определяется $\Omega = \{x, y, z \mid (x, y) \in [0; L] \times [0; 2\pi], -h \leq z \leq h\}$.

На рис. 1, б показана форма поперечного сечения оболочки ($x=0,5, y \in [0; 2\pi]$) в недеформированном состоянии в начальный момент времени при нулевых значениях нагрузки и температуры. Температурное поле задано следующим образом: $T(x, y) = C \sin(\pi x) \sin(\pi y)$. Поперечное внешнее воздействие: $q(t) = q_0 \sin(\omega_p t)$, где ω_p – частота вынуждающей силы; q_0 – амплитуда вынуждающей силы.

Систему уравнений динамики оболочки запишем в безразмерном виде [1]:

$$\left\{ \frac{1}{12(1-\nu^2)} \left[\lambda^{-2} \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \lambda^2 \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right] - L(w, F) - k_y \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - \varepsilon \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{12(1-\nu^2)} \left(\lambda^{-1} \frac{\partial^2 M_t}{\partial x^2} + \lambda \frac{\partial^2 M_t}{\partial y^2} \right) \right\} + k_y^2 q(x, y, t) = 0;$$

$$\left\{ \lambda^{-2} \frac{\partial^4 F}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 F}{\partial x^2 \partial y^2} + \lambda^2 \frac{\partial^4 F}{\partial y^4} + \frac{1}{2} L(w, w) + k_y \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \lambda^{-1} \frac{\partial^2 N_t}{\partial x^2} + \lambda \frac{\partial^2 N_t}{\partial y^2} \right\} = 0. \quad (1)$$

Система (1) приведена к безразмерному виду с использованием следующих безразмерных параметров: $w = 2h\bar{w}$, $F = E_0(2h)^3\bar{F}$, $t = \frac{RL}{2h\sqrt{gE_0}}\bar{t}$, $\lambda = L/R$; $x = L\bar{x}$, $y = R\bar{y}$;

$k_y = \bar{k}_y \frac{2h}{R^2}$, $q = \bar{q} \frac{E_0(2h)^4}{L^2 R^2}$, где L и $R = R_y$ – длина и радиус оболочки. Здесь t – время; ε – коэффициент сопротивления среды, в которой происходит движение оболочки; F – функция усилий; w – функция прогиба; h – толщина оболочки; ν – коэффициент Пуассона; E_0 – модуль упругости; k_y – кривизна оболочки по y ; $L(w, F) = \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} - 2 \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y}$,

$L(w, w) = 2 \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 \right]$ – известные нелинейные операторы; $N_t = \frac{1}{h} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} Q dz$ – темпе-

ратурное усилие; $M_t = \frac{12}{h^3} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} Q z dz$ – температурный момент; $Q(x, y, z) = T - T_0$ – приращение

температуры; T_0 – начальная температура. Для краткости черточка над безразмерными величинами в уравнении (1) опущена.

В данной работе исследуем колебания шарнирно опертой по криволинейному кругу замкнутой цилиндрической оболочки с однородными граничными условиями [26]

$$w = 0; \quad \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0; \quad F = 0; \quad \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} = 0 \quad \text{при } x = 0; 1 \quad (2)$$

и нулевыми начальными условиями

$$w(x, y)|_{t=0} = 0, \quad \frac{\partial w}{\partial t}|_{t=0} = 0. \quad (3)$$

Метод исследования – метод Бубнова – Галеркина в представлении Фурье

Краевую задачу по пространственным координатам решаем методом Бубнова-Галеркина в высших приближениях. В данной работе функции w и F , являющиеся решениями, приближенно аппроксимируются аналитическим выражением, содержащим конечное

число произвольных параметров и представляются в виде произведения функций, зависящих от времени и от координат.

$$w = \sum_{i=0}^{N_1} \sum_{j=0}^{N_2} A_{ij}(t) \varphi_{ij}(x, y), \quad F = \sum_{i=0}^{N_1} \sum_{j=0}^{N_2} B_{ij}(t) \psi_{ij}(x, y), \quad (4)$$

где $\varphi_{ij}(x, y)$ и $\psi_{ij}(x, y)$ – некоторые заданные функции x, y , которые удовлетворяют следующим требованиям:

- 1- $\varphi_{ij}(x, y) \in H_A, \psi_{ij}(x, y) \in H_A$, где H_A – гильбертово пространство.
- 2- $\forall i, j$ функции $\varphi_{ij}(x, y)$ и $\psi_{ij}(x, y)$ линейно независимы, непрерывны вместе со своими частными производными до четвертого порядка включительно в области Ω .
- 3- $\varphi_{ij}(x, y)$ и $\psi_{ij}(x, y)$ удовлетворяют главным краевым условиям (и начальным условиям, если такие имеются) в точности.
- 4- $\varphi_{ij}(x, y)$ и $\psi_{ij}(x, y)$ обладают свойством полноты в H_A .
- 5- $\varphi_{ij}(x, y)$ и $\psi_{ij}(x, y)$ должны представлять собой N первых элементов полной системы функций.

Формат: Список

Коэффициенты $A_{ij}(t)$ и $B_{ij}(t)$ – искомые функции времени. Обозначим за Φ_1 и Φ_2 соответственно, левые части уравнений системы (1), находящиеся в фигурных скобках, тогда (1) примет вид:

$$\begin{aligned} \Phi_1 \left(w, F, \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}, \frac{\partial^2 F}{\partial x^2}, \dots; M_t, \frac{\partial^2 M_t}{\partial x^2}, \frac{\partial^2 M_t}{\partial y^2} \right) + k_y^2 q(x, y, t) &= 0, \\ \Phi_2 \left(w, F, \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}, \frac{\partial^2 F}{\partial x^2}, \dots; N_t, \frac{\partial^2 N_t}{\partial^2 x}, \frac{\partial^2 N_t}{\partial^2 y} \right) &= 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Применяя процедуру Бубнова – Галеркина к (5), получаем:

$$\begin{aligned} \int_0^1 \int_0^\xi \Phi_1 \varphi_{kl}(x, y) dx dy + \int_0^1 \int_0^\xi k_y^2 q(x, y, t) \varphi_{kl}(x, y) dx dy &= 0, \\ \int_0^1 \int_0^\xi \Phi_2 \psi_{kl}(x, y) dx dy = 0, \quad k = 0, 1, \dots, N_1; \quad l = 0, 1, \dots, N_2. \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь и далее $\xi=2\pi$ для замкнутой цилиндрической оболочки. С учетом (6) уравнения (5) записываются:

$$\begin{aligned} \sum_{kl} \left[\sum_{ij} A_{ij} S_{ijrskl} + \sum_{ij} B_{ij} C_{1,ijkl} + k_y^2 Q_{kl} + H_{1kl} - \sum_{ij} A_{ij} \sum_{rs} B_{rs} D_{1,ijrskl} - \sum_{ij} \left[\frac{d^2 A_{ij}}{dt^2} + \varepsilon \frac{dA_{ij}}{dt} \right] G_{ijkl} \right] &= 0, \\ \sum_{kl} \left[\sum_{ij} A_{ij} C_{2,ijkl} + \sum_{ij} B_{ij} \sum_{rs} P_{ijrskl} + \sum_{ij} A_{ij} \sum_{rs} A_{rs} D_{2,ijrskl} + H_{2kl} \right] &= 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Здесь знак $\sum_{kl}[*]$ перед каждым уравнением системы (7) указывает, что под данным уравнением понимается система kl такого вида уравнений, а интегралы процедуры Бубнова – Галеркина имеют вид:

$$\begin{aligned} S_{ijrskl} &= \int_0^1 \int_0^\xi \frac{1}{12(1-\nu^2)} \left[\frac{1}{\lambda^2} \frac{\partial^2 \varphi_{ij}}{\partial x^2} \frac{\partial^2 \varphi_{rs}}{\partial x^2} + \lambda^2 \frac{\partial^2 \varphi_{ij}}{\partial y^2} \frac{\partial^2 \varphi_{rs}}{\partial y^2} + 2 \frac{\partial^2 \varphi_{ij}}{\partial x \partial y} \frac{\partial^2 \varphi_{rs}}{\partial x \partial y} \right] \varphi_{kl} dx dy, \\ C_{1,ijkl} &= \int_0^1 \int_0^\xi \left[-k_y \frac{\partial^2 \psi_{ij}}{\partial x^2} \right] \varphi_{kl} dx dy, \quad C_{2,ijkl} = \int_0^1 \int_0^\xi \left[k_y \frac{\partial^2 \varphi_{ij}}{\partial x^2} \right] \psi_{kl} dx dy, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 D_{1,ijrskl} &= \int_0^{\xi} \int_0^{\xi} L(\varphi_{ij}, \psi_{rs}) \varphi_{kl} dx dy, \quad D_{2,ijrskl} = \int_0^{\xi} \int_0^{\xi} \frac{1}{2} L(\varphi_{ij}, \varphi_{rs}) \psi_{kl} dx dy, \\
 P_{ijrskl} &= \int_0^{\xi} \int_0^{\xi} \left[\frac{1}{\lambda^2} \frac{\partial^2 \psi_{ij}}{\partial x^2} \frac{\partial^2 \psi_{rs}}{\partial x^2} + \lambda^2 \frac{\partial^2 \psi_{ij}}{\partial y^2} \frac{\partial^2 \psi_{rs}}{\partial y^2} + 2 \frac{\partial^2 \psi_{ij}}{\partial x \partial y} \frac{\partial^2 \psi_{rs}}{\partial x \partial y} \right] \psi_{kl} dx dy, \\
 G_{ijkl} &= \int_0^{\xi} \int_0^{\xi} \varphi_{ij} \psi_{kl} dx dy, \quad Q_{kl} = \int_0^{\xi} \int_0^{\xi} \varphi_{kl} q(x, y, t) dx dy,
 \end{aligned} \tag{8}$$

$$H_{1kl} = \int_0^{\xi} \int_0^{\xi} \frac{1}{12(1-\nu^2)} \left[\lambda^{-1} \frac{\partial^2 M_t}{\partial x^2} + \lambda \frac{\partial^2 M_t}{\partial y^2} \right] \varphi_{kl} dx dy, \quad H_{2kl} = \int_0^{\xi} \int_0^{\xi} \left[\lambda^{-1} \frac{\partial^2 N_t}{\partial x^2} + \lambda \frac{\partial^2 N_t}{\partial y^2} \right] \psi_{kl} dx dy.$$

Интегралы (8) вычисляются по всей срединной поверхности оболочки, за исключением Q_{kl} , так как поперечная нагрузка приложена не ко всей поверхности оболочки. После применения процедуры Бубнова – Галеркина получена система дифференциальных уравнений в обыкновенных производных относительно функций $A_{ij}(t)$ и $B_{ij}(t)$, записанная в матричной форме:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{G}(\ddot{\mathbf{A}} + \varepsilon \dot{\mathbf{A}}) + \mathbf{S}\mathbf{A} + \mathbf{C}_1\mathbf{B} + \mathbf{D}_1\mathbf{A}\mathbf{B} &= \mathbf{Q}q(t) + \mathbf{H}_1, \\
 \mathbf{C}_2\mathbf{A} + \mathbf{P}\mathbf{B} + \mathbf{D}_2\mathbf{A}\mathbf{A} &= \mathbf{H}_2,
 \end{aligned} \tag{9}$$

где $\mathbf{G} = \|\|G_{ijkl}\|\|$, $\mathbf{S} = \|\|S_{ijrskl}\|\|$, $\mathbf{C}_1 = \|\|C_{1ijkl}\|\|$, $\mathbf{C}_2 = \|\|C_{2ijkl}\|\|$, $\mathbf{D}_1 = \|\|D_{1ijrskl}\|\|$, $\mathbf{D}_2 = \|\|D_{2ijrskl}\|\|$, $\mathbf{P} = \|\|P_{ijkl}\|\|$ – квадратные матрицы размерностью $2 \cdot N_1 \cdot N_2 \times 2 \cdot N_1 \cdot N_2$, $\mathbf{A} = \|A_{ij}\|$, $\mathbf{B} = \|B_{ij}\|$, $\mathbf{Q} = \|Q_{ij}\|$ – матрицы размерностью $2 \cdot N_1 \cdot N_2 \times 1$.

Далее второе уравнение системы (9) разрешается относительно матрицы \mathbf{B} и решается методом обратной матрицы на каждом шаге по времени (10):

$$\mathbf{B} = [-\mathbf{P}^{-1}\mathbf{D}_2\mathbf{A} - \mathbf{P}^{-1}\mathbf{C}_2]\mathbf{A} + \mathbf{P}^{-1}\mathbf{H}_2. \tag{10}$$

Умножая на \mathbf{G}^{-1} первое уравнение системы (9) и обозначая $\dot{\mathbf{A}} = \mathbf{R}$, приходим к задаче Коши для нелинейной системы уравнений первого порядка (11):

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{R}} = -\varepsilon \mathbf{R} + \mathbf{G}^{-1}\mathbf{D}_1\mathbf{A}\mathbf{B} - \mathbf{G}^{-1}\mathbf{S}\mathbf{A} + q(\bar{t})\mathbf{G}^{-1}\mathbf{Q} + \mathbf{G}^{-1}\mathbf{H}_1 \\ \dot{\mathbf{A}} = \mathbf{R} \end{cases} \tag{11}$$

Проведенное преобразование возможно, т.к. обратные матрицы \mathbf{G}^{-1} и \mathbf{P}^{-1} существуют, если координатные функции линейно независимы.

К уравнениям (11) присоединяем краевые и начальные условия, полученную задачу Коши решаем методом Рунге-Кутты четвертого порядка точности. Шаг по времени выбирается по правилу Рунге.

Удовлетворяя условиям шарнирного опирания (2)-(3), φ_{ij}, ψ_{ij} из (4) представим в виде произведения двух функций, каждая из которых зависит только от одного аргумента

$$w = \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=0}^{N_2} A_{ij}(t) \sin(i\pi x) \cos(jy), \quad F = \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=0}^{N_2} B_{ij}(t) \sin(i\pi x) \cos(jy). \tag{12}$$

Интегралы процедуры Бубнова – Галеркина вычисляются по формулам:

$$\begin{aligned}
 I_{1,i} &= \int_0^1 \sin(i\pi x) dx = \begin{cases} 0, & i = 0, 2, 4, \dots \\ \frac{2}{i\pi}, & i = 1, 3, 5, \dots \end{cases}, & I_{2,ik} &= \int_0^1 \sin(i\pi x) \sin(k\pi x) dx = \begin{cases} \frac{1}{2}, & i = j, \\ 0, & i \neq j, \end{cases} \\
 I_{1,j} &= \int_0^{2\pi} \cos(jy) dy = 0,
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 I_{2,jl} &= \int_0^{2\pi} \cos(jy) \cos(ly) dy = \begin{cases} \frac{1}{4} \left[\frac{\sin(2\pi\alpha_1)}{\alpha_1} + \frac{\sin(2\pi\alpha_2)}{\alpha_2} \right], & \alpha_z \neq 0, \quad z=1; \\ \frac{\sin(2\pi\alpha_2)}{\alpha_2} \approx 2\pi, & \alpha_z = 0, \quad z=1; \end{cases} \quad (13) \\
 I_{3,ikr} &= \int_0^1 \sin(i\pi x) \sin(r\pi x) \sin(k\pi x) dx = \begin{cases} \frac{1}{4\pi} \left[\frac{\cos(\beta_1\pi)}{\beta_1} - \frac{\cos(\beta_2\pi)}{\beta_2} - \frac{\cos(\beta_3\pi)}{\beta_3} - \frac{\cos(\beta_4\pi)}{\beta_4} + \right. \\ \left. + \frac{1}{\beta_1} + \frac{1}{\beta_2} + \frac{1}{\beta_3} + \frac{1}{\beta_4} \right], & \beta_v \neq 0; \\ \left[\frac{\cos(\beta_v\pi)}{\beta_v} \approx 0, \frac{1}{\beta_v} \approx 0 \right], & v=1,2,3, \quad \beta_v = 0; \end{cases} \\
 I_{3,jls} &= \int_0^{2\pi} \cos(jy) \cos(sy) \cos(ly) dy = \begin{cases} \frac{1}{4} \left[\frac{\sin(2\pi\gamma_1)}{\gamma_1} + \frac{\sin(2\pi\gamma_2)}{\gamma_2} + \frac{\sin(2\pi\gamma_3)}{\gamma_3} + \frac{\sin(2\pi\gamma_4)}{\gamma_4} \right], & \gamma_v \neq 0; \\ \frac{\sin(2\pi\gamma_v)}{\gamma_v} \approx 2\pi, \quad v=1,2,4 & \gamma_v = 0; \end{cases} \\
 I_{4,ikr} &= \int_0^1 \cos(i\pi x) \cos(r\pi x) \sin(k\pi x) dx = \begin{cases} \frac{1}{4\pi} \left[\frac{\cos(\beta_1\pi)}{\beta_1} - \frac{\cos(\beta_2\pi)}{\beta_2} - \frac{\cos(\beta_3\pi)}{\beta_3} - \frac{\cos(\beta_4\pi)}{\beta_4} - \right. \\ \left. - \frac{1}{\beta_1} + \frac{1}{\beta_2} + \frac{1}{\beta_3} + \frac{1}{\beta_4} \right], & \beta_v \neq 0; \\ \left[\frac{\cos(\beta_v\pi)}{\beta_v} \approx 0, \frac{1}{\beta_v} \approx 0 \right], & v=1,2,3, \quad \beta_v = 0; \end{cases} \\
 I_{4,jls} &= \int_0^{2\pi} \sin(jy) \sin(sy) \cos(ly) dy = \begin{cases} \frac{1}{4} \left[\frac{\sin(2\pi\gamma_1)}{\gamma_1} + \frac{\sin(2\pi\gamma_2)}{\gamma_2} - \frac{\sin(2\pi\gamma_3)}{\gamma_3} - \frac{\sin(2\pi\gamma_4)}{\gamma_4} \right], & \gamma_v \neq 0; \\ \frac{\sin(2\pi\gamma_v)}{\gamma_v} \approx 2\pi, \quad v=1,2,4 & \gamma_v = 0. \end{cases}
 \end{aligned}$$

Здесь:

$$\begin{aligned}
 \alpha_1 &= j+l, \quad \alpha_2 = j-l, \\
 \beta_1 &= i+r-k, \quad \beta_2 = -i+r+k, \quad \beta_3 = i-r+k, \quad \beta_4 = i+r+k, \\
 \gamma_1 &= j-s+l, \quad \gamma_2 = j-s-l, \quad \gamma_3 = j+s+l, \quad \gamma_4 = j+s-l,
 \end{aligned}$$

Далее введем обозначения

$$I_Q^{kl} = M \cdot I_{li} I_{lj}, \quad M = k_y^2, \quad I_{AB}^{kl} = r^2 k_y \pi^2 I_{2,ik} I_{2,jl}, \quad I_{H_1}^{kl} = C \frac{2\pi^2}{\lambda} I_{li} I_{lj}, \quad I_{H_2}^{kl} = C 2\pi^2 \lambda I_{li} I_{lj},$$

$$I_{ijklrs} = \pi^2 [(i^2 l^2 + j^2 k^2) I_{3ikr} I_{3jls} - 2ijkl I_{4ikr} I_{4jls}], \quad I_{kl}^t = I_{2,ik} I_{2,jl},$$

$$J_{1,ijkl}^{kl} = \frac{\pi^2}{12(1-\nu^2)} \left[\frac{r^4}{\lambda^2} + 2r^2 s^2 + \lambda^2 s^4 \right] \cdot I_{2,ir} I_{2,js}, \quad J_{2,ijkl}^{kl} = \left[\frac{r^4}{\lambda^2} + 2r^2 s^2 + \lambda^2 s^4 \right] \cdot \pi^2 I_{2,ir} I_{2,js}.$$

Тогда с учетом выписанных интегралов система (11) запишется в виде следующей системы нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка по времени относительно коэффициентов A_{ij} и B_{ij} (14) и системы линейных алгебраических уравнений относительно коэффициентов A_{ij} и B_{ij} (15):

$$\sum_{kl} \left\{ \sum_{ij} \sum_{rs} \left[J_{1,ijkl}^{kl} A_{ij} + I_{AB}^{kl} B_{rs} + I_Q^{kl} q(t) + A_{ij} B_{kl} I_{ijklrs} + \left(\frac{d^2 A_{ij}}{dt^2} + \varepsilon \frac{dA_{ij}}{dt} \right) I_{kl}^t \right] \right\} = 0; \quad (14)$$

$$\sum_{kl} \left\{ \sum_{ij} \sum_{rs} \left[J_{2,ijkl}^{kl} B_{ij} + I_{AB}^{kl} A_{rs} + I_{H_1}^{kl} + I_{H_2}^{kl} + \frac{1}{2} A_{ij} A_{kl} I_{ijklrs} \right] \right\} = 0. \quad (15)$$

Далее второе уравнение системы (15) разрешается относительно матрицы **B**. Подставляя найденные коэффициенты B_{kl} в (14), получаем систему дифференциальных уравнений 2-го порядка по t относительно коэффициентов A_{kl} , которая сводится к нормальной и решается методом Рунге – Кутты четвертого порядка точности.

Исследование вопроса о влиянии температурного поля

Прежде чем начать исследование влияния температурного поля на колебания цилиндрической оболочки, рассмотрим сходимость метода Бубнова – Галеркина в зависимости от N_2 в (12). Так как нагрузка прикладывается по всей длине цилиндрической оболочки, то число членов ряда по координате x не играет роли и можно удержать в (12) один член ряда, поэтому исследуем зависимость полученных результатов от количества членов ряда по окружающей координате y .

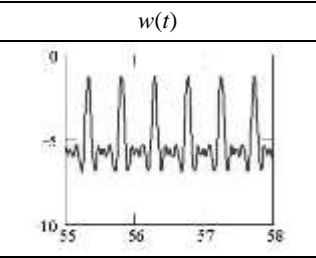
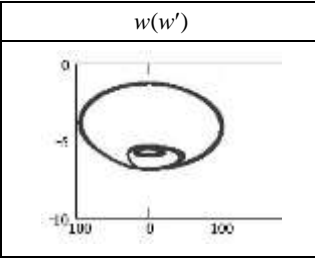
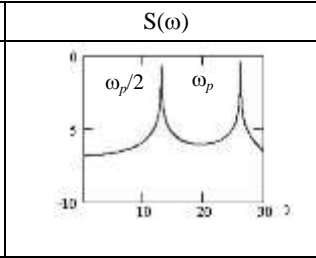
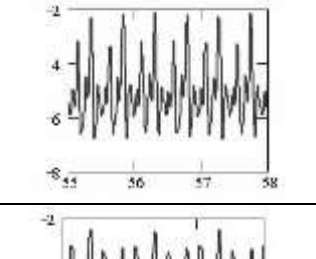
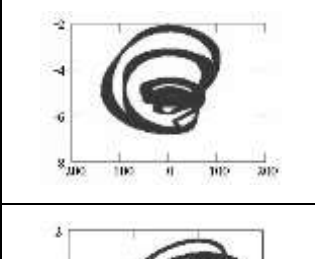
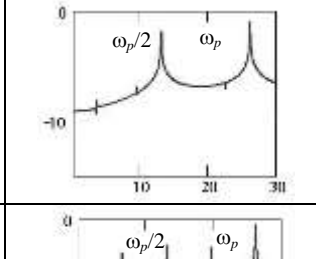
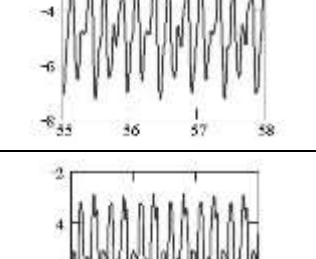
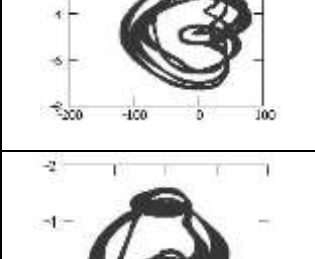
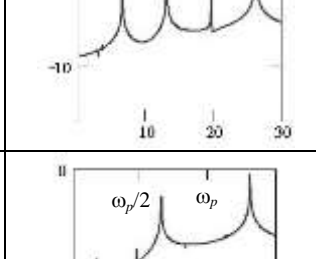
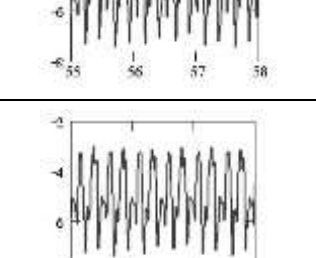
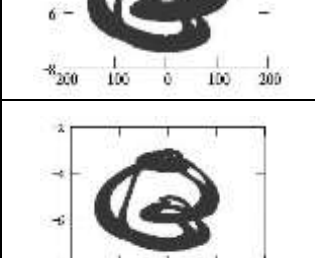
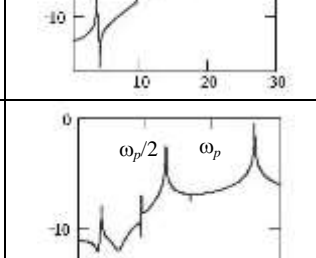
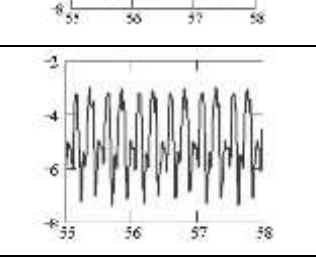
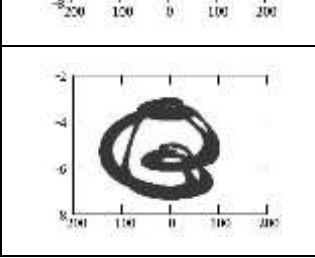
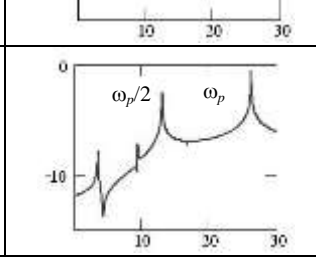



В данной статье изучаются колебания оболочки с параметрами $k_y=112,5$ при $\lambda=2$, $\varepsilon=9$, находящейся в температурном поле $T(x, y, z) = C \sin(\pi x) \sin(\pi y)$, под действием поперечной нагрузки $q(t) = q_0 \sin(\omega_p t)$, приложенной по полосе $0 \leq \varphi \leq 1,9\pi$, $0 \leq x \leq 1$, $\omega = \omega_p = 26,176$. Исследуя вопрос о выборе количества членов ряда в разложении искомых функций (12) на точность получаемых решений, примем $N_2=5, 7, 9, 13, 15, 17$ при $q_0=0,24$, $C=30$. Данные о сходимости метода Бубнова – Галеркина по спектру мощности приведены в табл. 1, где указаны основные характеристики: сигнал $w(t; x_0; y_0)$, фазовый портрет $w(w')$, спектр мощности $S(\omega)$. Из табл. 1 следует, что совпадение по спектру мощности и по сигналу происходит при $N_2 \geq 13$, дальнейшее увеличение числа членов ряда в разложении искомых функций не приводит к существенным изменениям, а так как расчеты с более высокими приближениями требуют больших затрат машинного времени, то целесообразнее проводить их при $N_2=13$. Далее, говоря о сходимости метода Бубнова – Галеркина, будем подразумевать сходимость в среднем, т.е. сходимость по спектрам мощности, при этом сходимость в сигнале может отсутствовать. Анализируя спектры мощности, мы наблюдаем присутствие независимых частот, их линейных комбинаций и бифуркаций Андронова – Хопфа, но для более полного анализа состояния системы необходимы так называемые «карты» колебаний оболочки при различных значениях температуры и внешней нагрузки. «Карта» представляет собой плоскость (q_0, ω_p) , C – управляющий параметр, амплитуда температуры. Каждая точка «карты» окрашена цветом, обозначающим тот или иной характер колебаний. Таким образом, мы получаем информативное визуальное представление о поведении систем [25]. Расчеты проводились для $N_1=1$, $N_2=7$, множество параметров (q_0, ω_p) покрывалось сеткой 300×300 , то есть требовалось решить и проанализировать $9 \cdot 10^4$ задач. Каждая задача анализировалась на основании качественной теории дифференциальных уравнений и нелинейной динамики. Анализировались спектры мощности, фазовые портреты, ляпуновские показатели, сигналы, отображение Пуанкаре.

На рис. 2 представлены три «карты». На рис. 2, а изображена «карта», построенная без теплового воздействия, то есть параметр $C=0$ в формуле $T(x, y) = C \sin(\pi x) \sin(\pi y)$, на рис. 2, б – «карта», где $C=10$, и на рис. 2, в – параметр температуры принимался $C=50$.

Вид «карты» существенно изменяется при увеличении значения параметра температуры и лишь при малых значениях $0 \leq q_0 \leq 0,2$ совпадают зоны гармонических колебаний, при увеличении значений $q_0 \geq 0,2$ при $C=10$, система переходит в состояние хаотических колебаний, но при увеличении параметра $C=50$ присутствуют значительные зоны бифуркаций Андронова – Хопфа, на низких частотах увеличивается зона гармонических колебаний, но дальнейшее увеличение нагрузки приводит к значительной площади хаотических колебаний, то

есть поведение системы качественно изменяется. Анализ карты $\{q_0, \omega\}$ показывает, что для низких значений амплитуды вынуждающей нагрузки поведение оболочки характеризуется гармоническими колебаниями. С возрастанием q_0 при низких значениях частоты возбуждения ω_p появляются зоны хаоса, которые чередуются с зонами гармонических колебаний и полосами бифуркаций.

Таблица 1

N_2	$w(t)$	$w(w')$	$S(\omega)$
5			
7			
9			
13			
15			
17			

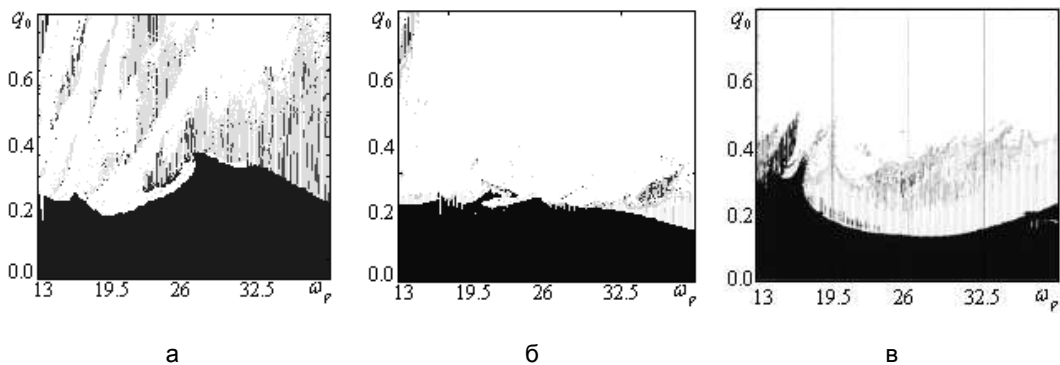


Рис. 2. Карты динамических режимов в зависимости от управляющих параметров $\{q_0, \omega_p\}$

Для исследования пространственных колебаний изучались формы волнообразования цилиндрической оболочки при $0 \leq x \leq 1; 0 \leq y \leq 2\pi$ и формы поперечного сечения $x = 0,5; 0 \leq y \leq 2\pi$, для изучения влияния температурного поля на напряженно-деформируемое состояние строились поверхности прогиба, усилий и изгибающего момента для параметра температуры $C=0$ и $C=50$. Вместе с тем исследовалась зависимость $w_{\max}(C)$ при фиксированных значениях амплитуды частоты вынуждающей нагрузки q_0 , а также зависимость $w_{\max}(q_0)$ при фиксированном значении частоты вынуждающей силы $\omega_p = \omega_0$ (ω_0 – частота собственных линейных колебаний) и «шкалы характера колебаний». Изучение зависимостей $w_{\max}(C)$ для каждого C позволяет установить зоны потери устойчивости системы при воздействии температурного поля, а также в его отсутствие. С помощью «шкал» характера колебаний оболочки можно проследить процесс перехода колебаний от гармонических в хаотические и определить границы значений, при которых температурное воздействие приводит к необратимым изменениям в оболочке. Проанализируем явление стабилизации процесса хаотических колебаний и потери устойчивости цилиндрической оболочки в зависимости от параметра C . Для этого воспользуемся зависимостью $w_{\max}(q_0)$ для каждого фиксированного значения C и зависимостью $w_{\max}(C)$ для некоторых фиксированных значений q_0 и рассмотрим зоны потери устойчивости и все основные характеристики в некоторых контрольных точках, соответствующих состоянию оболочки до и после потери устойчивости.

Зафиксируем значение частоты вынуждающей силы $\omega_p = \omega_0 = 26,176$ и выведем «шкалы» характера колебаний, построенные на основе спектра мощности. Данная «шкала» представляет собой фрагмент «карты» управляющих параметров, узкую полосу, вырезанную на частоте $\omega_p = 26,176$ при изменении значений амплитуды нагрузки q_0 . На рис. 3 приведены «шкалы» динамического режима системы при изменении значений параметра амплитуды нагрузки $0 \leq q_0 \leq 0,4$. На рис. 3, а представлена «шкала» при отсутствии температурного воздействия, то есть параметр температуры $C=0$, на рис. 3, б – амплитуда температуры была зафиксирована и принята $C=10$, а на рис. 3, в $C=50$. Из данного рисунка видно, что при увеличении параметра температуры и одновременно параметра нагрузки уменьшается зона гармонических колебаний и соответственно увеличивается зона хаоса, пограничных зон перехода в хаос, то есть зон бифуркаций нет, а присутствуют зоны суперпозиции частот.

Из зоны суперпозиции частот «шкалы», представленной на рис. 3, а, зафиксируем $q_0 = 0,24$. Исследуем поведение системы при фиксированном q_0 и изменении параметра температуры $0 \leq C \leq 50$.

Для анализа состояния системы в точках **A1** и **A2** соответственно до и после потери устойчивости при полосовом нагружении и действии температурного поля рассматриваются

формы изгиба оболочки и формы поперечного сечения цилиндрической оболочки в определенный момент времени, построены следующие характеристики: сигнал $w(t; x_0; y_0)$, фазовый портрет $w(w')$, спектр мощности $S(\omega)$, сечение Пуанкаре, $w_i(w_{i+T})$ (табл. 2). В точке **A1** в сечении Пуанкаре наблюдается группа из четырех точек, а в фазовом портрете две петли, поэтому можно говорить о присутствии в этой точке бифуркации Хопфа.

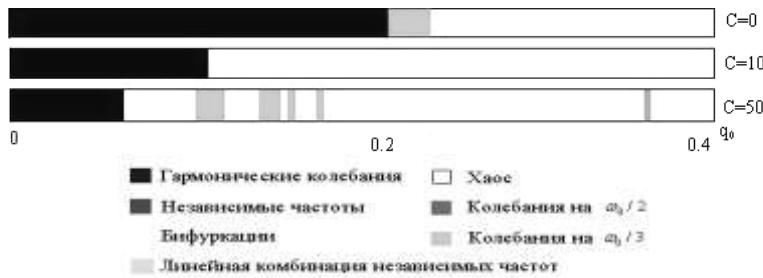
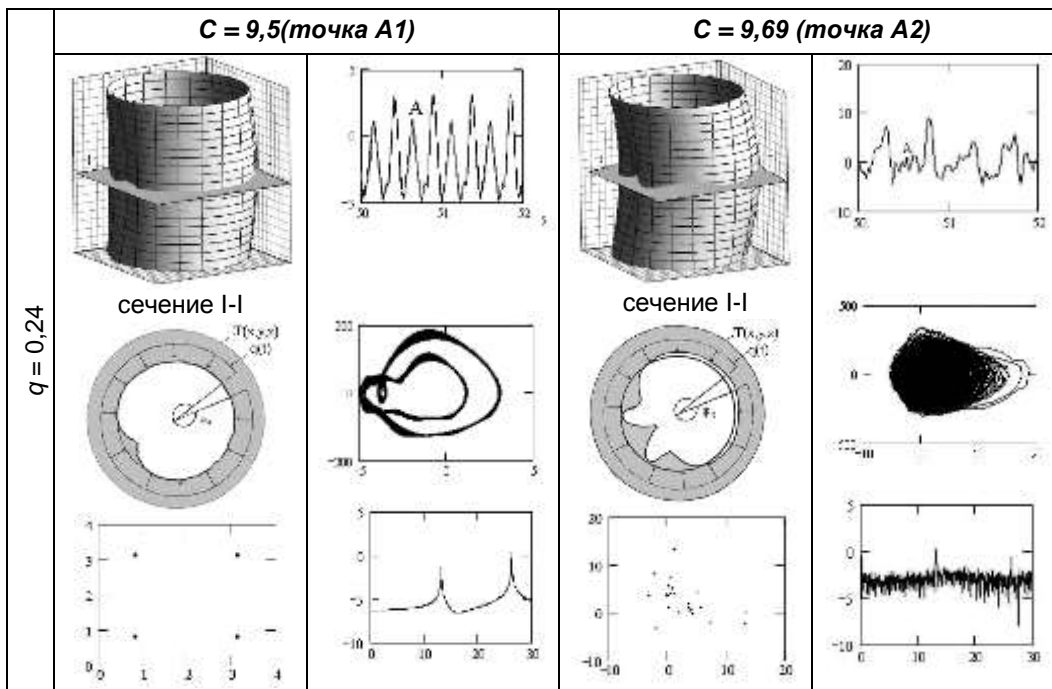


Рис. 3. «Шкалы», отображающие поведение системы при изменении q_0

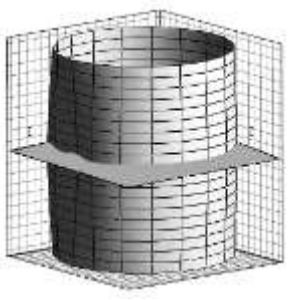


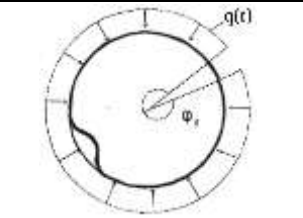
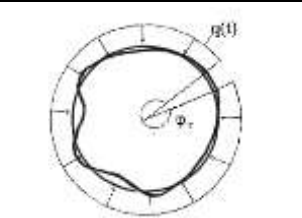
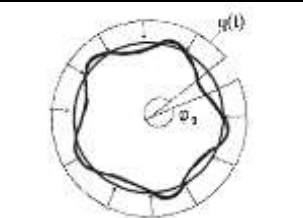
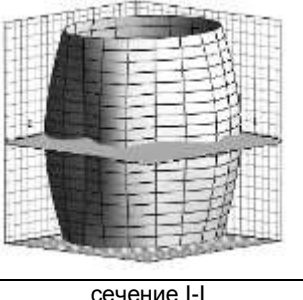
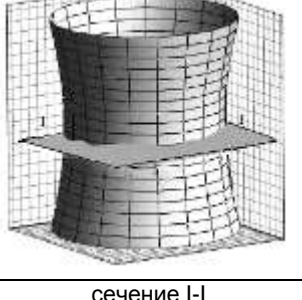
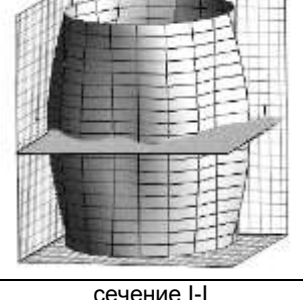
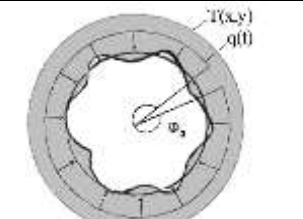
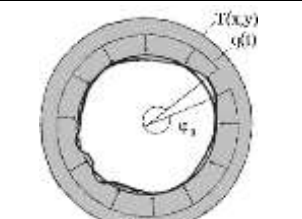
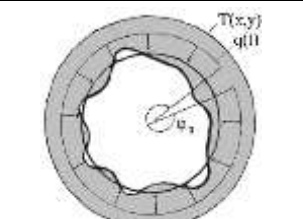
Таблица 2



Сечение I-I было получено следующим образом: цилиндрическая поверхность рассекалась плоскостью, проходящей через ось цилиндра, на две равные половины. Форма изгиба оболочки приобретает локальный характер и формируется одна вмятина под полосой давления. При переходе системы в состояние, соответствующее точке **A2** на графике, форма изгиба оболочки изменяется, а в фазовом портрете и на сигнале наблюдаются хаотические коле-

бания, произошла потеря устойчивости системы при незначительном увеличении параметра температуры. В поперечном сечении цилиндрической оболочки в точке **A2** наблюдается увеличение числа полуволн, прогибы увеличиваются и оболочка выпучивается в той зоне, где нагрузка не приложена, то есть система находится в состоянии хаоса.

Таблица 3

	$w(t, x_0, y_0)$	F_n	M'
C=0			
	сечение I-I	сечение I-I	сечение I-I
			
C=50			
	сечение I-I	сечение I-I	сечение I-I
			

Для полноты представления о состоянии оболочки в данный момент времени необходимо исследовать напряженно-деформированное состояние этой оболочки. Выражения для изгибающих моментов имеют вид: $M_x = -\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right)$, $M_y = -\left[\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\right]$, в табл. 3

приведены формы изгиба оболочки и формы поперечного сечения цилиндрической оболочки для изгибающего момента $M^* = M_x + M_y$, для функции усилий $F_n = \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 F}{\partial y^2}$. При отсутствии температурного поля $C=0$, на цилиндре сначала образуется вмятина в зоне приложения нагрузки, такое же состояние характерно и при небольшом значении параметра $0 \leq C \leq 5$, но при значении параметра амплитуды температуры $C=50$, после потери устойчивости форма изгиба оболочки изменяется, увеличивается число полувогн и прогибы наблюдаются по всей поверхности. Полувогны расположены симметрично относительно центральной оси, но в зоне приложения нагрузки прогиб более выражен, чем в остальных зонах, а в зоне отсутствия нагрузки наблюдается небольшая вмятина, что также указывает на присутствие температурного поля, изменяющегося по заданному периодическому закону.

Во втором столбце табл. 3 при отсутствии температурного поля в форме изгиба функции усилий присутствует восемь полувогн, которые переходят в шесть полувогн при $C=50$, но вид формы изгиба оболочки изменяется. Если при нулевом значении параметра температуры в зоне приложения нагрузки наблюдается выпучивание оболочки, то при наличии температурного поля в этой же зоне наблюдается прогиб, а в зоне отсутствия нагрузки – выпучивание. Для формы изгибающего момента характерно распространение волн деформации по всей поверхности, характер образования вмятин существенно изменяется, увеличиваются прогибы в зонах приложения как нагрузки, так и температурного воздействия, происходит усиление давления на стенки цилиндра как со стороны внешней нагрузки, так и теплового воздействия. Волны деформации распространяются по всей поверхности, захватывая новые области и вызывая увеличение прогибов. А при $C=50$ наблюдается изменение формы срединной поверхности и происходит выпучивание оболочки по границам приложения нагрузки $q(t)$ и увеличивается число полувогн.

Заключение

В результате проведенных исследований выявлено, что характер колебаний, а также точность получаемых решений существенно зависят от количества членов ряда в разложении искомых функций.

Учет внешнего температурного поля при полосовой знакопеременной нагрузке $0 \leq \varphi \leq 1,9\pi$ увеличивает область хаотических колебаний рис. 2, б и в. При большой площади внешнего давления области хаоса сосредоточены при $q_0 \geq 0,4$, при этом суммарная площадь зон хаоса существенно велика, также значительны области бифуркаций Андронова – Хопфа.

Для напряженно-деформируемого состояния оболочки, находящейся под влиянием температурного поля, характерно увеличение числа прогибов и распространения волн деформации по всей поверхности оболочки.

При увеличении значений параметра температурного поля происходит динамическая потеря устойчивости системы и переход её в качественно новое состояние.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ для поддержки молодых российских ученых МД-932.2006.1, договор № 02.120.11.32.2 от 20 апреля 2006 г. и при поддержке гранта РФФИ номер проекта 06-08-01357.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авдуевский В.С. Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике / В.С. Авдуевский, Б.М. Галицейский, Г.А. Глебов; под общ. ред. В.С. Авдуевского, В.К. Кошкина. М.: Машиностроение, 1992. 528 с.
2. Васильев Л.Л. Интенсификация теплообмена в тепловых трубах / Л.Л. Васильев, С.В. Конев, В.В. Хроленок. М.: Наука и техника, 1983. 152 с.

3. Awrejcewicz J. Feigenbaum Scenario Exhibited by Thin Plate Dynamics / J. Awrejcewicz, V.A. Krysko // *Nonlinear Dynamics*. 2001. № 24. P. 373-398.
- 4/ Awrejcewicz J. Spatial-Temporal Chaos and Solutions Exhibited by Von Karman Model / J. Awrejcewicz, V. Krysko, A. Krysko // *International Journal of Bifurcations and Chaos*. 2002. Vol. 12. № 7. P. 1465-1513.
5. Awrejcewicz J. Analysis of complex parametric vibrations of plates and shells using Bubnov – Galerkin approach / J. Awrejcewicz, A.V. Krysko // *Archive of Applied Mathematics*. 2003. № 73. P. 495-504.
6. Awrejcewicz J. Nonclassic Thermoelastic Problem in Nonlinear Dynamics of Shells / J. Awrejcewicz, V. Krysko. Springer-Verlag, Berlin, New York, London, Paris, Tokyo. 2003. 430 p.
7. Awrejcewicz J. Nonlinear Dynamics of Continuous Elastic Systems / J. Awrejcewicz, V.A. Krysko, A.F. Vakakis. Springer-Verlag, Berlin, New York, London, Paris, Tokyo. 2004. 356 p.
8. Chaotic vibrations of closed cylindrical shells in a temperature field / E.S. Kusnetsova, A.V. Krysko, J. Awrejcewicz, V.A. Krysko // *International Journal of Bifurcation and Chaos*. 2008. № 18 (5).
9. Крысько В.А. Хаотические колебания конических оболочек / В.А. Крысько, Т.В. Щекатурова // *Известия РАН. Механика твердого тела*. 2004. № 4. С. 140-150.
10. Крысько В.А. Управление хаотическими колебаниями гибких сферических оболочек / В.А. Крысько, И.В. Кравцова // *Известия РАН. Механика твердого тела*. 2005. № 1. С. 140-150.
11. Awrejcewicz J. Thermo-Dynamics of Plates and Shells / J. Awrejcewicz, V. Krysko, A. Krysko. Springer-Verlag, Berlin, New York, London, Paris, Tokyo. 2007. 777 p.
12. Кузнецова Э.С. Исследование хаотических колебаний прямоугольных пластинок при действии поперечной знакопеременной нагрузки в температурном поле / Э.С. Кузнецова, В.А. Крысько // *Известия вузов. Машиностроение*. 2006. № 1. С. 3-9.
13. Thomson J.M.T. Non-linearity and Chaos in Engineering Dynamics / J.M.T. Thomson, S.R. Bishop. Centre for Non-linear Dynamics, University College London, U.K.: John Wiley&Sons. 1994. 240 p.
14. Nayfen H. Non-linear Oscillations / H. Nayfen, D.T. Mook. New York: John Wiley&Sons. 1979. 280 p.
15. Benamar R. The effects of large vibration amplitudes on the mode shapes and natural frequencies of thin elastic structures. Part II: fully clamped rectangular isotropic plates / R. Benamar, M.M. Bennouna, R.G. White // *Journal of Sound and Vibration*. 1993. № 164. P. 295-316.
16. Вольмир А.С. Нелинейная динамика пластин и оболочек / А.С. Вольмир. М.: Наука, 1972. 432 с.
17. Болотин В.В. Динамическая устойчивость упругих систем / В.В. Болотин. М.: Гостехиздат, 1956. 450 с.
18. Папкович П.Ф. Труды по строительной механике корабля: в 4 т. / П.Ф. Папкович / Л.: Судпромгиз, 1962. Т. 3. 527 с.
19. Evensen D.A. In *Thin Walled Structures: Theory, Experiment and Design* / D.A. Evensen; editors Y.C. Fung, E.E. Sechler. New York: Prentice-Hall, 1974. P. 133-155.
20. Sathyamorthy M. Large amplitude vibrations of certain deformable bodies. Part I: disc, membranes and rings / M. Sathyamorthy и К.А. Pandalai // *Journal of the Aeronautical Society of India*. 1972. № 24. P. 409-414.
21. Sathyamorthy M. Large amplitude vibrations of certain deformable bodies. Part II: plates and shells / M. Sathyamorthy, К.А. Pandalai // *Journal of the Aeronautical Society of India*. 1973. № 25. P. 1-10.
22. Leissa W. *Vibration of Shells* / W. Leissa / Acoustical Society of America. 1993. 428 p.

23. Amabili M. Non-linear vibration of simply supported circular cylindrical shells coupled to quiescent fluid / M. Amabili, F. Pellicano, M.P. Paidoussis // Journal of Fluids and Structures. 1998. № 12. P. 883-918.

24. Крысько В.А. Сравнение различных методов на примере задачи моделирования колебаний гибких бесконечно длинных пластин при действии продольных знакопеременных нагрузок / В.А. Крысько, Г.Г. Наркайтис // Труды XXI Междунар. конф. по теории пластин и оболочек. Саратов: СГТУ, 2005. С. 281-288.

25. Корнишин М.С. Нелинейные задачи теории пластин и пологих оболочек и методы их решения / М.С. Корнишин. М.: Наука, 1964. 192 с.

Крысько Антон Вадимович –

доктор физико-математических наук,
профессор кафедры «Прикладная математика и теория навигационных приборов»
Саратовского государственного технического университета

Аврейцевич Ян –

профессор, заведующий кафедрой «Автоматика и биомеханика»
Технического университета г. Лодзь (Республика Польша)

Кузнецова Элла Сергеевна –

аспирант кафедры «Высшая математика»
Саратовского государственного технического университета

Статья поступила в редакцию 04.09.07, принята к опубликованию 05.12.07

УДК 678.046.3

С.Е. Артеменко, Ю.А. Кадыкова

**БАЗАЛЬТОПЛАСТИКИ –
ЭФФЕКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ**

Проведен анализ использования базальтовых волокон для различных отраслей промышленности, так как базальтопластики вытесняют металл, стеклопластики, асбест и другие материалы в широкой палитре областей их применения за счет высоких эксплуатационных характеристик, огнестойкости, нетоксичности, дешевизны и доступности сырья, возможности организации безотходных производств.

S.E. Artemenko, Yu.A. Kadykova

**BAZALITOPLASTIKI –
AN EFFICIENT MATERIAL FOR HEAT-POWER ENGINEERING**

Analyses of using basalt fibers for different industrial branches are done in the article. Basalt plastics are widely used and force out metals, glass plastics, and others materials. Materials based on basalt find wide application because of fire resistance, cheapness and other necessary properties for its application, recycling and waterproof production.

Среди новых материалов, которые требуются для решения острых проблем в теплоэнергетике, особенно перспективны базальтопластики. Для их производства в качестве армирующей основы применяется широкий ассортимент базальтовых волокон, исходным сырьем для которых служат базальты (рис.1) – магматические горные породы. Базальты содержат (по массе): 45-53% SiO_2 , 10-20% Al_2O_3 , до 20% окислов железа, магния, натрия и калия. В РФ базальты распространены повсеместно: Камчатка, Сибирь, Урал, Карелия, они есть и практически во всех странах СНГ. Разведанные запасы базальта свидетельствуют, что для нашей страны это такой же дар природы, как и нефть, газ, уголь, древесина (рис. 1).



Рис. 1. Массивы магматических горных пород – базальтов

Освоенные в последние годы технологии выпуска изделий из базальта доказали, что они могут заменить металл, который служит человечеству несколько тысячелетий.

Сфера применения базальтовых волокон успешно расширяется: теплоизоляция для мощных энергетических и криогенных установок, звукоизоляция, волокна с малым диаметром используются в качестве фильтров для газов и жидкостей, сорбентов, носителей катализаторов в химических реакторах. Полимерные композиционные материалы (ПКМ), армированные базальтовыми нитями и тканями, перспективны для замены металлов в различных агрессивных средах и в областях высоких температур.

На основе базальтовых волокон развивается широкий ассортимент изделий [1, 2].

Теплозвукоизоляционные и звукопоглощающие материалы: прошивные маты, рулонная теплоизоляция, плиты, шнуры, картон взамен асбестового и др. плотностью от 20 до 200 кг/м^3 ; с коэффициентом теплопроводности от 0,0279 до 0,0337 $\text{Вт/(м}\times\text{К)}$ при средней температуре 0°C; коэффициент звукопоглощения 0,80-0,98 при частотах 200-1800 Гц.

Фильтрационные материалы: базальтоволокнистые фильтрующие маты гидротехнических дренажных систем с коэффициентом фильтрации 0,58-0,93 см/с ; фильтры для очистки и стерилизации воздушных и газовых сред с коэффициентом фильтрующего действия от 0,681 до 0,912, эффективностью фильтрации до 99,7%.

Конструкционные армирующие материалы: базальтопластики листовые, профильные, трубы и т. п.; мелкодисперсная фибра как армирующий заменитель асбестовых волокон и других ПКМ; крупнодисперсная фибра – заменитель металлической арматуры в строительных конструкциях на минеральных вяжущих; то же рулонные и пакетированные базальтоволокнистые армокаркасы; износостойкие детали (валы, шестерни); смазки.

Базальтовые чешуйчатые материалы как антикоррозионные покрытия; защитная посыпка рулонных кровельных материалов на битумной основе; теплоизоляционные и электроизоляционные материалы.

В отечественной и зарубежной практике в качестве армирующего материала для ПКМ, в том числе теплоэнергетического и строительного назначения, применяются стеклян-

ные непрерывные волокна, которые обладают высокой прочностью, устойчивостью к знакопеременным нагрузкам и тепловым ударам, коррозионной стойкостью, долговечностью.

Однако существенным недостатком производства стеклянных непрерывных волокон является необходимость использования шихты из дорогих материалов, таких как кварцевый песок, сода, сульфат натрия, борсодержащие компоненты и др.

Базальтовые волокна, в том числе и непрерывные нити, формируют одностадийным способом. Подготовка сырья сводится только к его дроблению до фракций 3-70 мм и магнитной сепарации. Стоимость сырья с доставкой, даже в очень удаленные места, не более 3000 руб/т.

Технологический процесс производства волокон из базальта сравнительно прост и заключается в плавлении породы в ваннах печах при 1200-1400°C с последующей переработкой расплава в волокна через фильерные питатели способом намотки на бобины (нити), раздувом воздухом или паром (волокна).

Свойства базальтовых нитей:

1. Диаметр волокон, мкм	6-25
2. Температура применения, °C	-200+900
3. Плотность, кг/м ³	2800
4. Модуль упругости, кг/мм ² (ГПа)	9100...1100 (91-110)
5. Прочность при растяжении (после термообработки 1 ч.), %:	
при 20°C	100;
при 200°C	94;
при 400°C	65
6. % потери веса после 3-часового кипячения в H ₂ O	0,16,
в 2н NaOH	5,0,
в 2н HCl	2,1
7. Удельное объемное электрическое сопротивление, Ом×м	1×10 ¹³
8. Коэффициент звукопоглощения	0,9...0,99

Продукция, производимая из базальтовых нитей: ровинги для производства профильных базальтопластиковых прутков $d = 4-60$ мм, арматуры, труб и емкостей (методом намотки), подложек для производства мягких кровель, кровельных и облицовочных материалов, геотекстильные материалы (сетки, полотна), иглопробивные материалы для теплозвукоизоляции.

Быстро развивается производство штапельного базальтового волокна (ваты) с переработкой его в прошивные теплоизоляционные и фильтрационные маты. Мощность действующих установок 25-50 и 80 тыс. м³ прошивных матов в год. Высокие технико-экономические характеристики позволяют широко применять их в качестве утеплителя общестроительного назначения, фильтров дренажных систем, стойких в агрессивных грунтовых водах и т.д. [1].

Базальтовая вата (рис. 2). В настоящее время в мире в год производится около 5 млн. т базальтовой ваты. Достигнутое общее сокращение потребления энергии в США при использовании теплоизоляции из базальтовой ваты представлено в табл. 1, данные которой доказывают огромную перспективность базальтовой ваты для строительства [2].

В нашей стране, как и во всем мире, расширяется производство базальтовой ваты и изделий из нее, совершенствуются применяемые для скрепления базальтовых волокон поли-



Рис. 2. Базальтовая вата

мерные связующие. Изделия из базальтовой ваты (маты, плиты и др.) долговечны, негорючи и, более того, препятствуют распространению горения.

Таблица 1

Масштабы затрат энергии на отопление и потенциальные возможности для ее огромной экономии

Тип здания	Единица измерения	Потребление энергии (миллионы ГДж)			
		Без применения теплоизоляции	С применением теплоизоляции по действующим нормам	Экономия	Экономия, %
Жилые	ГДж	21,532	10,550	10,982	51
Торговые	ГДж	8,622	7,069	1,593	18
Жилые и торговые	ГДж	30,194	17,619	12,575	42

В РФ во многих регионах (более 12) успешно работают заводы по производству базальтовой ваты, в том числе в г. Волгограде. Температурная область применения матов и холстов из базальтовых супертонких волокон (БСТВ) – 900°C, а для специальных огнезащитных изделий из этого материала – 1100-1200°C.

Базальтовые трубы. ОАО «Сантехпром» (г. Москва) совместно с группой предприятий изготавливают базальтопластиковые трубы и предлагают трубы и фасонные изделия из композиционных материалов для систем трубопроводов: холодного и горячего водоснабжения с $T=75-95^{\circ}\text{C}$ и давлением 1,0-1,6 МПа; низкотемпературного отопления; транспортировки агрессивных сред; химводоподготовки; нефтепродуктопроводов; пульпопроводов [3].

Объем производства этой группы предприятий – более 800 км/год труб диаметром от 50 до 400 мм. Изготовлено и эксплуатируется более 1500 трубопроводов. Материал – высокопрочный, высокоплотный базальтопластик на эпоксидном компаунде. Для специального назначения применяются различные футеровочные материалы.

Все применяемые материалы и сырье исключительно российского производства, не содержат импортных компонентов. Оборудование и оснастка изготовлены предприятиями РФ.

Общими преимуществами базальтопластиковых труб являются:

– относительно низкая масса, что снижает затраты при транспортировке и монтаже. Например, базальтопластиковая труба $D_{BH}=80$ мм, длиной 6 м без теплоизоляции весит 9 кг, в теплоизоляции – 20 кг;

– гладкая внутренняя поверхность, отсутствие коррозии и зарастания внутреннего сечения, что позволяет использовать их в трубопроводах меньшего диаметра. Эквивалентный диаметр стальной трубы составляет $D_{BT}=1,3 D_{\text{Стальной трубы}}$;

– отсутствие внутренней и внешней коррозии, что обеспечивает длительный срок службы при хорошем качестве питьевой воды. Если стальные трубопроводы требуют замены через 7-15 лет, то базальтопластиковые трубы обеспечивают надежную эксплуатацию до 50 лет без ремонта;

– отсутствие электрохимической коррозии от воздействия блуждающих токов;

– снижение показателей длительной прочности при повышенных температурах не превышает 20% от показателей при нормальных условиях;

– соединение труб не требует сварочной техники и соответствующей проверки сварных швов.

Известно, что протяженность трубопроводов в системе ЖКХ России составляет более 1 млн. км. Из них требуют замены около 50%, в том числе внутридворовые сети и теплосети

диаметром до 200 мм – более 100 тыс. км, которые могут быть заменены на базальтопластиковые трубы Ду 80-150; Ду 200-400 мм – около 150 тыс. км – возможна замена на базальтопластиковые трубы Ду 150-300 мм.

Изношенность стальных трубопроводов, подверженность ускоряющейся коррозии, сквозные проржавления приводят к потерям воды до 40% на пути ее транспортирования, зарастание внутренней поверхности приводит к сужению поперечного сечения и дополнительному расходу электроэнергии на перекачку. Убытки от дотаций за потерянную воду и затраченную на нее электроэнергию составляют только по г. Москве около 10 млрд. руб. в год при общей протяженности трубопроводов около 100 тыс. км, т.е. 100 тыс. руб. на каждый км трубопровода. Таким образом, при стоимости базальтопластиковых теплоизолированных труб 700 тыс. руб. за 1 км при Ду=80 мм, срок окупаемости только за счет исключения потерь составит менее семи лет, а так как стальной трубопровод через 7-15 лет потребует полной замены, полученная экономия средств за 10 лет составит не менее трех стоимостей заложеного трубопровода.

В настоящее время набирают темп развития производства труб из полиолефинов – полиэтилена и полипропилена, обладающих низкой плотностью, повышенной хемо- и водостойкостью и простотой монтажа коммуникаций. Однако из-за низкой механической прочности, тепло- и термостойкости изделия из этих полимеров не могут конкурировать с базальтопластиковыми. Нами проведены разработки по повышению прочностных характеристик полиэтилена высокой плотности и полипропилена. Для этого в качестве полимерной матрицы использовали гранулы полиэтилена ПЭ-15803-020 и полипропилена ПП-01003, как первичные, так и вторичные (отходы), а в качестве армирующей системы – некондиционную, отработавшую в течение 10 лет в производстве азота и кислорода базальтовую вату. Оптимальная степень наполнения полимера базальтовой ватой (БВ) составила 15% (табл. 2). Из табл. 2 видно, что все исследуемые механические характеристики первичных и вторичных ПЭ и ПП повышаются при введении в полимерную матрицу 15% базальтовой ваты: σ_p на 56-65%, σ_i на 43-78%, твердость на 70-83%.

Таблица 2

Механические характеристики базальтопластиков
на основе ПЭ и ПП, армированных 15% базальтовой ваты

ПКМ	Плотность, кг/м ³	Разрушающее напряжение при растяжении, σ_p , МПа	Разрушающее напряжение при изгибе, σ_i , МПа	Твердость по Бринеллю, МПа
ПЭ и ПП, первичные				
ПЭ	910/990	17/28	20/35	25/44
ПП	920/980	30/49	30/43	33/56
ПЭ и ПП, вторичные				
ПЭ	910/970	16/25	18/32	23/41
ПП	920/970	27/44	27/40	30/54

Примечание: в числителе – ненаполненный ПЭ и ПП, в знаменателе – наполненный 15% базальтовой ваты

Приведенные данные свидетельствуют, что совмещение БВ с ПЭ и ПП обеспечивает получение ПКМ с достаточно высокими механическими свойствами, а также позволяет эффективно использовать в качестве полимерной матрицы вторичные полиолефины, а в качестве наполнителя – некондиционную базальтовую вату. Армированный ПЭ и ПП имеют также повышенную теплостойкость.

На кафедре химической технологии технологического института СГТУ, начиная с 1998 г., ведутся исследования по созданию высокопрочных базальтопластиков (БП). Разра-

ботанная интеркаляционная технология (ИТ) [4] обеспечивает получение БП с повышенными на 20-40% механическими и физико-химическими характеристиками по сравнению с традиционными стеклопластками.

Разработанная технология базируется на использовании для пропитки базальтовых нитей (БН) не готовой фенолформальдегидной смолы, а исходных мономеров – смеси фенола с формальдегидом и катализатором NaOH. Это позволяет резко усилить физико-химическое взаимодействие БН с образовавшимся полимерным связующим и тем самым повысить все характеристики сформированного БП и сократить технологическую схему ~ на 5 стадий.

Учитывая, что свойства БН зависят от месторождения базальта и особенностей технологии формования БН из расплава базальта, в исследованиях использовались БН разных производителей: из Украины (БН-У), заводов Брянской обл.(БН-Б), г. Красноярска (БН-К) и НИИ «Графит» г.Москвы (БН-1 и БН-2). Сформированные БП в зависимости от производителя отличаются по физико-химическим и механическим характеристикам (табл. 3) [5]. Как видно, БП, сформированные по разработанной технологии, характеризуются ~ на 20% более высокими свойствами, чем по традиционной технологии и в 3 раза большей прочностью и в 10 раз меньшим водопоглощением, чем стандартные стеклопластики. БП высокотермостойки и высокоустойчивы к горению – кислородный индекс составляет 60%.

Таблица 3

Сравнительные характеристики БП, армированных базальтовыми нитями разных производителей, полученных по ИТ и традиционному способу

Вид наполнителя (длина 120 мм)	Твердость по Бринеллю, Нв, МПа	Разрушающее напряжение при изгибе, $\sigma_{из}$, МПа	Разрушающее напряжение при сдвиге, $\sigma_{сд}$, МПа	Удельная ударная вязкость, $a_{уд}$, кДж/м ²	Плотность, ρ , кг/м ³	Водопоглощение при 2-час. кипячении в H ₂ O, W, %	Термостойкость при 800°С, потери массы, %
БН-У	475/418	450/364	18/15	313/270	2146/1940	0,25/0,33	27
БН-Б	510/484	640/520	20/16	342/295	1887/1680	0,04/0,05	26
БН-К	503/440	600/482	14/11	329/280	1717/1575	0,06/0,08	26,5
БН-1	203/180	422/340	12/10	190/165	1935/1700	0,33/0,55	30
БН-2	196/175	192/161	7/6	154/132	1511/1280	0,44/0,70	32
СП трад.	355	206	24	-	1650	0,58	38

Примечание: в числителе – базальтопластик, сформированный по ИТ; в знаменателе - базальтопластик, сформированный традиционной пропиткой нитей готовой смолой; СП – традиционный стеклопластик

БП на основе фенолформальдегидной матрицы, армированные базальтовой ватой кондиционной и некондиционной (табл. 4), характеризуются достаточно высокой твердостью и прочностью при изгибе – более чем в 3 раза по сравнению с БП на ПЭ матрице (табл. 2).

Таблица 4

Физико-механические свойства БП на основе ФФС и кондиционной и некондиционной базальтовой ваты

Базальтовая вата	Разрушающее напряжение при растяжении, σ_p , МПа	Разрушающее напряжение при изгибе, $\sigma_{из}$, МПа	Удельная ударная вязкость, $a_{уд}$, кДж/м ²	Твердость по Бринеллю, Нв, МПа	Водопоглощение при 2-час. кипячении, W, %
Кондиционная	11,4	118	20,4	142,4	3

Некондицион-ная	11,3	117	20,2	138,8	4
-----------------	------	-----	------	-------	---

Примечание: соотношение базальтовая вата: связующее – 50:50%

По разработанной технологии могут формироваться трубы, перегородки и стены туннелей, теплоизоляционные скорлупы на трубы и другие изделия.

На основе базальтовой ткани и пленок ПЭ первичного и вторичного нами разработана технология рулонированных БП широкого спектра использования: для кровельного покрытия, дорожного строительства, обустройства теплиц и др. [6, 7]. Для создания рулонных материалов применялись стандартная ткань и полиэтиленовые пленки как из первичного, так и вторичного ПЭ. Рулонированный БП имеет более высокие механические свойства, теплоустойчивость и гибкость (табл. 5), чем битумный материал на основе стекловолокон, выпускаемый в соответствии с ГОСТ 30547-97.

Таблица 5

Сравнительные характеристики разработанного рулонированного БП на основе первичного ПЭ со стандартным рулонным материалом на основе стекловолокон

Слоистая композиция	Вид модификации	Разрушающие нагрузки, Н / МПа	Относительное удлинение, %	Теплостойкость за 2-ч., при температуре, °С	Водонепроницаемость за 72 ч. при давлении 0,001 МПа	Гибкость на брусе R5 мм, при температуре, °С
2слоя ПЭ + слой БТ +2слоя ПЭ первичного	без модификации	1140/152	15	100	абсолютная	минус 20
	отжиг замасливателя	1540/198	7			
	ИК-облучение	1170/156	8,8			
	СВЧ 3 мин	1215/162	7			
	СВЧ 3 мин + ООПГ	1462/195	8,7			
Рулонный битумный материал на основе стекловолокон по ГОСТ 30547-97	-	294/-		70	абсолютная	0

Примечание: в числителе – разрывное усилие при растяжении, Н, в знаменателе – разрушающее напряжение при растяжении σ_p , МПа

Таким образом, базальтопластики вытесняют металл, стеклопластики, асбест и другие материалы в широкой палитре областей их применения за счет высоких эксплуатационных характеристик, огнестойкости, нетоксичности, дешевизны и доступности сырья, возможности организации безотходных производств.

Работа выполнена в рамках гранта Президента РФ для поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук (МК-6190. 2006.3) и научно-исследовательских работ, выполняемых в рамках тематического плана по заданию Министерства образования и

науки РФ «Создание научных основ структуры и свойств ресурсосберегающей технологии базальтопластиков, магнито- и ионообменных полимерных композиционных материалов»

ЛИТЕРАТУРА

1. Джигирис Д.Д. Основы производства базальтовых волокон и изделий / Д.Д. Джигирис, М.Ф. Махова. М.: Теплоэнергетика, 2002. 416 с.
2. Базальтовая вата: история и современность: сб. материалов) / под ред. А.Н. Земцова. Пермь: ПГТУ, 2003. 124 с.
3. Проспект ОАО «Сантехпром».
4. Патент № 2276676. Способ получения полимерной пресс-композиции / С.Е. Артеменко, Ю.А. Кадыкова и др. // Оpubл. в БИ. 2006. № 14.
5. Артеменко С.Е. Интеркаляционная технология – эффективный способ получения базальтопластиков / С.Е. Артеменко // Пластические массы. 2005. № 12. С. 47-51.
6. Исследование рулонированного материала на основе базальтовой ткани и полиэтиленовых пленок методом инфракрасной спектроскопии / Т.П. Гончарова, С.Е. Артеменко, Ю.А. Кадыкова, В.Н. Вернигорова // Пластические массы. 2007. № 1. С. 23-26.
7. Гончарова Т.П. Полифункциональные материалы на основе полиэтиленовой пленки и базальтовой ткани / Т.П. Гончарова, С.Е. Артеменко, Ю.А. Кадыкова // Перспективные материалы. 2007. № 1. С. 66-68.

Артеменко Серафима Ефимовна –

доктор технических наук, профессор кафедры «Химическая технология»
Энгельсского технологического института (филиала)
Саратовского государственного технического университета

Кадыкова Юлия Александровна –

кандидат технических наук, доцент кафедры «Химическая технология»
Энгельсского технологического института (филиала)
Саратовского государственного технического университета

Статья поступила в редакцию 09.07.07, принята к опубликованию 05.12.07

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

УДК 620

Р.З. Аминов

ДИССЕРТАЦИОННОМУ СОВЕТУ ПО ЭНЕРГЕТИКЕ 45 ЛЕТ

Рассмотрены основные итоги и результаты деятельности диссертационного совета по энергетике при Саратовском государственном техническом университете за 45-летний период его работы. Показан вклад Саратовской научной школы теплоэнергетиков в решение научных и прикладных задач, положенный в основу аттестации научных кадров и подготовку специалистов высшей квалификации.

R.Z. Aminov

DISSERTATIONAL COUNCIL ON HEAT-POWER ENGINEERING IS 45

Basic results and the results of Dissertational Council activity on power engineering are considered at the Saratov State Technical University for the period of 45 years of its work. The contribution of the Saratov Scientific School of power engineering specialists in the decision of the scientific and applied problems put in a basis of certification of the scientific staff and preparation of experts of the top skills is shown here.

Развитие Саратовской теплоэнергетической научной школы всегда было связано с функционированием диссертационного совета, созданного в 1962 г. под руководством профессора А.И. Андриященко. Совет регулярно переутверждался и, пользуясь признанием в широких научных кругах, был включен высшей аттестационной комиссией страны в число базовых советов. В настоящее время в составе совета две специальности: «Энергетические системы и комплексы» и «Промышленная теплоэнергетика», по которым ведется защита докторских и кандидатских диссертаций. За весь период работы в Совете защищено 20 докторских и более 150 кандидатских диссертаций.

Аттестация научных кадров и присуждение ученых степеней всегда связаны с определенными достижениями, получением новых знаний и результатов исследований. Это можно хорошо увидеть на примере теплоэнергетической школы, начиная с первых ее шагов развития, когда под руководством проф. А.И. Андриященко закладывались основы методологии термодинамического и технико-экономического исследования теплоэнергетических установок электростанций.

Использование функции Гиббса, энергетических потенциалов, теории обратимых циклов дало возможность широко использовать понятие эксергии для оценки совершенства

теплофикационных циклов и процессов. Были разработаны показатели термодинамической эффективности тепловых электростанций, включая ТЭЦ, на базе эксергетической оценки отпущающего тепла потребителям. Использование понятия эксергии имело, прежде всего, важное познавательное значение и использовалось исключительно как инструмент совершенствования процессов и циклов теплосиловых установок, а также в образовательных целях при изучении студентами основ термодинамики и в частности ее второго закона. На базе эксергетического метода Ю.М. Хлебалиным введены критерии для технико-экономических расчетов.

Развитие методологии эксергетического анализа привело к созданию основ теории построения образцовых циклов теплоэнергетических установок, обеспечивающих самую высокую термодинамическую эффективность и их «карнотизацию» в условиях использования реальных рабочих тел (продуктов сгорания, водяного пара и т.д.). Понятие образцовых циклов впервые было введено А.И. Андрищенко и А.Б. Дубининым.

Консолидации научных сил во многом способствовало открытие в 1967 году в Саратовском политехническом институте Проблемной научно-исследовательской лаборатории теплоэнергетических установок электростанций. С ее открытием начали осуществляться комплексные исследования по разработке нового энергетического оборудования, обоснование рациональных схем и оптимизации параметров теплосиловых установок электростанций. Интенсивное развитие получили работы по исследованию принципиально нового по тому времени направлению – развитию прогрессивных парогазовых технологий. Начиная с 60-х годов саратовские теплоэнергетики совместно с Ленинградским Центральным котлотурбинным институтом им. И.И. Ползунова оказали ведущими школами в развитии этого направления в СССР.

Совместно с ЦКТИ им. И.И. Ползунова был выполнен ряд работ по выбору рациональных тепловых схем парогазовых установок, включая бинарные для отпущающего тепла и электроэнергии, схем газотурбинных установок с утилизацией тепла отработавших газов для целей теплофикации, реконструкции Саратовской ГРЭС по парогазовому циклу и др.

Были решены вопросы по выбору оптимального соотношения рабочих тел в различных типах парогазовых установок, обоснованию рациональных схем и параметров утилизации тепла уходящих газов ГТУ, числа ступеней и параметров промежуточного охлаждения воздуха, общей степени повышения давления в газотурбинном цикле, схем отпущающего тепла от ПГУ с разработкой методов расчета оптимального коэффициента теплофикации, температурного графика тепловой сети, способов регулирования нагрузки теплового потребления.

Выполнены обоснования необходимых условий и расчетных параметров реконструкции котлов со сбросом отработавших газов ГТУ в их топку.

В последующем эти результаты получили широкое подтверждение в мировой практике бурно развивающихся парогазовых технологий и послужили основой для их создания. Параллельно развивались исследования новых конструкций и оптимизация параметров котельного и турбинного оборудования для проектируемых крупных энергетических блоков.

Под руководством проф. В.Г. Каширского получили развитие работы по изучению путей комплексного использования горючих сланцев Поволжья, по совершенствованию и оптимизации теплотехнического оборудования промышленных предприятий.

Актуальные исследования по совершенствованию теплофикационных систем были проведены профессорами Ю.М. Хлебалиным, Б.А. Семеновым и Ю.Е. Николаевым, а в области промышленной теплоэнергетики В.Ф. Симоновым, Ю.Я. Печенеговым, В.М. Седелкиным и другими. Исследования по обоснованию оптимальных схем и параметров энерготехнологических установок электростанций на сернистых топливах при обеспечении защиты окружающей среды проведены проф. А.И. Поповым. Значительный вклад в оптимизацию параметров паротурбинных установок внес доц. В.А. Понятов, а в развитие основ теории надежности теплосиловых установок – доц. Е.А. Ларин.

Проведение комплексных оптимизационных исследований потребовало разработки расчетного аппарата, который позволял бы решать многопараметрические задачи и обеспечивать

достаточно высокую точность расчетов для реальных рабочих тел и паров. С этой целью впервые были использованы дифференциальные уравнения термодинамики для расчета приращений функций работы расширения, сжатия, подводимого и отводимого тепла в циклах теплоэнергетических установок. На этой основе был построен расчетный аппарат технико-экономической оптимизации начальных параметров, параметров промперегрева, конечного давления пара, регенеративного подогрева питательной и сетевой воды в паросиловых установках. Показана эффективность применения промежуточного перегрева пара на ТЭЦ и условия, при которых он обеспечивает термодинамический (топливный) и технико-экономический эффект. Разработан (защищен авторским свидетельством) новый вариант промышленно-отопительной ТЭЦ, в которой эффективно можно использовать типовое оборудование крупных конденсационных блоков с промперегревом пара. Разработки по обоснованию конечных параметров пара мощных конденсационных турбоагрегатов использованы Харьковским турбогенераторным заводом при конструировании двухпоточных цилиндров низкого давления крупных паровых турбин.

Проф. А.В. Змачинским и доц. В.А. Медведевым выполнены работы по оптимизации компоновочных решений, конструктивных характеристик и параметров котельных установок крупных энергетических блоков. Установлено долгосрочное сотрудничество с крупнейшими котлостроительными заводами ТКЗ (г. Таганрог) и ЗИО (г. Подольск, Московской обл.). Совместно с ними решены важнейшие теоретические и практические задачи. Наиболее значимыми среди них являются исследования мембранных панелей для цельносварных топочных экранов и рекомендации по оптимальному сооружению их отдельных элементов, включая поверхности нагрева из труб с различным типом оребрения (мембранным, плавниковым, спирально-ленточным, петельно-проволочным и др.).

Большое внимание в настоящее время уделяется оптимизации этих поверхностей в условиях модернизации паровых котлов. Разработки внедрены и успешно эксплуатируются более чем на 30 объектах и защищены патентами и авторскими свидетельствами.

Формирование крупных энергетических систем и комплексов привело к необходимости разработки системных методов исследования энергетических установок, их режимов использования. Существенным вкладом в решение вопросов системного анализа были разработки новых критериев и расчетного аппарата. К их числу можно отнести:

1. Создание методологии, учитывающей режимные, маневренные, пусковые характеристики энергетических установок и графики их загрузки. Впервые было показано, что производные полезной работы, подводимого тепла в цикле при различных программах регулирования мощности энергоблоков могут существенно отличаться на разных режимах их загрузки. Это привело к изменению величин определяемых оптимальных параметров рабочего тела и представлению о методах их поиска.

2. Учет показателей надежности несения нагрузки оборудования и их зависимости от искомых параметров для определения аварийного резерва в энергосистемах и издержек на его содержание. Учет факторов надежности привел к коррелированию получаемых решений и результатов в направлении снижения общих системных затрат.

3. Оценка воздействия энергетических объектов на окружающую среду вредными выбросами и загрязнение ее с разработкой расчетного механизма учета экологических факторов. Учет экологических факторов в технико-экономических расчетах сдвинул спектр получаемых решений в сторону снижения влияния и негативных последствий на окружающую среду вредных выбросов тепловых электростанций.

В 1990 году на базе теплоэнергетической школы Саратовского политехнического института был создан филиал Института энергетических исследований АН СССР и ГКНТ, реорганизованный впоследствии в Отдел энергетических проблем Саратовского научного центра РАН. Формально это были учреждения разных ведомств, но по своей сути они интегрировались в решение единых проблем и в последующем оказались взаимосвязанными целым рядом результатов исследований и полученных новых знаний.

Ужесточение системных требований к энергетическим установкам при прохождении суточных и недельных графиков нагрузки потребовало изучения путей повышения маневренных свойств как существующего, так и вновь проектируемого оборудования. Здесь можно отметить работы по обоснованию экономической эффективности и оправданных размеров кратковременной форсировки мощности энергоустановок отключением подогревателей высокого давления, байпасированием подвода пара, впрыском пара в камеру сгорания ГТУ и др. Одновременно решались вопросы снижения минимальной мощности ТЭЦ с регулируемыми отборами пара (принудительные разгрузки) путем частичной или полной разгрузки отборов и подогревом воды редуцированным свежим паром. Было обосновано и получило реализацию в энергосистемах, имеющих в своем составе атомные электростанции, снижение мощности ТЭЦ в ночное время путем подачи потребителям промышленного пара давлением 0,7-1,3 МПа от энергетических котлов через РОУ.

Вопросы развития систем теплоснабжения привели к постановке новых задач и их решению. В условиях перехода к рыночной экономике обоснована целесообразность и рассмотрены различные варианты мини-ТЭЦ, их рабочие схемы и параметры. Предложены и экономически обоснованы варианты комбинирования таких мини-ТЭЦ и других пиковых источников тепла с крупными загородными ТЭЦ с разработкой их совместных оптимальных режимов работы.

Была показана экономическая эффективность увеличения регулируемого диапазона по отпуску электроэнергии на электростанциях путем аккумулирования горячей воды (питательной и сетевой), использования аккумулирующих способностей отапливаемых зданий и тепловых сетей. Многочисленными исследованиями была доказана необходимость создания нового маневренного оборудования. Это, прежде всего, освоение промежуточной ступени начальных параметров пара на давление 17-18 МПа и температуру 540°C с промперегревом с повышенными маневренными свойствами энергоблоков. Такие энергоблоки должны иметь упрощенную тепловую схему, относительно низкие удельные капиталовложения и работать в полупиковой части графика электрических нагрузок.

Наряду с этим немаловажное значение имеют вопросы оптимизации режимов загрузки оборудования как внутри станции, так и в энергетической системе. Строгое решение балансовых и распределительных задач в энергетике оказалось возможным только в результате развития фундаментальных основ теории векторного анализа и векторной оптимизации. Дело все в том, что существующие методы решения балансовых и распределительных задач основывались на приближенных решениях путем приравнивания нулю первой производной по искомым переменным уравнений Лагранжа с неопределенными множителями с последующим решением полученной системы уравнений. В этом случае при наличии невыпуклых функций можно получить решения, противоположные искомому, и считать их правильными, поскольку определить, достигли мы максимума или минимума функции, либо очень сложно, либо практически невозможно. И более того, даже если мы с помощью вторых производных все-таки узнаем, что получили противоположное искомому решение, другого результата в этом случае мы все равно получить не сможем. Поэтому на смену этого метода, известного под названием «метода относительных приростов», пришли другие и наиболее прогрессивный из них – градиентный. Градиентные методы хорошо были освоены ранее для решения задач с независимыми переменными. В данном же случае при наличии неопределенных множителей Лагранжа все решение упиралось в их определение. Практическая реализация градиентных методов во всем мире для решения такого класса задач пошла по пути либо итерационного задания и последующего многократного уточнения множителей Лагранжа, либо приближения и неучета уравнений связи. В первом случае при увеличении числа переменных неизмеримо возрастали объем расчетных вычислений и необходимое для этого время, во втором присутствовала более существенная погрешность результатов расчетов. Используя уравнения перехода системы из одного состояния в другое, теорию векторной ал-

гебры и характер ограничивающих уравнений, Р.З. Аминову впервые удалось математически строго раскрыть «неопределенные» множители Лагранжа и перевести их в категорию определяемых. Это позволило сделать существенный шаг в направлении построения вектора градиента функций практически любой степени сложности и создания оптимизационных программ нового поколения.

В одном из направлений решения подобного класса задач – оптимизации режимов загрузки оборудования электростанций разработаны программы управления внутростанционными режимами теплоэлектроцентралей. Программы построены на основе энергетических характеристик оборудования, учитывающих его реальное эксплуатационное состояние и экологические факторы. Реализация векторного аппарата расчета привела к весьма высокому быстродействию и существенному сокращению погрешности и времени расчета. Все это при использовании современных персональных компьютеров создало благоприятные предпосылки для использования программ в режиме оперативного управления. При этом можно получать экономию топлива в размере до 1-3% топлива в зависимости от исходных режимов работы оборудования и энергетических характеристик.

Разработана и зарегистрирована в агентстве по патентам и товарным знакам программа оперативного распределения активных нагрузок в энергосистеме. Одновременно с решением задач оптимального текущего управления загрузкой электростанций программа позволяет планировать рациональную выработку электроэнергии электростанциями на принятом отрезке времени (например, за год). При заданных параметрах рынка это дает возможность квалифицированно планировать закупку электроэнергии на внешнем рынке в дефицитных энергосистемах и ее реализацию в избыточных, что может обеспечить существенный экономический выигрыш для энергосистем.

Решен ряд вопросов, связанных с повышением эффективности энергоблоков атомных электростанций с водо-водяными реакторами. На основе разумной достаточности снижения рисков от крупных аварий с затратами в мероприятия, снижающими вероятность их появления, разработана методология нормирования показателей надежности и безопасности атомных электростанций. Проведена комплексная оценка вероятных ущербов от крупных аварий на атомных электростанциях. Выполнены исследования оценки снижения вероятности крупных аварий дополнительным резервированием собственных нужд путем установки постоянно работающих газотурбинных либо парогазовых электростанций вблизи АЭС. Такие решения могут позволить практически исключить влияние крупных системных аварий на безопасность АЭС. К тому же постоянно работающие ПГУ либо ГТУ оказываются экономически более эффективными по сравнению с установкой общестанционных резервных дизель-генераторов, используемых в режиме «ожидания», так как обеспечивают дополнительную коммерческую выработку электроэнергии и снижают общую стоимость установленного киловатта мощности.

Под руководством проф. В.А. Хрусталева проведены исследования и даны рекомендации по продлению кампании топливных циклов на мощностном и температурном эффектах. Рассмотрены возможности повышения коэффициента использования установленной мощности энергоблоков за счет реализации внутренних резервов и совершенствования топливных циклов.

Разработаны принципы и эффективные условия параллельной работы при отпуске тепла от АЭС и ТЭЦ на органическом топливе. Введено понятие и определен оптимальный коэффициент атомной теплофикации на примере г. Балаково. Предложены новые решения и разработана технология, позволяющая обеспечивать отпуск тепла из нерегулируемых отборов турбоагрегатов АЭС внешним потребителям без снижения их электрической мощности. В этом случае может быть достигнут значительный экономический эффект. Увеличение доли атомных электростанций в структуре генерирующих мощностей энергосистем ужесточает режимные требования и уже сегодня ставит задачи реализации кратковременных форсировочных режимов на АЭС. Форсировка мощности энергоблоков длительностью 1000-2000 часов в год экономически оправдана как для покрытия пиков электрической нагрузки, так и в качестве компенсации недо-

выработки электроэнергии при перегрузках топлива. Реализация таких режимов позволяет наряду с повышением коэффициента использования установленной мощности энергоблоков АЭС обеспечить существенную экономию органического топлива и, прежде всего, природного газа в энергетических системах. Изучены принципиальные возможности повышения мощности выше номинальной реакторных установок ВВЭР-1000. В ходе выгорания топливной загрузки наблюдается снижение коэффициентов неравномерности энерговыделения в активной зоне, что может позволить, уже начиная с середины топливной кампании, примерно на 10% повышать тепловую мощность реакторов. С использованием этого эффекта разработаны технологические решения, обеспечивающие форсирование мощности энергоблоков АЭС.

Намеченные в стране высокие темпы ввода мощностей атомных электростанций уже сегодня ставят ряд важных задач, связанных с повышением их системной эффективности. К числу таких задач можно отнести:

- повышение безопасности, в первую очередь, действующих энергоблоков атомных электростанций;
- увеличение коэффициента использования установленной мощности с доведением его до уровня 80-85%, в том числе и за счет развития на АЭС водородных циклов;
- совершенствование топливных циклов;
- теплоснабжение от АЭС близлежащих городов и поселков.

Решение этих задач позволит обеспечить повышение стабильности АЭС и энергетическую безопасность страны.

В настоящее время в рамках основных направлений саратовских теплоэнергетиков ведутся исследования и разработки по важнейшим государственным программам, грантам, региональным программам, заданиям предприятий, обеспечивая заметный вклад в развитие фундаментальных и прикладных исследований в области энергетики.

Уровень требований к диссертационным работам в совете практически не снижался на всех этапах реформирования экономики страны. Этому в определенной степени способствует апробация работ в ведущих научных школах страны, обсуждение на межкафедральных семинарах и в Проблемной лаборатории теплоэнергетических установок электростанций. В дальнейшем предполагается использовать опыт ветеранов науки путем создания экспертной группы из них для проведения экспертизы представляемых к защите диссертаций.

Аминов Рашид Зарифович –
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Тепловые электрические станции»
Саратовского государственного технического университета

Статья поступила в редакцию 20.05.07, принята к опубликованию 05.12.07

УДК 621.311:165

В.А. Хрусталева, А.В. Шутиков

ВЫБОР ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ПРОГРАММ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ И ПАРОВПУСКА ТУРБИН 1000 МВт АЭС С ВВЭР В РЕЖИМАХ СВЕРХНОМИНАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ

Рассмотрены вопросы параметрических программ регулирования парогенераторов и паровпуска турбин энергоблоков 1000 МВт АЭС с ВВЭР на сверхноминимальной мощности.

V.A. Khroustalev, A.V. Shutikov

CHOICE OF PARAMETRIC PROGRAMS OF REGULATING STEAM HEATERS AND STEAM TURBINES OF ENERGY UNITS 1000 MWT WHEN WORKING ABOVE NOMINAL CAPACITY

This article offers the methods of choosing parametric programs of steam heaters and steam turbines regulation in 1000 MWt units when working above nominal capacity.

Основу атомной электроэнергетики России сегодня и в обозримой перспективе составляют энергоблоки с водо-водяными энергетическими реакторами (ВВЭР). В условиях ограниченных возможностей новых инвестиций в сооружение АЭС наряду с вводом новых энергоблоков актуальной задачей является использование подтвержденных практикой эксплуатации резервов повышения мощности реакторных установок и парогенераторов. Турбоустановки К-1000-60/1500 и К-1000-60/3000 способны длительное время работать с нагрузками 108-114% при минимальной модернизации проточной части и отдельных элементов тепловой схемы. Факторами, способствующими повышению единичной мощности реакторной установки и парогенераторов, соответственно являются: уточнение нейтронно-физических расчетов и оценки критериев и запасов безопасности, улучшение свойств тепловыделяющих сборок нового типа, совершенствование системы внутриреакторного контроля (СВРК), улучшение показателей водно-химического режима ПГ (ВХР) со стороны 2-го контура с ростом коэффициента теплопередачи, реконструкция ПГ и увеличение полезной поверхности нагрева. На указанные обстоятельства, открывающие возможность повышения мощности блоков АЭС с ВВЭР-1000 выше номинальной указывалось в зарубежной и отечественной литературе [1, 2, 3].

На современных энергоблоках с реакторами ВВЭР-1000 расход теплоносителя первого контура не регулируется. Исходя из основных уравнений теплопередачи в ПГ можно рассчитать важнейшие характеристики при различных программах регулирования. Приведем эти уравнения:

$$Q_{III} = k \cdot F \cdot \frac{\Delta t_{\bar{o}} - \Delta t_m}{\ln \Delta t_{\bar{o}} / \Delta t_m};$$

$$Q_{p.s} = G_{p.s} \cdot C_{pm}^s \cdot \Delta t_s; \quad \Delta t_s = t_1 - t_2; \tag{1}$$

$$Q_m = D_{ns} \cdot (h_0 - h_{ns}); \quad Q_{III} \sim Q_{p.s} \sim Q_m \sim Q_{pac}; \quad D_{ns} = D_0. \tag{2}$$

В этих уравнениях: D_{ns}, D_0 – расход питательной воды (пара); k – средний коэффициент теплопередачи в ПГ, кВт/м²·град; F – общая поверхность теплопередачи в ПГ, м²; $\Delta t_{\bar{o}}, \Delta t_m$ – «большой» и «малый» температурные напоры в ПГ, соответственно на горячей и холодной сторонах теплообмена, °С; $G_{p.s}, C_{pm}^s$ – расход теплоносителя (воды под давлением) через ПГ (кг/с) и ее средняя массовая изобарная теплоемкость, кДж/кг·град; h_0 – энтальпия сухого насыщенного пара на выходе из ПГ; h_{ns} – энтальпия питательной воды на входе в ПГ; Δt_s – подогрев воды в активной зоне от значения t_2 на входе до t_1 на выходе, °С.

Из этих уравнений следует

$$t_2 - t_s = \frac{Q_p \cdot [\exp(kF/G_{p.s} \cdot C_p^s) - 1]^{-1}}{G_{p.s} \cdot C_{pm}^s}. \tag{3}$$

Уравнение (3) является базовым для всех возможных программ регулирования ПГ на режимах с любой, в том числе и сверхноминальной мощностью $Q_p > Q_p^{ном}$. Поскольку в пра-

вой части можно выделить не изменяющий свое значение комплекс ($k, F, G_{p.6}, C_{pm}^6 = \text{idem}$ с высокой степенью точности), то уравнение (3) запишем

$$t_2 - t_s = Q_p \cdot \kappa_{m.o} = \bar{Q}_p \cdot \bar{Q}_p^{\text{ном}} \cdot \kappa_{m.o} = \bar{Q}_p \cdot K,$$

или

$$t_2 = t_{cp}^{a.3} - \frac{1}{2} \cdot \frac{\bar{Q}_p \cdot Q_p^{\text{ном}}}{G_{p.6} \cdot C_p^6} = t_{cp}^{a.3} - \frac{1}{2} \cdot K_{p.6} \cdot \bar{Q}_p,$$

тогда

$$t_s = t_{cp}^{a.3} - \frac{1}{2} \cdot \bar{Q}_p \cdot (K_{p.6} - K); \quad t_1 = t_{cp}^{a.3} + \frac{1}{2} \cdot K_{p.6} \cdot \bar{Q}_p. \quad (4)$$

Ниже в табл. 1 представлены программы регулирования теплообмена в ПГ, расчетные соотношения для них и основные преимущества и недостатки.

В качестве примера в табл. 2 представлены расчеты, позволяющие аппроксимировать зависимость потребного снижения $\Delta P_{ПГ}$ в зависимости от требуемого расхода в голову турбины.

Таким образом, если

$$P_0 = P_0^{\text{ном}} \cdot \frac{G_\phi}{G_{\text{ном}}} = P_0^{\text{ном}} \cdot \bar{G}_\phi, \text{ в соответствии с формулой Флюгеля, то}$$

$$\Delta P_0^m = P_{0\text{ном}}^m \cdot (\bar{G}_\phi - 1). \quad (5)$$

Если $\Delta P_{исх}^{op}$ задано, то «исходное» дросселирование может быть устранено в процессе повышения мощности встречным способом: увеличением расхода пара в голову (ростом давления перед первой ступенью турбины) и снижением давления в ПГ в соответствии с программой $t_{1cp}^{a.3} = \text{const}$. Как видно из табл. 2, $\Delta P_{ПГ} = (\bar{G}_\phi - 1)/0,04$.

Поэтому, возможное \bar{G}_ϕ при этом можно найти из уравнения

$$\Delta P_{исх}^{op} = P_{0\text{ном}}^m \cdot (\bar{G}_\phi - 1) + (\bar{G}_\phi - 1)/0,04, \quad (6)$$

откуда

$$\bar{G}_\phi = 1 + \frac{\Delta P_{исх}^{op}}{P_{0\text{ном}}^m + 25}, \quad (7)$$

или для $P_{0\text{ном}}^m = 59$ бар; $\Delta P_{исх}^{op} = 6$ бар; $\bar{G}_\phi = 1,071$.

Поскольку в области относительных расходов до 1,07 все характеристики температурных запасов в принципе допустимы, можно считать такой способ повышения мощности допустимым (программа 5). Для того, чтобы поднять значение $\bar{G}_\phi^{\text{дон}}$, можно также использовать программу (6).

Определенные трудности представляет обеспечение пропускания повышенных расходов пара при ограничении начального давления (перед первой ступенью турбины), что характерно для многих программ регулирования.

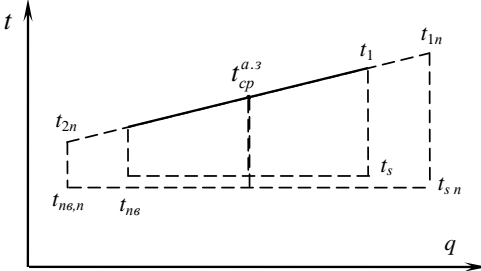
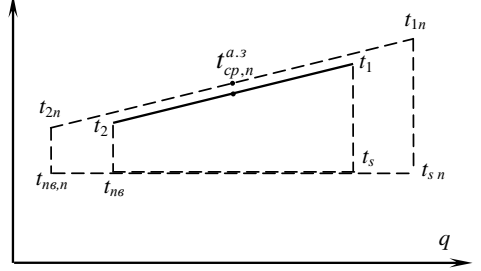
В табл. 3 представлены реально возможные мероприятия по увеличению пропускания пара в голову турбоустановки К-1000-60/1500-2М (на примере Балаковской АЭС).

Наиболее эффективным способом повышения мощности сверх номинального уровня, как уже указывалось, является повышение начального давления пара перед первой ступенью ЦВД. Однако при отсутствии запаса по пропускной способности на режиме $N_{\text{ном}}$ (на многих турбинах, имевших такой запас, проведено переоблопачивание первых ступеней ЦВД для устранения исходного дросселирования) возникает альтернатива.

Либо следует вновь изменить профиль и конструкцию турбинных ступеней ЦВД в сторону расширения проходного сечения, либо необходимо осуществить для достижения мощности $N > N_{\text{ном}}$ байпасное (обводное) регулирование. Варианты с ростом давления в ПГ обычно не рассматриваются из-за ограничений по повышению температуры t_2 на выходе из а.з. реакторной установки.

Таблица 1

Программы регулирования теплообмена в ПГ, расчетные соотношения для них и основные преимущества и недостатки

Тип программы	Диаграмма теплообмена, расчетные формулы и ограничения	Преимущества, недостатки
<p>1. $t_{cp}^{a.3} = \text{const}$</p> $t_{1,2} = t_{cp}^{a.3} \pm \frac{1}{2} \cdot K_{p\phi} \cdot \bar{Q}_p$ $t_s = t_{cp}^{a.3} - \frac{1}{2} \cdot (K_{p\phi} - K) \cdot \bar{Q}_p$ $D_0 = \bar{Q}_p \cdot Q_p^{ном} / (h_0 - h_{не})$		<p>Преимущества:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Благоприятна для I-го контура, т.к. по ней для изменения \bar{Q}_p вводится наименьшая реактивность. 2. Обеспечиваются стабильные температурные условия I-го контура, более высокая надежность. 3. Объем теплоносителя примерно постоянен, поэтому потребный $V_{КО}$ минимальный, обеспечено устойчивое регулирование КО. <p>Недостатки:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Утяжеление оборудования 2-го контура при учете сниженных мощностей, повышенный износ СРК на таких режимах. 2. Снижение давления в ПГ при сверхноминимальных мощностях с падением КПД и снижением пропускной способности паровпуска турбины.
<p>2. $P_s(t_s) = \text{const}$</p> $t_{cp}^{a.3} = t_s + \frac{1}{2} \cdot (K_{p\phi} - K) \cdot \bar{Q}_p$ $t_{1,2} = t_{cp}^{a.3} \pm \frac{1}{2} \cdot K_{p\phi} \cdot \bar{Q}_p$ $D_0 = \bar{Q}_p \cdot Q_p^{ном} / (h_0 - h_{не})$	 <p>Основные ограничения:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. DNBR – departure nuclear boiling relation – запас до кризиса теплообмена в пучках твэлов а.з. $DNBR < DNBR^{пред}$. 2. Δt_3 – запас (температурный) до кипения $\Delta t_3 = t_s(P_{К}) - t_1^{пред} > \Delta t_3^{пред}$. 	<p>Преимущества:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Со стороны 2-го контура нет ограничений на скорость изменения мощности. 2. Регулирование мощности блоков с ВВЭР более целесообразно по импульсу давления 2-го контура, т.к. этот параметр более чувствителен при колебаниях мощности в сети. <p>Недостатки:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Больше (примерно в 4 раза), чем в программе 1, изменение температуры t_1 при изменениях нагрузки и требуемая повышенная эффективность ОР реактора. 2. Повышенные требования к КО из-за сильного изменения объема теплоносителя в нем. 3. При режимах с повышенной мощностью ($\bar{Q}_p > 1,0$) возникают ограничения по неперевышению предельного значения $t_1^{пред}$, т.е. поддержания $DNBR^{пред}$ и запаса до начала кипения $t_s(P_{К}) - t_1^{пред}$.

Окончание табл. 1

Тип программы	Диаграмма теплообмена, расчетные формулы и ограничения	Преимущества, недостатки
Компромиссные программы		
3. $t_{cp}^{a.3} = f_1(\bar{Q}_p) \neq \text{const}$ $t_s(P_s) = f_2(\bar{Q}_p) \neq \text{const}$	$t_{cp}^{a.3} = t_s + \frac{1}{2 \cdot \alpha_{II}} \cdot (K_{pв} - K) \cdot \bar{Q}_p$ $t_s(P_s) = t_{cp}^{a.3} - \frac{1}{2 \cdot \alpha_I} \cdot (K_{pв} - K) \cdot \bar{Q}_p$ <p>но $t_{cp}^{a.3} - t_s = \bar{Q}_p \cdot K_{лом}$</p> <p>* $\alpha_{II} = \frac{1}{K_0 - 1/\alpha_I}$, где</p> $K_0 = \frac{4 \cdot K_{лом}}{K_{pв} - K} = \frac{4 \cdot G_{p.в} \cdot C_{pm}^e / k \cdot F}{1 - [\exp(kF/G_{p.в} \cdot C_{pm}^e)]^{-1}}$	<p>С ростом мощности средняя температура в а.з. растет, но медленнее, чем в программе $P_s(t_s) = \text{const}$ (2) в α_{II} раз, а температура (и давление пара) в ПГ падает, но медленнее, чем по программе (1) $t_{cp}^{a.3} = \text{const}$, в α_I раз.</p> <p>Для поддержания $\Delta t_{cp}^{лоэ} = \text{idem}$ на всех режимах необходимо согласование величин α_I и α_{II} по критерию*.</p> <p>Облегчены условия работы, как первого, так и второго контуров, в сравнении со схемами 2) и 1) соответственно.</p>
4. $\bar{Q}_p \leq \bar{Q}_{cp}$ программа 2 $t_s = \text{const}$ $\bar{Q}_{cp} < \bar{Q}_p \leq \bar{Q}_n$ $\bar{Q}_n > \bar{Q}_{ном}$ программа 2 $t_{cp} = \text{const}$	формулы для программ (1) и (2)	Мощность, при которой переходят с одной программы на другую, зависит от $P_{ПГ}^{npед}$ – предельно допустимого давления в ПГ, от характера графиков нагрузки.
Специальные программы для работы на повышенном уровне мощности		
5. При $\bar{Q}_p > \bar{Q}_{ном}$ программа 3, но с ростом t_{1n} не выше $t_{1n}^{npед} = f(\bar{Q}_{pn})$	$t_{1n} = t_{cp}^{a.3} + \frac{1}{2} \cdot K_{pв} \cdot \bar{Q}_{pn}, \quad t_{1n} \leq t_{1n}^{npед} = t_{кин} - \Delta t_n$ <p>$DNBR \geq DNBR^{npед}$ с обеспечение пропуска пара в голову турбины \bar{D}_{0n} при пониженных P_{0n} снятием исходного дросселирования и(или) байпасированием в СПП части свежего пара</p>	<p>Вблизи номинальной и при сверхноминальной мощности в первом контуре $t_{cp}^{a.3} = \text{const}$.</p> <p>В области сверхноминальных мощностей необходимо учитывать ограничения на рост температуры t_1 на выходе из а.з. по условиям незакипания теплоносителя (с запасом Δt_n), а также по снижению давления P_s (условие достаточной пропускной способности паровпуска турбоустановки $(D_0 v_0)^{\text{max}}$ при повышенных мощностях).</p>
6. При $\bar{Q}_p > \bar{Q}_{ном}$ длительный переход на стабильно-увеличенный $\max G_{pвп}$	$\bar{Q}_{p,n} = \frac{G_{pвп}}{G_{pв}} \cdot \frac{t_{1n} - t_{2n}}{t_1 - t_2} = \bar{Q}_{ПГ,n} = \frac{K_{ПГ,n}}{K_{ПГ}} \cdot \frac{\Delta t_{cp,n}^{лоэ}}{\Delta t_{cp,0}^{лоэ}}$	<p>Должна быть доказана возможность работы по такой программе. Возможно увеличение коэффициента $K_{ПГ}$ в ПГ, обеспечение выполнения критериев $t_{1n} \leq t_{1n}^{npед}$; $DNBR \geq DNBR^{npед}$.</p>

Таблица 2

Изменение характеристик теплообмена в ПГ при повышенной мощности
для программ $t_{1cp}^{a.3} = \text{const}$ ($P_k = 160$ бар, $\Delta P_{исх}^{op} = 6$ бар)

Характеристика	Относительный расход пара в голову турбины				
	$\bar{G}_\phi = 1,0^*$	1,04	1,08	1,125	1,17
Давление в ПГ, бар	65	64	63	62	61
Температура в ПГ, °С	280,8	279,8	278,8	277,7	276,6
Средний температурный напор, °С	24,7	25,7	26,7	27,8	28,9
Подогрев воды в а.з., °С	33	34,32	35,64	37,13	38,6
Температура на выходе из а.з., °С	322	322,66	323,3	324,06	324,9
Запас до кипения, °С	25	24,34	23,7	22,94	22,1
Отношение $\frac{\Delta \bar{G}_\phi}{\Delta P_{III}}$		0,04	0,04	0,045	0,045

Таблица 3

Мероприятия по увеличению пропуска пара
в голову турбины К-1000-60/1500-2М

Мероприятия	Основные преимущества
Создание (воссоздание) запаса пропускной способности турбины	Поскольку во многих случаях исходный запас по пропускной способности турбин с целью снижения потерь от дросселирования на АЭС был устранен путем переоблопачивания нескольких первых ступеней ЦВД, а запас по росту давления в ПГ на повышенных мощностях крайне ограничен (или отсутствует вовсе), необходимо вернуть (или даже увеличить) исходную пропускную способность турбин К-1000-60/1500 повторным переоблопачиванием
Использование обводного (байпасного) потока пара в промежуточную систему и(или) в ЦВД	Такой способ повышения мощности менее эффективен по тепловой экономичности, чем повышение расхода в голову турбины. Из всех возможных способов обвода для данной турбоустановки должен быть обоснован наиболее рациональный

Подобная задача ставилась и решалась в [2] для блоков АЭС 440 МВт.

Базовый вариант турбины 1000 МВт конструктивно состоит из одного двухпоточного цилиндра высокого давления (ЦВД), двух двухпоточных цилиндров низкого давления (ЦНД) и двух конденсаторов.

Принципиальная тепловая схема дана на рис. 1. Подогреватели высокого давления (ПВД) П7, П6, П5 и подогреватель низкого давления (ПНД) П4 имеют охладители дренажа греющего пара. Питательная вода подается в парогенератор двумя турбонасосами, отбор пара на турбонасосы производится после второй ступени промперегрева. Турбина допускает отбор пара на собственные нужды с выхлопа ЦВД в количестве 41,7 кг/с и отборы пара на подогреватели сетевой воды из 4, 5, 6 отборов, максимальная отопительная нагрузка 233 МВт.

Рассмотрены следующие варианты повышения мощности турбины: а – путем повышения давления пара перед турбиной; б – устройство обводной линии с клапаном для подачи дополнительного количества пара в трубопровод, соединяющий 1-й отбор с 1-й ступенью промперегрева; в – обвод с подачей пара в трубопровод за 2-й ступенью промперегрева; г – обвод с подачей пара в пространство между сепаратором и 1-й ступенью промперегрева; д – обвод с подачей пара в пространство между 1-й и 2-й ступенями промперегрева. Обводные линии вариантов № б, в, г, д показаны условно на одной схеме (рис. 1).

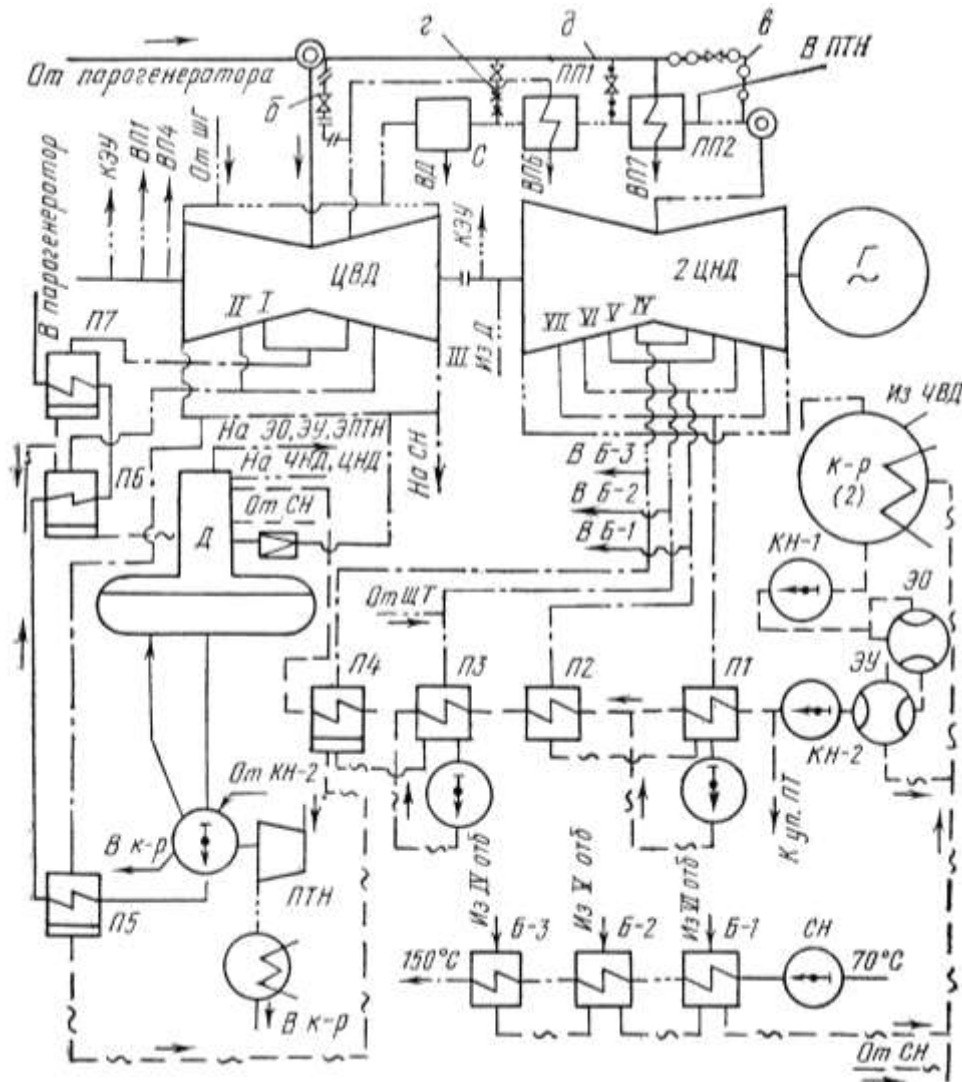


Рис. 1. Принципиальная тепловая схема турбины К-1000-60/1500:
 обвод по схемам: б — —//—; в — —○—; г — —×—; д — —●—

Во всех вариантах повышение тепловой мощности реактора связано с понижением температуры питательной воды, реакторной воды и высвобождением дополнительной реактивности. В варианте а необходимы дополнительные меры по адаптации реакторной установки, так как возрастают давление и температура теплоносителя 1-го контура. В вариантах б-д давление на выходе из парогенератора такое же, как и в базовом.

Во всех вариантах расход пара на турбоустановку принят на 15% выше расхода в базовом. Снижение температуры питательной воды производилось уменьшением расхода пара на ПВД и его дросселированием. Давление в деаэраторе и температура воды на выходе из ПНД П4 оставались одинаковыми и равными значениям в базовом варианте. Расход охлаждающей воды был неизменным, давление в конденсаторе определялось по типовой харак-

теристике; величины недогрева в подогревателях – на основании данных завода с рекомендованными поправками.

Результаты расчетов представлены в табл. 4.

Таблица 4

Параметры	Исходный базовый с $\bar{G} = 1,0$	Варианты с $\bar{G} = 1,15$				
		а	б	в	г	д
Расход пара на турбоустановку, кг/с	1786,11	2054,02	2054,02	2054,02	2054,02	2054,02
Давление на выходе из парогенератора, МПа	6,2745	7,4540	6,2745	6,2745	6,2745	6,2745
Давление в конденсаторе, МПа	0,00485	0,00555	0,0056	0,0061	0,0061	0,00608
Температура пара перед отсечными клапанами ЦНД, °С	250	252	247	235	240	240
Давление в сепараторе, МПа	1,1137	1,3540	1,367	1,4376	1,4546	1,4373
Влажность пара на выходе из последней ступени ЦНД	0,122	0,124	0,13	0,14	0,136	0,136
Электрическая мощность турбин, кВт	1005779 КПД = 0,3353	1187536	1130977	1114624	1114312	1113966
КПД при $\bar{G} = 1,15$		0,3442	0,3278	0,3230	0,3229	0,3228

Наибольшее возрастание мощности, как и следовало ожидать, наблюдается в варианте а. Это объясняется тем, что одновременно с ростом расхода пара растет давление пара перед турбиной. Этот вариант требует повышения давления и температуры теплоносителя в 1-м контуре, что практически невозможно.

Из других вариантов наиболее эффективен – б. Варианты в, г, д равноэкономичны: в вариантах г, д не произошло возрастания мощности по отношению к варианту в из-за того, что в них количество пара, идущего на промперегрев, больше, чем в варианте в, вследствие чего увеличение температуры промперегрева не принесло существенного прироста мощности. Отличие мощностей в вариантах в, г, д лежит в пределах точности расчетов. В вариантах г и д влажность пара на выходе из последней ступени ЦНД несколько ниже, чем в варианте в.

Следует подчеркнуть, что во всех рассмотренных вариантах влажность пара на выходе из последней ступени находится в допустимых пределах: наибольшая допустимая влажность – 0,15.

Подобный же расчет повторен для реальной схемы турбоустановки К-1000-60/1500-2М с двумя ПВД с дополнительными уточнениями.

Результаты сравнения показаны на рис. 2 точками 1 и 2 (номинальное значение $p_{ПГ}$), 3 и 4 (пониженное $p_{ПГ}$). Здесь по оси ординат отложена тепловая экономичность блока, по оси абсцисс – мощность турбины в безразмерных единицах относительно исходного базового варианта – точка 0. Обвод по схеме А при пониженном $p_{ПГ}$ (точка 3) на 5% менее эффективен по экономичности и на столько же по мощности, чем при повышении мощности с номинальным $p_{ПГ}$ (точка 1). Вариант обвода по схеме Б при сниженном $p_{ПГ}$ не экономичен и не приводит к повышению мощности (точка 4). Для сравнения там же нанесена точка а – вариант с повышенным $p_{ПГ} = 7,45$ МПа и базовым $G_{ф}$.

Выводы

1. Наибольшей эффективностью по величине прироста мощности турбины и экономичности обладает способ увеличения мощности путем повышения давления перед турбиной. Необходимы поиски путей его реализации в новых мощных блоках АЭС.

2. Наибольший эффект при увеличении мощности обводом части пара дает вариант с подачей пара в трубопровод, соединяющий 1-й отбор с 1-й ступенью промперегрева.

3. С точки зрения эрозийного износа все рассмотренные методы повышения мощности турбины при принятом увеличении расхода пара (15%) допустимы. При больших расходах в трех последних случаях (в – д) необходимо предусмотреть мероприятия по уменьшению влажности в последних ступенях ЦНД.

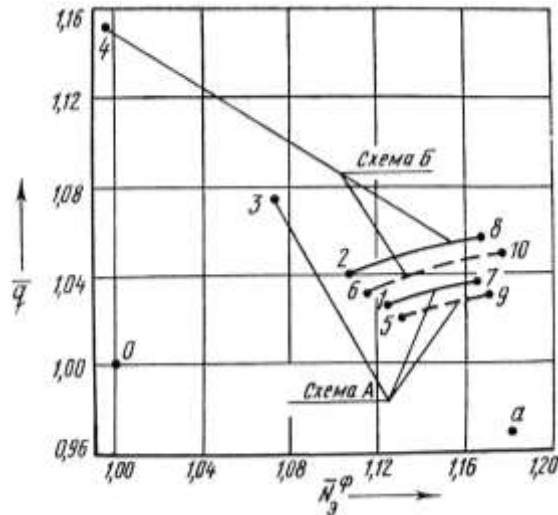


Рис. 2. Экономичность способов повышения мощности влажно-паровой турбины:

0 – базовый режим ($p_{\text{ПГ}}^{\phi} = 6,27$ МПа; $G_6 = 1\,786$ кг/с); режимы сверхноминальной мощности:

1, 2, 5, 6 – $p_{\text{ПГ}}^{\phi} = p_{\text{ПГ}}^{\phi}$, $G_6 = 1,15 G_6$; 3, 4 – $p_{\text{ПГ}}^{\phi} = 0,8 p_{\text{ПГ}}^{\phi}$, $G_6 = 1,14 G_6$;

7, 9 – $p_{\text{ПГ}}^{\phi} = p_{\text{ПГ}}^{\phi}$, $G_6 = 1,18 G_6$; 8, 10 – $p_{\text{ПГ}}^{\phi} = p_{\text{ПГ}}^{\phi}$, $G_6 = 1,23 G_6$; а – $p_{\text{ПГ}}^{\phi} = 1,19 p_{\text{ПГ}}^{\phi}$, $G_6 = 1,15 G_6$;

схема А – байпас в отбор № 1; схема Б – байпас в рассечку между С и ПП1

— – обогрев ПП1 отборным паром; - - - свежим

ЛИТЕРАТУРА

1. АЭС с ВВЭР: Режимы, характеристики, эффективность / Р.З. Аминов, В.А. Хрусталеv, А.С. Духовенский, А.И. Осадчий. М.: Энергоатомиздат, 1990. 264 с.
2. Зверков В.В. Резервы повышения мощности действующих АЭС с ВВЭР-440 / В.В. Зверков, Е.И. Игнатенко, А.П. Волков. М.: Энергоатомиздат, 1987. 77 с.
3. Хрусталеv В.А. Повышение мощности энергоблоков АЭС с PWR в США / В.А. Хрусталеv // Атомная техника за рубежом. 1988. № 5. С. 10-14.

Хрусталеv Владимир Александрович –

доктор технических наук, профессор кафедры «Тепловые электрические станции» Саратовского государственного технического университета

Шутиков Александр Викторович –

главный инженер филиала ФГУП концерн «Росэнергоатом» «Балаковской АЭС»

Статья поступила в редакцию 26.06.07, принята к опубликованию 05.12.07

В.А. Хрусталеv, М.В. Ульянова, С.В. Рязанов, В.А. Писанец

**АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕРОПРИЯТИЙ
ПО МОДЕРНИЗАЦИИ БРЫЗГАЛЬНЫХ БАССЕЙНОВ АЭС**

Рассмотрена эффективность использования испарительных установок для ограничения солевого загрязнения брызгальных бассейнов АЭС.

V.A. Khroustalev, M.V. Uljanova, S.V. Rjazanov, V.A. Pisanets

**ARRANGEMENTS EFFICIENCY ANALYSIS IN MODERNIZATION
OF SPRINKLING BASIN OF NPP**

The article focuses on the efficiency of evaporating installation usage for saline pollution limitation of sprinkling basin of NPP.

Как показывают данные эксплуатации, при скорости роста отложений на теплообменные поверхности конденсаторов турбин АЭС из технической воды от 0,5 до 3 мм/год имеет место снижение выработки электроэнергии от 120 до 250 млн. кВт·ч или от 1,7 до 3,5% в расчете на энергоблок 1000 МВт, работающий с коэффициентом использования установленной мощности (КИУМ) 81,5%.

Значительно меньше сведений об отложениях на теплообменных поверхностях, охлаждаемых технической водой реакторного отделения. Вместе с тем, по ряду данных аналогичная проблема имеется и при повышенном солесодержании в технической воде, поступающей из брызгальных бассейнов. В определенном смысле поддержание требуемой чистоты поверхностей теплообмена в первом контуре (теплообменники (ТО) штатного и аварийного расхолаживания, бассейна выдержки и др.) – не только необходимое условие экономичности, но и условие эксплуатационной безопасности и обеспечения допустимого радиационного фона. Особую значимость требования ограничения солесодержания технической воды имеют при удлиненных топливных циклах, когда меры по очистке поверхностей ТО «на ходу» весьма ограничены или малодейственны.

При длительной эксплуатации АЭС повышается солесодержание воды брызгальных бассейнов. Ввиду наличия неплотностей в теплообменном оборудовании (к примеру, облупленных сальниковыми уплотнениями) для АЭС возможен слабый переток радиоактивности в охлаждающую воду. Соли, содержащиеся в охлаждающей воде брызгальных бассейнов АЭС, способны накапливать долгоживущие радионуклиды и при попадании даже слабо-радиоактивных солей в водоемы происходит концентрирование радионуклидов [1, 2]:

в пене – 100-10000 раз;

в зеленых водорослях – 800-50000 раз;

в личинках насекомых – 100-100000 раз.

Опыт эксплуатации АЭС с ВВЭР-1000 показал, что суммарная активность по ^{134}Cs , ^{137}Cs может составлять соответственно до 22÷38 Бк/кг. К тому же, повышение солесодержания охлаждающей воды при замкнутом водообороте вызывает отложение солей на поверхностях нагрева оборудования и, таким образом, негативно отражается на состоянии теплообменного оборудования контура отвода тепла. За счет этого происходит снижение коэффициента теплопередачи и, как следствие, возникает необходимость увеличения расхода охлаждающей воды.

Уменьшение солености охлаждающей воды в брызгальном бассейне путем отвода засоленной воды не представляется возможным, так как при попадании даже слабо радиоактивных солей в водоемы может происходить концентрирование радионуклидов [1, 2].

Видимо, нельзя считать самодостаточными также биологические способы нормализации солевого состояния, например, фиторемидиацию – высадку подводных растений, способных поглощать растворенные в воде соли. В условиях региона Среднего Поволжья, такие растения, как рдест-пронзеннолистный и другие могут расти под слоем воды до 5 м, однако они, во-первых, создавали бы затруднения для водообмена и устойчивого охлаждения потока сбрасываемой нагретой воды, во-вторых, требовали бы постоянного обновления (укоса и новой высадки) в связи со старением и исчерпанием их солепоглощающей способности.

Такой способ, как фиторемидиация, потребует также специального захоронения скошенных под водой растений.

Вместе с тем, по нашему мнению, весьма продуктивным может оказаться способ нормализации солености в брызгальном бассейне путем выпаривания части воды на горизонтально-трубных опреснительных установках [3, 4], питаемых паром нерегулируемых регенеративных отборов турбоустановок АЭС. Образующаяся опресненная вода после охлаждения до естественной температуры (возможна утилизация части теплоты), сбрасывается в брызгальный бассейн. Забор и сброс осуществляются с учетом достижения максимальной эффективности размешивания. Основные параметры ДОУ ГТПА указаны в табл. 1 [3, 4].

Таблица 1

Основные параметры опреснительных установок ДОУ ГТПА

Показатели	ДОУ-25	ДОУ-50
ДИСТИЛЛЯТ		
производительность, м ³ /ч	25,0	700,0
температура (при температуре исходной воды 25°С)	30	35
массовая концентрация солей, мг/л	10	10
ИСХОДНАЯ ВОДА		
давление, МПа	0,2	0,2
расчётная температура исходной воды, °С	25	25
температура кипения в первой ступени, °С	82-100	90-100
расход, м ³ /ч	125	225
в том числе на опреснение, м ³ /ч	50	100
степень концентрирования морской воды	1,6-2,5	1,6-2,5
промышленных сточных вод	5-200	5-200
ПАР		
для осуществления процесса опреснения:		
давление, МПа	0,15-1,0	0,15-1,0
расход, т/ч	2,0	3,5
для создания и поддержания вакуума:		
давление, МПа, не менее	0,6	0,6
расход, т/ч	0,2	0,3

На рис. 1 изображена принципиальная схема установки по поддержанию солевого баланса брызгального бассейна АЭС.

Схема, представленная на рис. 1, работает следующим образом. Продувочная вода с расходом D_{np} поступает из брызгального бассейна на дистилляционную опреснительную установку с горизонтально-трубчатым пленочным аппаратом (ДОУ ГТПА), в которой происходит концентрирование рассола примерно в 200 раз [3, 4]. Образовавшийся дистиллят с расходом D возвращается обратно в брызгальный бассейн. Рассол с расходом $(D_{np}-D)$ посту-

пает в установку предельного выпаривания. Образовавшийся в установке предельного выпаривания дистиллят с расходом D_1 возвращается обратно в брызгальный бассейн. Кубовый остаток выпарных аппаратов установки предельного выпаривания направляют на временное хранение и дальнейшую переработку, которая может заключаться в его битумировании, цементировании, остекловывании и получении солевого плава. Потеря воды с испарением D_H и с кубовым остатком D_K компенсируется за счет подпитки брызгального бассейна дистиллятом или химочищенной водой от водоподготовительной установки АЭС.

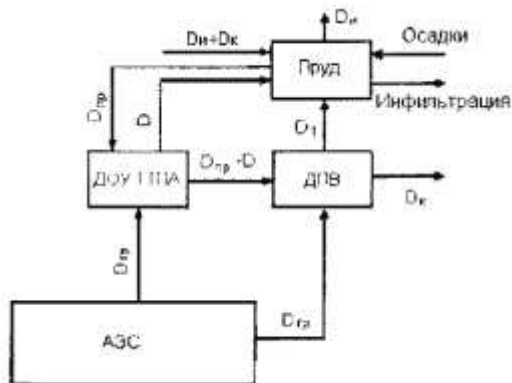


Рис. 1. Схема установки по содержанию солевого баланса брызгального бассейна АЭС

Для установившегося солевого баланса брызгального бассейна величина продувки находилась по следующей упрощенной формуле:

$$D_{пр} = \frac{D_u S_{доу}}{S_б - S_{доу}}, \quad (1)$$

где $S_{доу} = 0,01$ г/л – солесодержание дистиллята, получаемого в ДОУ ГТПА [3, 4]; $S_б$ – требуемое солесодержание воды в брызгальном бассейне, г/л; D_u – потеря воды за счет естественного испарения (принята исходя из данных, приведенных в табл. 2).

Таблица 2

Водопотребление и водоотведение по четырехблочной АЭС с ВВЭР

Наименование водопотребителей	Кол-во рабочих дней в году	Ед. изм.	Водопотребление		Место сброса утилизации сточных вод
			м ³ /сут.	т.м ³ /год	
Покрывание потерь с естественным испарением в брызгальных бассейнах	365	м ³	22272	8129,3	Безвозвратные потери

На рис. 2 приведен график зависимости величины продувки от требуемого солесодержания воды в бассейне.

Из графика, приведенного на рис. 2, видно, что потребный расход продувочной воды составляет от 100 до 135 м³/ч в зависимости от требуемого солесодержания воды.

Эффект от применения дистилляционных опреснительных установок для поддержания солевого баланса заключается в улучшении экологической ситуации на территории АЭС за счет уменьшения количества источников радиоактивности, каким является брызгальный бассейн АЭС, а также в отсутствии необходимости в сооружении второго бассейна при строительстве второй очереди станции. Улучшение экологической обстановки на территории стан-

ции и вокруг нее приводит к значительному снижению экологических платежей. В настоящее время разрабатывается экономико-математическая модель выбора величины продувки с учетом стоимостного ряда выпускаемых в России ДОУ ГТПА [4].

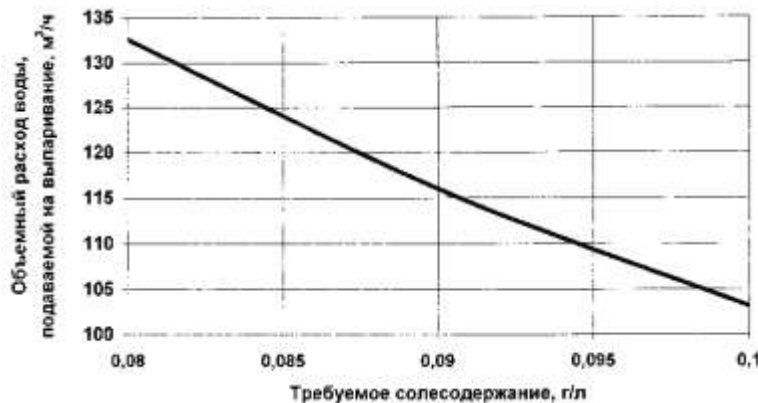


Рис. 2. Зависимость величины продувки от требуемого солевого содержания воды в бассейне и от величины испарения воды

ЛИТЕРАТУРА

1. Хоникевич А.А. Очистка радиоактивно-загрязненных вод лабораторий и исследовательских ядерных реакторов. Изд. 3-е, перераб. и дополн. / А.А. Хоникевич. М.: Атомиздат, 1974. 312 с.
2. Кузнецов Ю.В. Основы очистки вод от радиоактивных загрязнений. Изд. 2-е, перераб. и дополн. / Ю.В. Кузнецов, В.Н. Щebetковский, А.Г. Труссов; под ред. чл.-кор. АН СССР В.М. Вдовенко. М.: Атомиздат, 1974. 360 с.
3. Установки дистилляционные опреснительные горизонтально-трубные пленочные. Екатеринбург: ЗАО НПП «МАШПРОМ», 2000. 80 с.
4. ДОУ с пленочными горизонтально-трубными испарителями (ДОУ ГТПА-700). Екатеринбург: НПО «Экохим» ВНИПИ протехнологии, 1999. 45 с.

Хрусталеv Владимир Александрович –

доктор технических наук, профессор кафедры «Тепловые электрические станции» Саратовского государственного технического университета

Ульянова Марина Викторовна –

заместитель директора по экономике филиала ФГУП концерн «Росэнергоатом» «Балаковская АЭС»

Рязанов Станислав Викторович –

начальник лаборатории экологии филиала ФГУП концерн «Росэнергоатом» «Балаковская АЭС»

Писанец Василий Александрович –

аспирант кафедры «Тепловые электрические станции» Саратовского государственного технического университета

Статья поступила в редакцию 26.06.07, принята к опубликованию 05.12.07

УДК 621.311

А.И. Андрющенко, Ю.Е. Николаев, Е.А. Ларин, В.Н. Осипов

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТОВ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ТЕПЛОФИКАЦИИ ГОРОДОВ

Рассмотрены недостатки существующих методов расчета эффективности систем теплофикации городов в новых условиях, приводящие к ошибочным решениям. Предложено создание комбинированных систем теплоснабжения городов, сочетающих местное и централизованное теплоснабжение, на основании энерготехнологических комплексов и однотрубных низкотемпературных тепловых сетей с использованием местных видов топлива. Рекомендован показатель для оценки эффективности эксплуатации ТЭЦ.

A.I. Andriushenko, Yu.E. Nikolaev, E.A. Larin, V.N. Osipov

IMPROVEMENT OF THE CALCULATION METHODS OF CITIES HEAT SUPPLY SYSTEMS EFFICIENCY

Existing methods' defects of calculation of the efficiency of cities' heat supply systems in new conditions lead to wrong decisions. The authors present complex heat supply systems combining local and centralized heat supply, on the base of energy technologies complexes and one-trumpet low-temperature of the heat networks and use of locally available types fuel. A way of estimation of efficiency to usages heat and power plants is given here as well.

Применяемые в настоящее время методы расчетов энергетической эффективности теплофикационных систем были разработаны еще в середине XX века [1]. Хотя за истекший период произошли изменения в экономическом устройстве страны и технологии комбинированной выработки электрической и тепловой энергии, ряд факторов остается неучтенным. Это часто приводит к ошибочным решениям, снижающим расчетный и фактический экономический эффект теплофикации, и, зачастую, к отказу от ее применения.

Несмотря на то, что в последний период принят и реализован ряд решений по ограничению конденсационной выработки электроэнергии на региональных ТЭЦ, фактический расход наиболее ценного топлива – природного газа, сжигаемого в городах, увеличивается вследствие непрерывно растущей доли выработки тепловой энергии на котельных. Выработка электроэнергии на ТЭЦ приводит к уменьшению расхода топлива на загородных КЭС, где можно применять другие виды топлива, в том числе наиболее дешевое местное топливо. Следует иметь в виду, что сжигание на городских ТЭЦ природного газа приводит к экономии менее ценного и имеющего большие запасы местного топлива на выработку электроэнергии (уголь, торф, мазут и др.) и сопровождается выбросом в атмосферу вредных веществ, что негативно сказывается на экологической ситуации в городах. Сооружение новых городских ТЭЦ, в том числе самых совершенных ГТУ-ТЭЦ и ПГУ-ТЭЦ, приводит к существенному удорожанию их строительства за счет высокой стоимости земли. К тому же тепловые потери в магистральных сетях вызывают перерасход топлива, сужают рациональные области применения ТЭЦ и не допускают дальнего теплоснабжения [2, 3].

Вместе с тем, учет того реального факта, что тепловые потери в магистральных трубопроводах ТЭЦ вызывают почти в 2 раза меньший перерасход теплоты топлива, чем при теплоснабжении от котельных [4], позволяет при замене стальных труб на пластмассовые с транспортом воды с относительно низкой температурой значительно повысить эффективность дальнего теплоснабжения. Более того, при осуществлении от загородных ТЭЦ только горячего водоснабжения, а отопления городов – от малых теплоисточников количество сжигаемого топлива в городах на теплоснабжение уменьшается в 2-3 раза, а в самый экологически неблагоприятный период года (летом) падает до нуля. При этом на загородных ТЭЦ можно сжигать наиболее дешевое топливо [5].

То, что действительные тепловые потери в сетях ТЭЦ вызывают значительно меньший прирост расхода топлива в системе, чем такие же потери в сетях районных котельных, можно доказать следующим образом. Пусть по каким-либо причинам тепловые потери в сетях вырастут на величину ΔQ_{mc} . При тепловом КПД котельной $\eta_{кот} < 1$ выработка теплоты составит $\Delta Q_{кот} = \Delta Q_{mc}$, а расход топлива в системе увеличится на величину

$$\Delta B_{кот} = \frac{\Delta Q_{mc}}{\eta_{кот} \cdot Q_n^p}. \quad (1)$$

В случае теплоснабжения от ТЭЦ, отборным паром турбин будет дополнительно выработана электроэнергия в количестве $\Delta \mathcal{E}_{тэц} = \Delta Q_{mc} \cdot y_3^m$, а дополнительный расход топлива на ТЭЦ составит

$$\Delta B_{тэц} = \frac{\Delta Q_{mc}}{K_{ум}^m \cdot Q_n^p} \cdot (1 + y_3^m), \quad (2)$$

где y_3^m – удельная выработка электроэнергии на тепловом потреблении; $K_{ум}^m$ – коэффициент использования теплоты топлива на ТЭЦ.

Из (1) и (2) следует, что при одинаковых величинах ΔQ_{mc} расход топлива на ТЭЦ увеличивается больше, чем в котельной. Однако при сохранении электропотребления в энергосистеме одновременно произойдет уменьшение расхода топлива на замещаемой КЭС на величину

$$\Delta B_{кэс} = \frac{\Delta \mathcal{E}_{тэц}}{\eta_{эс} \cdot \eta_3^{кэс} \cdot Q_n^p}, \quad (3)$$

где $\Delta \mathcal{E}_{тэц}$ – дополнительная выработка электроэнергии из-за прироста потерь в тепловых сетях; $\eta_{эс}$, $\eta_3^{кэс}$ – КПД электрических сетей и КЭС.

Вычитая из (2) выражение (3), получим перерасход топлива в системе теплофикации на величину

$$\Delta B_{сис}^{mf} = \Delta B_{тэц} - \Delta B_{кэс} = \frac{\Delta Q_{mc}}{Q_n^p} \left(\frac{1 + y_3^m}{K_{ум}^m} - \frac{y_3^m}{\eta_{эс} \cdot \eta_3^{кэс}} \right). \quad (4)$$

Отсюда находим соотношение между конечными перерасходами топлива β вследствие дополнительных тепловых потерь (ΔQ_{mc}) в теплофикационной и отдельной системах теплоснабжения

$$\beta = \frac{\Delta B_{сис}^{mf}}{\Delta B_{кот}} = \left(\frac{1 + y_3^m}{K_{ум}^m} - \frac{y_3^m}{\eta_{эс} \cdot \eta_3^{кэс}} \right) \cdot \eta_{кот}. \quad (5)$$

На рис. 1 приведены результаты расчетов величины β в зависимости от показателей совершенства теплофикационных и конденсационных установок (при $\eta_{кот}=0,9$, $\eta_{эс}=0,95$). Из рис. 1 видно, что решающее влияние на системный перерасход топлива имеют величина удельной выработки электроэнергии на тепловом потреблении ТЭЦ и электрический КПД

замещающей КЭС. Чем больше y_9^m , тем меньше перерасход топлива в системе, вызванный тепловыми потерями в сетях.

Аналогичные результаты достигаются при замене горячего водоснабжения от собственной котельной на использование для этой цели обратной воды из системы теплоснабжения от ТЭЦ. Остановившая на летний период отопительную котельную и забирая воду из ближайшей сети ТЭЦ (с помощью специальной установленной переемычки), также достигается определенная экономия топлива. В результате вредные выбросы в городах резко сокращаются.

В том случае, когда выработка электроэнергии в системе достаточна, можно с помощью тепловых насосов увеличить отпуск теплоты от ТЭЦ или выработать дополнительное количество холода («сухого льда»), что также обеспечивает соответствующую экономию топлива.

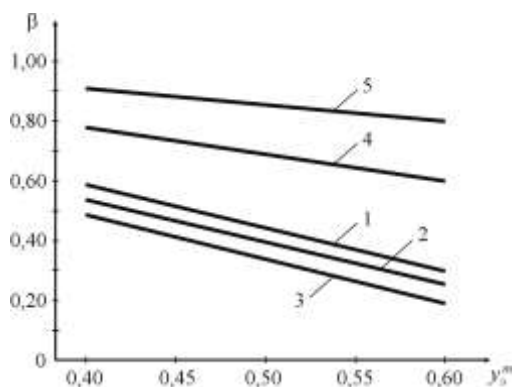


Рис. 1. Зависимость величины β от показателей совершенства теплофикационных и конденсационных установок: 1 – $K_{um}^m = 0,80$, $\eta_9^{кэс} = 40,0\%$; 2 – $K_{um}^m = 0,82$, $\eta_9^{кэс} = 40,0\%$; 3 – $K_{um}^m = 0,85$, $\eta_9^{кэс} = 40,0\%$; 4 – $K_{um}^m = 0,80$, $\eta_9^{кэс} = 50,0\%$; 5 – $K_{um}^m = 0,80$, $\eta_9^{кэс} = 60,0\%$

Постепенный учет различных факторов в последние годы привел к идее создания комбинированных систем теплоснабжения городов, которые в максимальной степени сочетают преимущества местного и централизованного теплоснабжения и снижают влияние их недостатков. К таким системам можно отнести сочетание традиционных ТЭЦ с мини-ТЭЦ на базе малых ГТУ или поршневых ДВС, располагаемых непосредственно у теплопотребителей [5]. Кроме того, рядом с мини-ТЭЦ устанавливаются резервные мини-котельные, способные покрывать пиковые тепловые нагрузки. Главный выигрыш от такого сочетания теплоисточников – достигаемое уменьшение тепловых потерь в сетях при частичном сохранении комбинированного способа выработки электроэнергии. Однако при такой комбинации источников теплоты практически невозможна замена природного газа углем или местным топливом, прокладка тепловой сети остается двухтрубной, работающей при высоком давлении.

Наиболее благоприятным для дальнего размещения ТЭЦ от города и возможности их перевода на дешевое топливо является применение однотрубных систем дальнего низкотемпературного теплоснабжения (рис. 2).

Реализация приведенной схемы теплоснабжения дает возможность перевода ТЭЦ на любое низкосортное топливо. Круглосуточно и круглогодично работающая ТЭЦ имеет близкую к постоянной тепловую нагрузку. Полное исключение конденсационной выработки электроэнергии на ТЭЦ при самых низких давлениях отборного пара обеспечивается при покрытии от ТЭЦ только горячего водоснабжения (с температурой около 60°C) и применении пластмассовых труб со сроком службы до 50 лет. Прирост удельной выработки электроэнер-

гии в этих условиях позволяет ограничиваться использованием для отопления данного города только мини-котельных на имеющемся в каждом доме природном газе. Суммарный годовой расход газа, сжигаемого в черте города, оказывается минимальным. При этом относительно низкая стоимость тепловых сетей и пониженные тепловые потери позволяют размещать ТЭЦ на десятки километров от города, вблизи источников воды.

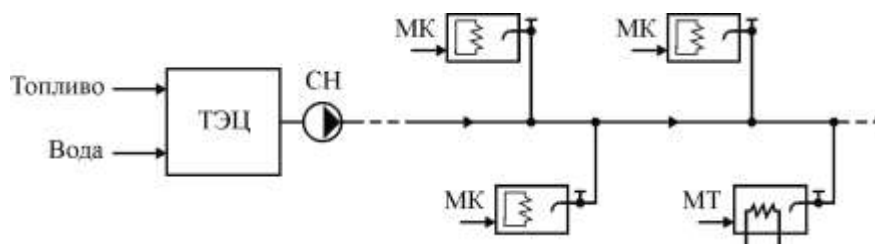


Рис. 2. Система дальнего низкотемпературного водоснабжения:
СН – сетевые насосы; МК – мини-котельные; МТ – мини-ТЭЦ

Предложенная система теплоснабжения городов обеспечивает повышение надежности теплоснабжения за счет саморезервирования. Горячее водоснабжение – имеющимися котельными, а отопительной нагрузки – горячей водой от ТЭЦ.

Осуществляемая в настоящее время политика уменьшения количества использования природного газа требует решения задачи диверсификации видов используемого топлива на ТЭС. Большие расстояния и невозможность транспорта большого количества углей в европейскую часть страны требуют перехода большинства ТЭС на топливный мазут, подмосковный бурый уголь, торф и местные сланцы. Для Поволжского региона перспективным топливом практически являются только мазуты, в первую очередь сернистые.

Вследствие высокой стоимости сернистых мазутов и в определенной мере других местных топлив наиболее рациональным является их использование в энерготехнологических комплексах (ЭТК) [6]. Такой комплекс может сочетать газификацию мазута, очистку полученного газа от сажи и сернистых соединений, а также вырабатывать генераторный газ, электроэнергию и тепловую энергию для горячего водоснабжения города (рис. 3). Отопительная нагрузка здесь покрывается от городских теплоисточников.

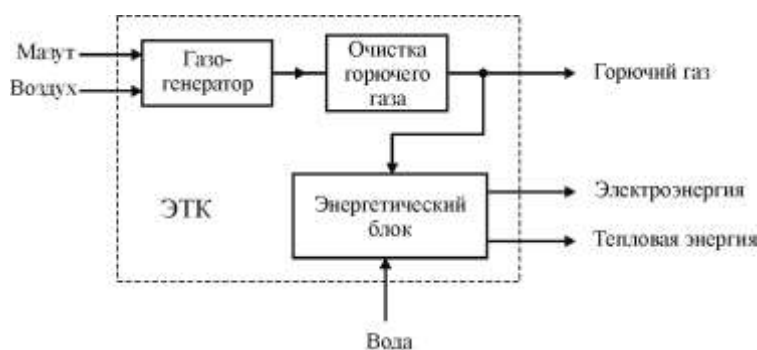


Рис. 3. Принципиальная схема ЭТК с газификацией мазута

Особое значение имеют показатели эффективности эксплуатации ТЭЦ и комплексов в целом. Следует отметить, что главным показателем термодинамического совершенства энер-

готехнологического комплекса при его проектировании (выборе тепловой схемы и оптимизации параметров) является эксергетический КПД. Использование его совместно с тепловым балансом, капиталовложениями и другими материальными расходами позволяет выбрать экономически наиболее выгодные параметры и эксплуатационные характеристики для регулирования процессов работы как отдельных агрегатов, так и комплекса в целом. Для этого необходимо, чтобы между моментом их получения и возможностью регулирования был минимальный промежуток времени (около часа). Расчетные данные для определения показателей эксплуатационной эффективности должны измеряться непосредственно и не зависеть от каких-либо условностей.

Заметим, что удельные расходы топлива на выработанную электрическую b_e и тепловую энергию b_m , основанные на каком-либо условном методе распределения топлива между отдельными видами продукции, не могут являться показателями эффективности. Не удовлетворяет этим требованиям и удельная выработка электроэнергии на тепловом потреблении хотя бы потому, что невозможно непосредственным измерением определить этот показатель. Однако при конструировании теплофикационных паротурбинных установок y_3^m вполне подходящий показатель.

Также малоприспособным для использования при эксплуатации является и эксергетический КПД, прежде всего потому, что измеряемая эксергия зависит от температуры окружающей среды, которая все время меняется, оказывая влияние на параметры рабочего тела и теплоносителя.

От этого избавлен новый эксплуатационный показатель, называемый «абсолютным электрическим КПД ТЭЦ» и равный

$$\eta_3^{abc} = \frac{\mathcal{E}_\Sigma}{B_\Sigma \cdot Q_n^p}, \quad (6)$$

где \mathcal{E}_Σ , B_Σ – суммарные величины отдаваемой в сеть электрической энергии и расходуемого топлива.

Важным положительным качеством η_3^{abc} является практическая возможность вывести его на показывающий прибор, поскольку можно непосредственно измерить суммарную выработку электроэнергии и расходуемое при этом топливо. Чтобы при этом учитывать тепловые потери всего объекта, рядом должен быть установлен прибор, показывающий величину коэффициента использования теплоты топлива.

Формула (6) позволяет заметить малейший перерасход топлива, вызываемый увеличением конденсационной выработки электроэнергии и перерасхода, вызываемого потерями теплоты в сетях ТЭЦ или от дросселирования острого пара ТЭЦ при невозможности увеличения его отбора из турбины.

Абсолютный электрический КПД вполне пригоден и для оценки эффективности эксплуатации (выбора оптимальных режимов) и для энерготехнологических комплексов, отличающихся от обычных ТЭЦ выработкой и отдачей потребителям нового топлива – генераторного газа. Для этого нужно только теплоту сгорания этого газа ($B_{zz} \cdot Q_{zz}^p$) включить в знаменатель дроби (6). Расчетная формула такого КПД примет вид

$$\eta_3^{kom} = \frac{\mathcal{E}_\Sigma}{B_\Sigma \cdot Q_n^p - B_{zz} \cdot Q_{zz}^p}. \quad (7)$$

В формуле (7) принято, что вырабатываемый генераторный газ по своим термодинамическим свойствам приравнивается к условно несожженному топливу.

Таким образом, абсолютный электрический КПД вполне основательно отражает уровень использования работоспособной части топлива – его эксергии и освобождает от эксергетического анализа теплотехнических процессов.

Следует только иметь в виду, что формула непосредственно не учитывает потери теплоты на ТЭЦ в целом. Для этого наряду с η_3^{abc} необходимо иметь показатель, вытекающий из теплового баланса каждого агрегата и ТЭЦ в целом. Таким дополнительным показателем во всех случаях должен применяться коэффициент использования теплоты топлива, равный отношению вырабатываемой всеми способами и отданной в сеть электроэнергии и теплоты к теплоте сожженного во всем комплексе топлива

$$K_{um} = \frac{\mathcal{E}_\Sigma + Q_\Sigma}{B_\Sigma \cdot Q_n^p - B_{\Sigma\Sigma} \cdot Q_{\Sigma\Sigma}^p}. \quad (8)$$

Таким образом, используя совместно выражения (7) и (8), можно определить энергетическую эффективность эксплуатации всего энерготехнологического комплекса.

Выводы

1. Новая экономическая обстановка в стране и переход на современную рыночную экономику требует пересмотра старых методов расчета и оптимизации систем теплоснабжения городов.

2. Необходим переход от существующей «газовой паузы» к использованию в каждом регионе наиболее экономичного по местным условиям вида топлива.

3. Для ТЭЦ, располагаемых как внутри города, так и за городом, следует отказаться от применения в тепловых сетях высокотемпературного теплоносителя.

4. При строительстве тепловых сетей от ТЭЦ необходимо применять пластиковые материалы, позволяющие вести прокладку труб непосредственно в грунте и сроком службы не менее 50 лет.

5. Надстройку газовыми турбинами паротурбинных блоков действующих ТЭЦ целесообразно применять только при полном обеспечении экологических требований и только в тех случаях, когда необходима дополнительно вырабатываемая в ПГУ электроэнергия. То же относится к мини-ТЭЦ.

6. Основным показателем, обеспечивающим наибольший энергетический эффект от эксплуатации работающих ТЭЦ, ТЭС, КЭС, ПГУ и энерготехнологических комплексов, является абсолютный электрический КПД, который необходимо применять одновременно с коэффициентом использования теплоты топлива.

ЛИТЕРАТУРА

1. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети / Е.Я. Соколов. М.: Изд-во МЭИ, 2001. 472 с.
2. Андрющенко А.И. Выбор перспективных схем теплоснабжения городов с использованием парогазовых технологий / А.И. Андрющенко, Ю.Е. Николаев // Промышленная энергетика. 2004. № 9. С. 22-25.
3. Андрющенко А.И. Экологическая и экономическая эффективность замены устаревшего паротурбинного оборудования ТЭЦ на газотурбинное и парогазовое / А.И. Андрющенко, Ю.Е. Николаев // Промышленная энергетика. 2007. № 7. С. 2-6.
4. Николаев Ю.Е. Повышение эффективности систем теплофикации с учетом взаимного влияния источника и тепловых сетей / Ю.Е. Николаев, А.И. Андрющенко // Проблемы теплофикации. Опыт и перспективы: сб. докл. науч.-техн. конф. М.: ОАО РАО «ЕЭС России», 2006. С. 51-58.
5. Андрющенко А.И. Возможности повышения эффективности централизованного теплоснабжения городов / А.И. Андрющенко // Промышленная энергетика. 2002. № 6. С. 15-18.
6. Андрющенко А.И. Основы проектирования энерготехнологических установок электростанций / А.И. Андрющенко, А.И. Попов. М.: Высшая школа, 1980. 240 с.

Андрющенко Анатолий Иванович –

доктор технических наук, профессор кафедры «Теплоэнергетика»
Саратовского государственного технического университета

Николаев Юрий Евгеньевич –

доктор технических наук, профессор кафедры «Теплоэнергетика»
Саратовского государственного технического университета

Ларин Евгений Александрович –

кандидат технических наук, профессор кафедры «Теплоэнергетика»
Саратовского государственного технического университета

Осипов Валерий Николаевич –

кандидат технических наук, доцент кафедры «Теплоэнергетика»
Саратовского государственного технического университета

Статья поступила в редакцию 30.05.07, принята к опубликованию 05.12.07

УДК 621.311.22

Е.Н. Кондыба, Е.А. Ларин, Л.И. Пешков, Л.П. Шелудько

ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ МОДЕРНИЗАЦИИ ТЭЦ ПО ПАРОГАЗОВОМУ ЦИКЛУ

Рассматриваются проблемы и задачи надстройки действующих ТЭЦ блоками ПГУ. Отмечается, что модернизация ТЭЦ с подачей пара от котлов-утилизаторов на паровые турбины экономичнее строительства новых конденсационных блоков ПГУ. Приводятся аналитические выражения для определения эффективности надстройки ТЭЦ ПГУ.

E.N. Kondiba, E.A. Larin, L.I. Peshkov, L.P. Sheludko

PROBLEMS AND WAYS OF MODERNIZATION OF HPP ON STEAM & GAS SYCLE

Problems and tasks of superstructure of functioning HPP are described in this article. It's mentioned here that modernization of HPP with steam from steam-boilers with utilizations brought to steam turbines are economically more efficient than construction of new condensational blocks. Analytical data for efficiency determination of superstructure is given here as well.

Более чем пятнадцатилетний период переходного периода к рыночной экономике крайне негативно подействовал на энергетическую базу России и, прежде всего, на региональные теплоэлектроцентрали. Это касается как существенного ухудшения экономических показателей по комбинированной выработке тепловой и электрической энергии, так и высокой степени физического износа и морального старения их основного оборудования. Повышение удельных расходов топлива на вырабатываемую энергию определяется прежде всего резким спадом в промышленном производстве и тарифной политикой на энергоносители, способствующей переходу зна-

чительной части потребителей на автономные теплоисточники. Отказ от инвестиционной составляющей в энергетических тарифах, недостаточное финансирование ремонтов основного и вспомогательного оборудования ТЭЦ и искусственное продление их рабочих ресурсов стимулировали ухудшение технического состояния оборудования ТЭЦ.

Практически полное прекращение капиталовложений на строительство новых и модернизацию существующих электростанций в условиях начавшегося подъема экономики страны приводит к появлению дефицита в потреблении электроэнергии. В этих условиях создается программа форсированного строительства новых мощных ТЭС с парогазовыми блоками мощностью в сотни мегаватт, требующего выделения в ближайшие годы из бюджета и стабилизационного фонда огромных финансовых средств.

Вместе с тем в программе развития энергетики РАО ЕЭС второстепенное место отведено техническому перевооружению ТЭЦ. При низком уровне присоединенных тепловых нагрузок они в своей массе становятся неконкурентоспособными на рынке электроэнергии. Более низкая, чем у КЭС, тепловая экономичность ТЭЦ на конденсационных режимах вызвала снижение выработки электроэнергии и, как следствие, рост тарифов на электрическую и тепловую энергию. Особенно в летний и осенне-весенний периоды года работают с низкой мощностью, или даже останавливаются турбоагрегаты Т-110 и ПТ-135, имеющие сравнительно небольшую наработку.

Основные технические, режимные и экономические проблемы существующих ТЭЦ:

– наработка паротурбинного оборудования для ТЭЦ в среднем составляет 75-80% от суммарного паркового ресурса с учётом их модернизации и разрешенного продления;

– нарастающие темпы физического износа и морального старения генерирующего оборудования, которые вводят режимы работы ТЭЦ в зону повышенного риска технологических отказов и аварий;

– уменьшение располагаемой мощности и объёмов выработки электроэнергии из-за практически безвозвратного снижения теплопотребления промышленными предприятиями;

– прекращение эксплуатации и консервация турбоагрегатов типа Р, при сохранении затрат на их регламентное обслуживание, вывод из эксплуатации части энергетических котлов и турбин в летний период;

– коэффициент использования топлива большинства ТЭЦ снизился в отопительный период до 0,45-0,5. В межотопительный период происходит дальнейшее его снижение до величин 0,36-0,3;

– уменьшение конденсационной выработки электроэнергии на ТЭЦ вплоть до уровня обеспечения технологической брони. При этом величина максимальной рабочей конденсационной мощности на большинстве ТЭЦ с давлением 9 МПа в летний период составляет 25-30% от их располагаемой конденсационной мощности;

– высокие удельные расходы топлива, особенно в летний период (до 510 г/кВт·ч);

– сокращение доли выработки электроэнергии по теплофикационному циклу в межотопительный период – основная причина увеличения удельного расхода условного топлива на отпуск электрической энергии.

В качестве примера на рис. 1 показан характер изменения по месяцам года тепловой экономичности двух типичных промышленно-отопительных ТЭЦ «Волжской ТГК» – современной станции большой мощности с турбоагрегатами типов Т и ПТ и станции меньшей мощности на 9 МПа, в дальнейшем расширенной блоком 13 МПа с турбинами Р и Т.

В отопительный период обе ТЭЦ по своим показателям успешно конкурируют с КЭС, но в межотопительный период года устаревшая ТЭЦ становится неконкурентоспособной на рынке электроэнергии.

Единственным путем улучшения мощности и экономичности действующих ТЭЦ с целью повышения их конкурентоспособности является модернизация по парогазовой технологии.

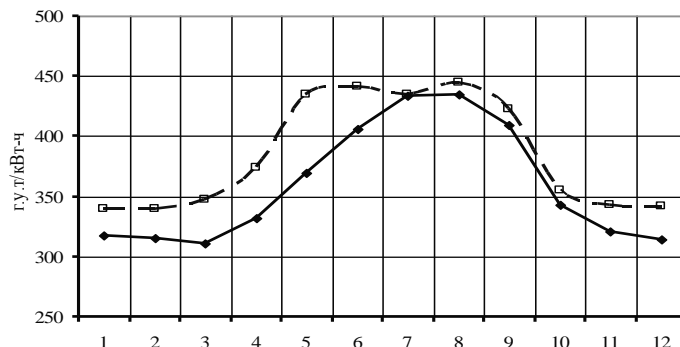


Рис. 1. Изменение удельного расхода топлива на выработку электроэнергии:
 — ТЭЦ 13 МПа со средним сроком службы агрегатов 30 лет;
 - - - - устаревшая ТЭЦ с блоками 9 и 13 МПа

Модернизация ТЭЦ с их надстройкой ГТУ с котлами-утилизаторами (КУ) в ряде случаев экономически эффективнее строительства новых конденсационных парогазовых блоков, так как при этом могут быть использованы имеющаяся инфраструктура действующих ТЭЦ, их основное турбинное и вспомогательное оборудование.

Учитывая многообразие ТЭЦ по назначению, параметрам пара, электрической и тепловой мощности, видам и величинам присоединенных тепловых нагрузок, составу основного оборудования, срокам его наработки и по ряду других факторов, надстройка ТЭЦ парогазовыми блоками не может быть произведена по одному – двум типовым проектам. Для каждой из ТЭЦ оптимальное решение по их надстройке требует проведения технико-экономического анализа нескольких альтернативных вариантов.

Нужно отметить несколько ключевых моментов, общих для многих ТЭЦ. Прежде всего, действующие станции этого типа должны быть разделены на несколько групп по электрической мощности, величине и характеру присоединенных тепловых нагрузок, параметрам пара и степени изношенности основного оборудования. Для этих групп потребуются применение импортных или отечественных газотурбинных агрегатов различной мощности, стоимости и экономичности. Как это видно из рис. 1, в первую очередь должны надстраиваться блоками ПГУ устаревшие ТЭЦ с параметрами 3 и 9 МПа, так как они имеют наихудшие показатели тепловой экономичности.

Анализ Инженерного центра РАО ЕЭС говорит об экономической целесообразности использования при надстройках ТЭЦ отечественных энергетических ГТУ – мощностью 12-18 МВт для ТЭЦ с давлением пара 3 МПа, 25-35 МВт для 9 МПа и 45-55 МВт для 13 МПа. К сожалению, на данном этапе наша промышленность не может предложить сертифицированные ГТУ из этого мощностного ряда. Поэтому надстройка первых модернизированных ТЭЦ будет производиться с использованием импортных ГТУ мощностью 65-70 МВт производства ряда зарубежных фирм.

В разрабатываемых в настоящее время проектах рассматривается несколько вариантов надстройки действующих ТЭЦ – с размещением на их территории автономных блоков ПГУ и с установкой оборудования ПГУ в расширяемых главных корпусах.

В вариантах с применением автономных блоков ПГУ планируют установку ГТУ с КУ двух давлений и специальных паровых турбин с параметрами пара 7-8,5 МПа. Пар низкого давления от КУ подают в ЧНД паровых турбин или в деаэраторы.

В вариантах с расширением главных корпусов надстройка чаще всего планируется с установкой ГТУ, паровых турбин типа Т и паровых котлов сбросного типа с параметрами, стандартными для данных станций. Удельные капиталовложения в кВт дополнительной

мощности надстройки в разрабатываемых проектах надстройки с применением импортных ГТУ составляют величину порядка 1000-1100 \$/кВт.

Возникают вопросы – какие задачи наиболее приоритетны при надстройке ТЭЦ ПГУ:

- повышения их электрической мощности, прежде всего в неотапливаемый период;
- снижения удельных капиталовложений и сроков строительства;
- значительного повышения тепловой экономичности ТЭЦ, увеличения выработки электроэнергии и ее реализации на конкурентном энергетическом рынке.

Можно предложить несколько способов решения этих проблем:

– вместо двухконтурных КУ на ТЭЦ целесообразно применять одноконтурные КУ с их подключением по острому пару к главному паропроводу станций. В случае необходимости перед КУ следует устанавливать камеры дожигания, так как при использовании одних параметров пара создаются благоприятные условия для эксплуатации и управления оборудованием станции;

– целесообразно увеличивать рабочую мощность турбоагрегатов за счет дополнительного расширения в них пара, вырабатываемого в КУ, и вытесненных регенеративных и теплофикационных отборов. В этих случаях при надстройке ТЭЦ ПГУ не потребуется установка новых паровых турбин;

– целесообразно расширять только турбинные залы ТЭЦ с установкой ГТУ, а КУ лучше размещать в пристроях к машзалам. При этом паровые турбины и ГТУ можно обслуживать общим мостовым краном.

Использование перечисленных технических решений позволит значительно сократить затраты средств и времени на расширение ТЭЦ.

Для повышения экономической эффективности надстроек ТЭЦ необходима скорейшая доводка отечественных энергетических ГТУ и дожимных газовых компрессоров. Рекомендуемое сегодня РАО применение для этих целей ГТЭ-110 по ряду причин не обосновано, прежде всего, из-за их недостаточной надежности, больших сроков строительства и из-за переменного характера нагрузок надстраиваемых ТЭЦ.

Для надстройки ТЭЦ наиболее подходят отечественные конвертированные ГТУ НК-18Э, НК-37, НК-37-1 мощностью 18, 25 и 30 МВт с КПД 32, 36,4 и 37%. Большой интерес представляет возможность разработки ГТУ НК-37-2 – модернизированной ГТУ НК-37-1 с установкой дополнительной камеры дожигания перед силовой турбиной с температурой газа около 900°C. При этом значительно увеличится мощность ГТУ с понижением концентрации оксидов азота в входящих газах и повысится паропроизводительность КУ с возможностью выработки пара стандартных параметров.

Проанализируем влияние надстройки ТЭЦ ПГУ на величину и КПД ее дополнительной электрической мощности. Предполагается, что при надстройке теплофикационная мощность станции не изменяется.

На рис. 2 приведена схема ТЭЦ надстраиваемой ГТУ с камерой дожигания перед одноконтурным котлом-утилизатором, снабженным газоводяным подогревателем сетевой воды. Пар, вырабатываемый КУ, направляется в главный паропровод ТЭЦ.

Возможны различные режимы работы паровых турбин и котлоагрегатов ТЭЦ с ПГУ:

– с уменьшением паропроизводительности котлов, при сохранении того же расхода пара на паровые турбины D_0 , что и до ее надстройки. При этом вытесненный пар отборов на ПВД и теплофикационных отборов расширяют в турбинах с увеличением их конденсационной мощности;

– с уменьшением расхода пара на турбины и их мощности;

– с увеличением паропроизводительности энергетических котлов, расхода пара на турбины ТЭЦ и их конденсационной мощности.

Проанализируем показатели надстройки ТЭЦ с давлением пара 9 МПа в случае ее работы с постоянным расходом пара на паровые турбины и снижением паропроизводительности

сти котлоагрегатов за счет выработки острого пара котлами-утилизаторами. Вытесненный пар регенеративных отборов на ПВД и теплофикационных отборов расширяется в турбинах с дополнительной конденсационной выработкой электроэнергии.

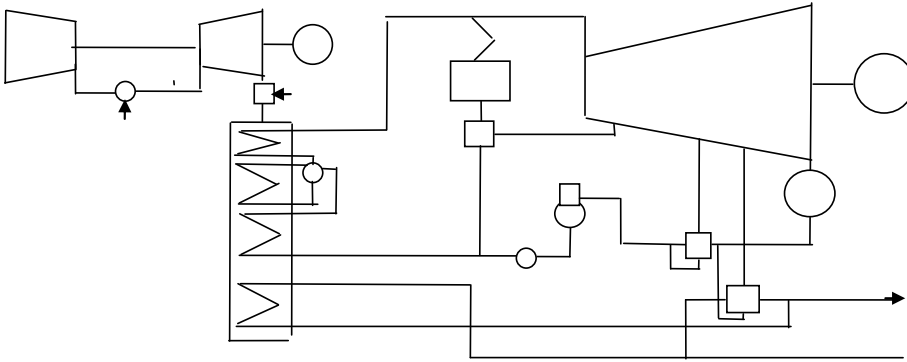


Рис. 2. Принципиальная схема надстройки ТЭЦ ГТУ с камерой дожигания перед одноконтурным котлом-утилизатором и газоводяным подогревателем

Для упрощения анализа предполагаем, что средние величины расхода пара в регенеративные отборы на ПВД турбин $D_{РЕГ}^{ПВД} = \varphi_2 D_0$ пропорциональны расходу пара D_0 из котельных агрегатов, а средние величины расхода на ПНД и деаэраторы $D_{РЕГ}^{НД} = \varphi_1 D_K$ пропорциональны расходу пара D_K в конденсаторы паровых турбин.

$$\varphi_2 = \frac{\Delta i_{РЕГ}^{ПВД}}{q_{ПВД}} = \frac{i_{ПВ}^{КА} - i'_{Д}}{q_{ПВД}}, \quad \text{а} \quad \varphi_1 = \frac{\Delta i_{РЕГ}^{НД}}{q_{РЕГ}^{НД}}, \quad (1)$$

где $i_{ПВ}^{КА}, i'_{Д}$ – энтальпия питательной воды котельных агрегатов и за питательными насосами; $i_{РЕГ}^{НД}$ – средняя энтальпия пара регенеративных отборов низкого давления; $i_S^{НД}$ – средняя энтальпия насыщения в регенеративных подогревателях низкого давления.

Увеличение расхода пара в конденсаторы после надстройки составит

$$\Delta D_{K1} = \Delta D_{РЕГ1}^{ПВД} + \Delta D_T - \Delta D_{РЕГ1}^{НД}. \quad (2)$$

Отсюда, с учетом (1), получим

$$\Delta D_{K1} = \frac{(\varphi_2 D_{KV} + \Delta D_T)}{1 + \varphi_1}. \quad (3)$$

Изменение расхода пара регенеративных отборов низкого давления при дополнительном расширении вытесненных отборов на ПВД и теплофикационных отборов составит

$$\Delta D_{РЕГ1}^{НД} = \varphi_1 \frac{(\varphi_2 D_{KV} + \Delta D_T)}{1 + \varphi_1}. \quad (4)$$

Повышение конденсационной мощности паровых турбин при надстройке с учетом повышения расхода пара на ПНД и деаэратор из регенеративных отборов низкого давления определится из очевидного выражения

$$\Delta N_{Э1}^{ПТ} = \{ \Delta D_{РЕГ1}^{ПВД} (i_i^{ПВД} - i_T) + (\Delta D_{РЕГ1}^{ПВД} + \Delta D_T) (i_T - i_i^{НД}) \} + \{ (\Delta D_{РЕГ1}^{ПВД} + \Delta D_T - \Delta D_{РЕГ1}^{НД}) (i_i^{НД} - i_K) \} \eta_{МГ}, \quad (5)$$

где $i_i^{ПВД}, i_i^{HD}$ – средние значения энтальпии пара в регенеративных отборах высокого и низкого давления; i_T – энтальпия пара в теплофикационных отборах турбин; i_K – энтальпия пара в конденсаторах.

После преобразований (5) с учетом принятых допущений (1)

$$\Delta N_{\text{Э1}}^{\text{ПТ}} = \left\{ \varphi_2 D_{KV} (i_i^{\text{ПВД}} - i_K) + \Delta D_T (i_T - i_K) - [\varphi_2 D_{KV} + \Delta D_T] \frac{\varphi_1}{1 + \varphi_1} (i_i^{\text{HD}} - i_K) \right\} \eta_{MT}. \quad (6)$$

Электрический КПД дополнительной мощности ТЭЦ для рассматриваемого режима

$$\eta_{\text{Э}}^{\text{HAD}} = \frac{N_{\text{Э}}^{\text{ГТУ.H}} + \Delta N_{\text{Э1}}^{\text{ПТ.H}} - N_{\text{ДГК}}}{Q_{\text{КС}} + Q_{\text{КД}} - \Delta Q_{\text{КА}}}, \quad (7)$$

где $N_{\text{Э}}^{\text{ГТУ.H}}$ – электрическая мощность нетто ГТУ; $\Delta N_{\text{Э1}}^{\text{ПТ.H}}$ – дополнительная электрическая мощность нетто паровых турбин; $N_{\text{ДГК}}$ – мощность дожимных газовых компрессоров; $Q_{\text{КС}}, Q_{\text{КД}}, \Delta Q_{\text{КА}}$ – тепловая мощность, подводимая с топливом в камеру сгорания ГТУ, в камере дожигания, и уменьшение тепловой нагрузки котлоагрегатов ТЭЦ при выработке острого пара КУ.

Повышение электрической мощности турбин нетто с учетом собственных нужд равно

$$\Delta N_{\text{Э1}}^{\text{ГТУ.H}} = \Delta N_{\text{Э1}}^{\text{ГТУ}} (1 - \alpha_{\text{СН}}^{\text{ТЭЦ}}). \quad (8)$$

Тепловая мощность паровой части КУ составит

$$Q_{\text{КУ}}^{\text{ПЧ}} = D_{\text{КУ}} (i_{\text{ПТ}} - i_{\text{ПВ}}^{\text{КУ}}) / \eta_{\text{ТО}}. \quad (9)$$

При подаче в главный паропровод пара от КУ, тепловая нагрузка котлоагрегатов ТЭЦ уменьшается на величину $\Delta Q_{\text{КА}} = D_{\text{КУ}} (i_{\text{ПТ}} - i_{\text{ПВ}}^{\text{КА}}) / \eta_{\text{КА}}$.

Обозначим: $\varepsilon = \frac{i_{\text{ПТ}} - i_{\text{ПВ}}^{\text{КА}}}{i_{\text{ПТ}} - i_{\text{ПВ}}^{\text{КУ}}}$ – отношение удельного подвода тепла в котельных агрегатах

и в КУ; $\eta_{\text{КУ}}^{\text{ПЧ}} = \frac{Q_{\text{КУ}}^{\text{ПЧ}}}{Q_{\text{КУ}}^{\text{ВХ}} \eta_{\text{ПТ}}}$ – КПД паровой части котла-утилизатора;

$Q_{\text{КУ}}^{\text{ВХ}} = Q_{\text{ХВ}} + Q_{\text{КС}} - N_i^{\text{ГТУ}} + Q_{\text{КД}}$ – теплота продуктов сгорания на входе в КУ; $Q_{\text{ХВ}} = G_B c_p^B T_B$ – теплота воздуха на входе в компрессор ГТУ; G_B, T_B – расход и температура наружного воздуха; $N_i^{\text{ГТУ}}$ – внутренняя мощность ГТУ с учетом гидравлических сопротивлений КВОУ и КУ; $\beta = \frac{Q_{\text{КД}}}{Q_{\text{КС}}}$ – относительная тепловая нагрузка камеры дожигания.

Снижение тепловой мощности котлоагрегатов ТЭЦ, относительно тепловой мощности паровой части КУ, может быть выражено соотношением $\Delta Q_{\text{КА}} = \varepsilon Q_{\text{КУ}}^{\text{ПЧ}}$.

Учитывая, что $N_i^{\text{ГТУ}} = \frac{N_{\text{Э}}^{\text{ГТУ}}}{\eta_{\text{MT}}}$ и $Q_{\text{КС}} = \frac{N_{\text{Э}}^{\text{ГТУ}}}{\eta_{\text{Э}}^{\text{ГТУ}}}$, получим

$$Q_{\text{КУ}}^{\text{ВХ}} = N_{\text{Э}}^{\text{ГТУ}} \left[\frac{1 + \beta}{\eta_{\text{Э}}^{\text{ГТУ}}} - \frac{1}{\eta_{\text{MT}}} \right] + G_B c_p^B T_B,$$

тогда

$$\Delta Q_{\text{КА}} = \varepsilon \eta_{\text{КУ}}^{\text{ПЧ}} \left(N_{\text{Э}}^{\text{ГТУ}} \left[\frac{1 + \beta}{\eta_{\text{Э}}^{\text{ГТУ}}} - \frac{1}{\eta_{\text{MT}}} \right] + G_B c_p^B T_B \right). \quad (10)$$

После преобразований получим выражение для определения электрического КПД дополнительной мощности ТЭЦ, настроенной ПГУ, в виде

$$\eta_{\text{Э}}^{\text{НАД}} = \frac{\left(1 + \frac{\Delta N_{\text{ЭЛ}}^{\text{ИТТ.Н}} - N_{\text{ДТК}}}{N_{\text{Э}}^{\text{ИТТ.Н}}}\right)}{\frac{(1+\beta)}{\eta_{\text{Э}}^{\text{ИТТ.Н}}} \left(1 - \varepsilon \frac{\eta_{\text{КУ}}^{\text{ИТЧ}}}{\eta_{\text{КА}}}\right) + \varepsilon \frac{\eta_{\text{КУ}}^{\text{ИТЧ}}}{\eta_{\text{КА}}} \left(\frac{1}{\eta_{\text{МГ}}} - \frac{G_{\text{В}} c_{\text{Р}} T_{\text{В}}}{N_{\text{Э}}^{\text{ИТТ.Н}}}\right)}. \quad (11)$$

С использованием изложенной методики проведен расчетный анализ по определению дополнительной электрической мощности и экономичности ТЭЦ с давлением 9 МПа, надстроенной газотурбинной установкой НК-37-1 и одноконтурным КУ, подключенным к главному паропроводу станции. На рис. 3 и 4 показано влияние на электрическую мощность надстройки и КПД дополнительно выработанной электроэнергии величины минимального температурного напора $\delta t_{\text{мин}}$ в КУ (при температуре воздуха $t_{\text{НВ}} = +5^{\circ}\text{C}$).

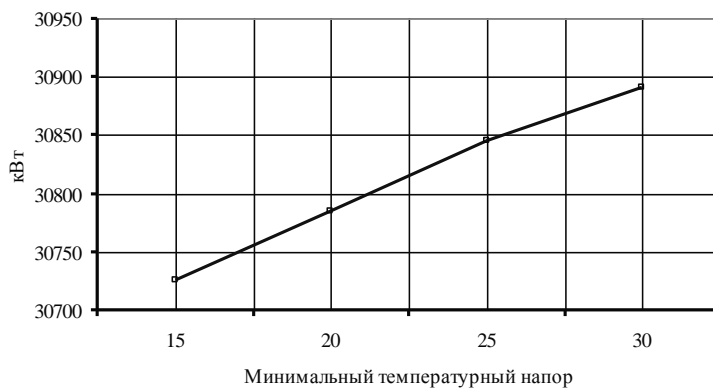


Рис. 3. Зависимость мощности надстройки от минимального температурного напора в КУ

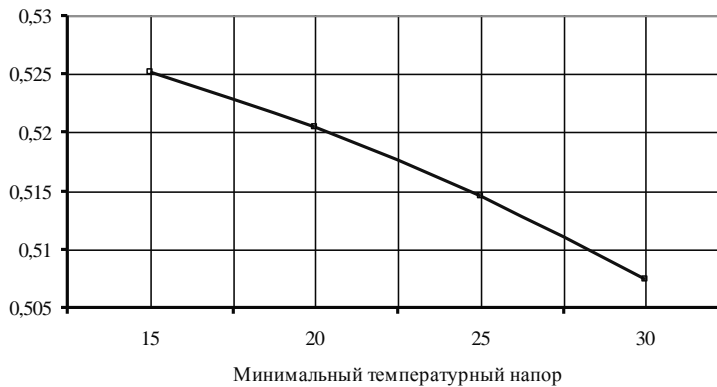


Рис. 4. Влияние минимального температурного напора на электрический КПД надстройки

Высокий электрический КПД надстройки определяется снижением паропроизводительности и расхода топлива котлоагрегатами вследствие выработки острого пара в КУ.

Проанализируем характер изменения дополнительной электрической мощности и КПД ТЭЦ, надстроенной ГТУ НК-37-1, для режима ее работы при увеличении на ΔD_0 паропроизводительности котлов и расхода пара на турбины, относительно исходного режима с $D_0 = \text{const}$. Повышение электрической мощности турбин при увеличении расхода пара котлами на ΔD_0 определяется из выражения

$$\Delta N_{\text{Э}2} = [\Delta D_0(i_{\text{III}} - i_K) - \Delta D_{\text{РЕГ}2}^{\text{ПВД}}(i_i^{\text{ПВД}} - i_K) - \Delta D_{\text{РЕГ}2}^{\text{НД}}(i_i^{\text{НД}} - i_K)] \eta_{\text{МГ}}. \quad (12)$$

При этом расход пара в конденсаторы турбин повысится на **величину** $\Delta D_{\text{К}2} = \frac{\Delta D_0(1-\varphi_2)}{1+\varphi_1}$, тогда

$$\Delta N_{\text{Э}2}^{\text{ТVP}} = \Delta D_0 \left[(i_{\text{III}} - i_K) - \varphi_2(i_i^{\text{ПВД}} - i_K) - \frac{\varphi_1(1-\varphi_2)}{1+\varphi_1}(i_i^{\text{НД}} - i_K) \right] \eta_{\text{МГ}}. \quad (13)$$

В этом случае электрическая мощность турбоагрегатов увеличится – как за счет расширения в них вытесненных отборов, так и вследствие увеличения расхода острого пара

$$\Delta N_{\text{Э}}^{\text{ТVP}} = \left\{ \varphi_2 D_{\text{КВ}}(i_i^{\text{ПВД}} - i_K) + \Delta D_{\text{T}}(i_{\text{T}} - i_K) - [\varphi_2 D_{\text{КВ}} + \Delta D_{\text{T}}] \frac{\varphi_1}{1+\varphi_1}(i_i^{\text{НД}} - i_K) \right\} \eta_{\text{МГ}} + \Delta D_0 \left[(i_{\text{III}} - i_K) - \varphi_2(i_i^{\text{ПВД}} - i_K) - \frac{\varphi_1(1-\varphi_2)}{1+\varphi_1}(i_i^{\text{НД}} - i_K) \right] \eta_{\text{МГ}}. \quad (14)$$

Дополнительный расход тепла топлива, подводимого к надстройке

$$\Delta Q_1 = Q_{\text{КС}} + Q_{\text{КД}} - \Delta Q_{\text{КА1}} + \Delta Q_{\text{КА2}}, \quad (15)$$

где $\Delta Q_{\text{КА1}}, \Delta Q_{\text{КА2}}$ – снижение расхода теплоты топлива при уменьшении на $\Delta D_{\text{КВ}}$ паропроизводительности котлов и увеличение расхода топлива на котлы при повышении их паропроизводительности на ΔD_0 .

Электрический КПД дополнительной мощности ТЭЦ для рассматриваемого режима

$$\eta_{\text{Э}}^{\text{НАД}} = \frac{N_{\text{Э}}^{\text{ГТV.H}} + \Delta N_{\text{Э}1}^{\text{ПТ.H}} + \Delta N_{\text{Э}2}^{\text{ПТ.H}} - N_{\text{ДК}}}{Q_{\text{КС}} + Q_{\text{КД}} - \Delta Q_{\text{КА1}} + \Delta Q_{\text{КА2}}},$$

или с учетом введенных обозначений

$$\eta_{\text{Э}1}^{\text{НАД}} = \frac{\left(1 + \frac{\Delta N_{\text{Э}1}^{\text{ПТ.H}} + \Delta N_{\text{Э}2}^{\text{ПТ.H}} - N_{\text{ДК}}}{N_{\text{Э}}^{\text{ГТV.H}}} \right)}{\eta_{\text{Э}}^{\text{ГТV}} \left[1 - \varepsilon \frac{\eta_{\text{КВ}}^{\text{ПЧ}}}{\eta_{\text{КА}}} \left(1 - \frac{\Delta D_0}{D_{\text{КВ}}} \right) \right] + \varepsilon \frac{\eta_{\text{КВ}}^{\text{ПЧ}}}{\eta_{\text{КА}}} \left(\frac{1}{\eta_{\text{МГ}}} - \frac{G_{\text{В}} c_{\text{P}}^{\text{В}} T_{\text{В}}}{N_{\text{Э}}^{\text{ГТV}}} \right) \left(1 - \frac{\Delta D_0}{D_{\text{КВ}}} \right)}. \quad (16)$$

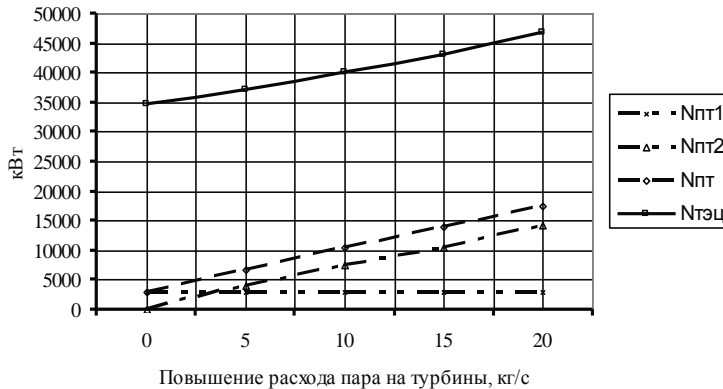


Рис. 5. Зависимость дополнительной электрической мощности ТЭЦ от увеличения расхода пара на турбины: $N_{\text{пт}1}$ – повышение мощности турбин при вытеснении отборов; $N_{\text{пт}2}$ – повышение мощности турбин за счет повышения расхода на турбины; $N_{\text{пт}}$ – суммарное повышение электрической мощности паровых турбин; $N_{\text{тэц}}$ – дополнительная электрическая мощность надстройки ТЭЦ

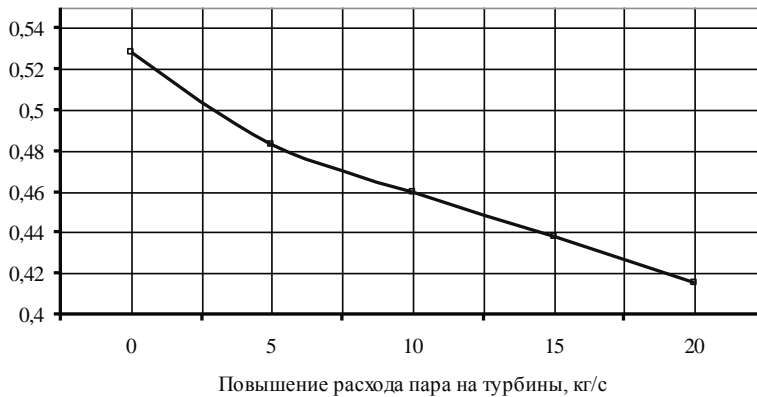


Рис. 6. Зависимость электрического КПД дополнительной мощности ТЭЦ от увеличения расхода пара на турбины

Из рис. 5 и 6 следует, что при повышении паропроизводительности котлов относительно исходного режима их работы, например, на 20 кг/с, электрическая мощность ТЭЦ повысится на 47 МВт, прежде всего за счет увеличения конденсационной мощности турбин, в то время как мощность ГТУ НК-37-1 при этом равняется 28,52 МВт. Электрический КПД дополнительной мощности ТЭЦ в этом случае значительно снизится, но его уровень обеспечивает конкурентоспособность модернизированной ТЭЦ на энергетическом рынке.

На величину прибыли, получаемой при реализации дополнительно выработанной электроэнергии, значительное влияние оказывают показатели эксплуатационной надежности ГТУ и КУ. Число часов эффективной работы ПГУ зависит от календарного числа часов ее готовности к работе $\tau_{кали}$, времени нахождения в резерве $\tau_{рез}$ и времени восстановительных ремонтов $\tau_{рем} = n_{B.P.i} T_{B.P.i}$, где $T_{B.P.i}$ — средняя продолжительность восстановительного ремонта, ч; $n_{B.P.i} = \frac{8760 - \tau_{рем} - \tau_{рез}}{T_i}$ — число восстановительных ремонтов за год; $T_i = \frac{1}{\lambda_i}$ — время работы ГТУ и котла-утилизатора до отказа, ч; $\lambda_i, ч^{-1}$ — интенсивность отказов.

Отсюда следует, что число восстановительных ремонтов ГТУ и КУ в течение года

$$n_{B.P.i} = \frac{(8760 - \tau_{рез})}{T_i + T_{B.P.i}}, \quad (17)$$

средняя продолжительность восстановительных ремонтов

$$\tau_{рем} = \frac{(8760 - \tau_{рез}) T_{B.P.i}}{T_i + T_{B.P.i}}, \quad (18)$$

число часов работы ПГУ за год

$$\tau_{раб} = 8760 \epsilon_i \left[1 - \frac{T_{B.P.i}}{T_i + T_{B.P.i}} (1 - \tau_{рез}) \right]. \quad (19)$$

Годовая прибыль, получаемая при реализации дополнительно выработанной на ТЭЦ электроэнергии, составит

$$P_i = (1 - \alpha_{НАЛ}) [\Delta \mathcal{E}_{mi} T_{\mathcal{E}} - 3_{mi}^{ТОП} - 3_{ам} - 3_{ОБСi} - 3_{B.P.i} n_{B.P.i}], \quad (20)$$

где $\alpha_{НАЛ}$ — налог на прибыль; $\Delta \mathcal{E}_{mi} = N_{\mathcal{E}i} \tau_{РАБ}$ — годовой отпуск электроэнергии, кВт·ч; $N_{\mathcal{E}i}$ — средняя электрическая мощность надстройки, кВт; $T_{\mathcal{E}}$ — тариф на отпускаемую электроэнер-

гию, руб./кВт·ч; $Z_{mi}^{TOP} = 3600 \Delta B_T^{TЭЦ} \tau_{pa\omega} C_T$ – годовые затраты на топливо, руб.; $\Delta B_T^{TЭЦ} = \Delta B_{ГТУ} - \Delta B_{КА}$ – дополнительный годовой расход топлива на одну установленную на ТЭЦ ПГУ, кг у. т./с; $\Delta B_{ГТУ}$, $\Delta B_{КА}$ – расход топлива в камеру сгорания ГТУ и камеру дожигания КУ, снижение расхода топлива на энергетические котлы при их частичном вытеснении КУ, кг у. т./с; C_T – цена условного топлива, руб./т у. т.; $Z_{ami} = p_a K_i$ – годовые амортизационные отчисления, руб.; $K_i = N_{Э} k_{yд}$ – капиталовложения в блок ПГУ, руб.; $k_{yд}$ – удельные капиталовложения в ПГУ, руб./кВт; $Z_{Обсi} = Z_{MAT} + Z_{З.П}$ – дополнительные годовые затраты на обслуживание, руб.; $Z_{MAT} = \phi_i N_{Эi}$ – годовые затраты на расходуемые материалы, руб.; ϕ_i – коэффициент пропорциональности затрат на расходуемые материалы; $Z_{З.П}$ – годовая зарплата обслуживающего персонала, руб.; $Z_{B.P.i} = n_{B.P.} K_{B.P.i}$ – средние затраты на один восстановительный ремонт, руб.; $K_{B.P.i} = \lambda_i k_{yд} N_{Э}$ – средняя стоимость одного восстановительного ремонта, руб.; λ_i – доля затрат на восстановительный ремонт от капиталовложений K_i в энергоустановку с ГТУ; $n_{B.P.i} = \frac{8760 q_i}{T_{B.P}}$ – число восстановительных ремонтов энергоустановки в год.

С учетом принятых обозначений ежегодная прибыль от надстройки ТЭЦ ПГУ составит

$$P_i = (1 - \alpha_{НАЛ}) \{ N_{Эi} [8760(1 - q_i)(T_{Э} - \gamma_i C_T) - k_{yд}(p_{ам} + n_{B.P.} \lambda) - \phi_i] - Z_{З.П.i} \}, \quad (21)$$

$$q_i = \frac{T_{B.P.i}}{T_i + T_{B.P.i}}; \quad \gamma_i = \frac{0,123}{(1 - \alpha_{С.Н.и}) \eta_{Эi}},$$

где T_i – время работы ГТУ и КУ на отказ, ч.

При определении прибыли от реализации дополнительно выработанной электроэнергии ТЭЦ с давлением пара 9 МПа, надстроенной одним блоком ПГУ с НК-37-1 и одноконтурным КУ, подключенным к главному паропроводу станции, приняты следующие исходные данные – дополнительная электрическая мощность ТЭЦ $\Delta N_{Э}^{TЭЦ} = 30726$ кВт при электрическом КПД $\eta_{Э}^{НАЛ} = 0,525$, $\delta t_{МИН} = 15^\circ\text{C}$ и $t_{НВ} = +5^\circ\text{C}$; мощность дожимного газового компрессора $N_{ДГК} = 850$ кВт.

Оценены эксплуатационные – $T_{BP} = 240$ ч, $p_{ам1} = 0,0666$, $\lambda_1 = 0,03$, $\alpha_{ТЭЦ} = 0,06$ – и экономические показатели оборудования ПГУ – $k_{yд} = 700$ \$/кВт, $\phi_1 = 15$ \$/кВт, $Z_{З.П.1} = 720000$ руб./год, $T_{Э} = 1,2$ руб./кВт·ч; $C_T = 1$ руб./кг у. т.

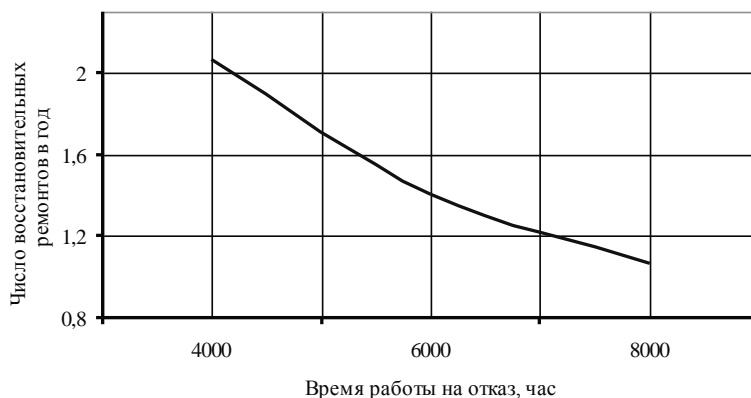


Рис. 7. Влияние T_1 на число восстановительных ремонтов ГТУ за год

На рис. 7 и 8 приведены результаты расчетов, показывающие влияние показателей надежности ГТУ и рассматриваемого варианта надстройки на работоспособность оборудования ПГУ и величину получаемой ежегодной прибыли при реализации на рынке дополнительно произведенной на ТЭЦ электроэнергии.

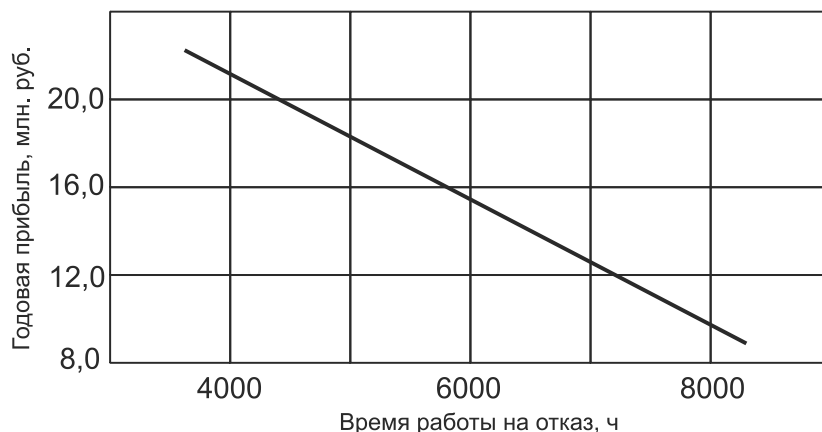


Рис. 8. Зависимость годовой прибыли от времени работы ГТУ на отказ

Выводы

1. Надстройка парогазовыми установками позволяет эффективно использовать инфраструктуру и турбинное оборудование действующих ТЭЦ, потребует меньших капитальных затрат и времени строительства по сравнению со строительством мощных конденсационных блоков ПГУ.

2. Для модернизации ТЭЦ целесообразно применение одноконтурных котлоутилизаторов, подключенных к их главному паропроводу. При неизменной величине присоединенных тепловых нагрузок и расхода пара на паровые турбины надстройка ПГУ позволяет уменьшить нагрузку энергетических котлов, увеличить конденсационную мощность ТЭЦ за счет расширения в ее турбинах вытесненных регенеративных и теплофикационных отборов пара, что даст возможность увеличить выработку электроэнергии и КПД модернизированных ТЭЦ.

Кондыба Евгений Николаевич –

главный инженер Самарской ТЭЦ

Ларин Евгений Александрович –

кандидат технических наук, профессор кафедры «Теплоэнергетика»
Саратовского государственного технического университета

Пешков Леонид Иванович –

заместитель генерального директора ОАО «Самара-Авиагаз»

Шелудько Леонид Павлович –

кандидат технических наук, доцент кафедры «Тепловые электрические станции»
Самарского государственного технического университета

Статья поступила в редакцию 12.07.07, принята к опубликованию 05.12.07

Ю.М. Хлебалин

ТЕХНИЧЕСКОЕ ПЕРЕВООРУЖЕНИЕ ТЭЦ С ПРОТИВОДАВЛЕНЧЕСКИМИ ТУРБИНАМИ

Рассматривается проблема перевооружения действующих ТЭЦ с противоавленческими турбинами путем внедрения приключенных турбин для повышения мощности и эффективности станций. Выполненные технико-экономические расчеты по обоснованию капиталовложений в ТЭЦ с турбинами Р-50-130 и ПТ-45-15; Р-100-130 и Т-70/110-1,6 показали на положительный эффект и рентабельность проекта.

Yu.M. Khlebalin

TECHNICAL RE-EQUIPMENT OF THERMOELECTRIC PLANT WITH BACKPRESSURE TURBINES

The article deals with the problems of re-equipment of active thermoelectric plants with backpressure turbines by installing induction turbine for increasing power and efficiency of the plant. The technical efficiency calculations that have been carried out to approve of the investments in thermal electric plant with turbines P-50-130 and PT-45-15, P-100-130 and T-70/110-1,6 showed positive results.

Техническое перевооружение ТЭЦ на современном этапе развития энергетики России является первоочередным и актуальным направлением повышения мощности и эффективности действующих станций. Снижение отпуска теплоты из отборов турбин, в результате уменьшения потребности в технологическом паре крупных предприятий различных отраслей, приводит к сокращению использования противоавленческих турбин (Р-50-130/13 и Р-100-130/15), а в ряде случаев к полной их остановке.

В этих условиях районные энергосистемы испытывают дефицит электрической и тепловой мощности, а простаивающее котлотурбинное оборудование увеличивает издержки ТЭЦ на его содержание, снижает прибыль и эффективность станций.

Ввод в эксплуатацию турбин Р-50 и Р-100 с приключенными турбинами, взамен устаревшего и физически изношенного неэффективного оборудования на низкие начальные параметры пара, позволит обновить парк основного оборудования ТЭЦ с минимальными затратами.

По данным [1], на 45 ТЭЦ России установлено 68 турбин Р-50 и 18 турбин Р-100 общей мощностью 5,2 млн. кВт. Для эксплуатации противоавленческих турбин заводы-изготовители ОАО ЛМЗ и ОАО ТМЗ разработали различные типы приключенных турбин различной мощности на начальные параметры пара 1,5 МПа, 275°C.

Введение в эксплуатацию Р-турбин с приключенными турбинами позволит в кратчайшие сроки (3-6 лет) при минимальных капиталовложениях (150-200 долл/кВт) удвоить мощность блоков и повысить их эффективность.

В данной статье выполнено технико-экономическое обоснование варианта модернизации ТЭЦ с блоком Р-50-130/13 и приключенной турбиной ПТ-45-15, а также с турбиной Р-100-130/15 и Т-70/110-1,6.

Технические характеристики турбин Р-50-130/13 приняты по [2], приключенной турбины ПТ-45-15 по [1]. Расчеты тепловых схем турбин с котлом БКЗ-420 выполнены для зимнего и летнего режимов работы ТЭЦ.

Исходные данные для турбины Р-50-130/13:

– электрическая мощность $N_n = 50$ МВт, максимальная $N_s = 60$ МВт;

– начальные параметры пара $P_o = 13$ МПа, $t_o = 555^\circ\text{C}$;

– давление на выходе турбины $P_n = 1,5$ МПа;

– температура питательной воды $t_{пв} = 226^\circ\text{C}$;

– расход пара на турбину $D_o = 420$ т/ч, в отборы $D_{отб} = 120$ т/ч, на выхлоп из турбины $D_n = 300$ т/ч;

– внутренние относительные КПД по отсекам турбины: $\eta_{oi}^I = 0,75$; $\eta_{oi}^{II} = 0,85$; $\eta_{oi}^{III} = 0,8$.

При расчете схемы Р-50-130/13 принято условие постоянства расчетной мощности $N_s = 57,8$ МВт и расходов пара $D_o = 420$ т/ч, $D_n = 300$ т/ч, $D_{отб} = 120$ т/ч как в зимнем, так и в летнем режимах работы ТЭЦ.

Исходные данные приключенной турбины ПТ-45-15:

– электрическая мощность $N_s = 45$ МВт;

– начальные параметры пара $P_o = 1,5$ МПа, $t_o = 275^\circ\text{C}$;

– расход пара на турбину в зимнем режиме: $D_o = 300$ т/ч, в отбор $D_m = 196,6$ т/ч, в конденсатор $D_k = 103,4$ т/ч и в летнем: $D_o = 300$ т/ч, $D_m = 84,2$ т/ч, $D_k = 215,79$ т/ч;

– тепловая мощность турбины в зимнем режиме $Q_m^z = 119$ МВт, в летнем $Q_m^l = 50$ МВт;

– температура прямой и обратной сетевой воды в зимнем режиме: $t_{пр} = 115^\circ\text{C}$, $t_{обр} = 70^\circ\text{C}$, в летнем $t_{пр} = 70^\circ\text{C}$, $t_{обр} = 40^\circ\text{C}$;

– давление в регулируемом отборе в зимнем режиме $P_m^z = 0,19$ МПа, в летнем $P_m^l = 0,12$ МПа;

– давление пара в конденсаторе $P_k = 0,06$ МПа.

Длительность зимнего режима принята $\tau_z = 4780$ ч/год, летнего $\tau_l = 3980$ ч/год.

В результате расчета тепловой схемы турбины ПТ-45-15 имеем: в зимнем режиме $N_s^z = 36,4$ МВт, в летнем режиме $N_s^l = 56$ МВт при заданных расходах пара.

Суммарная электрическая мощность турбин Р-50 и ПТ-45 в зимнем режиме составила $N_s^z = 94,2$ МВт, в летнем режиме $N_s^l = 114$ МВт. Суммарный годовой отпуск электроэнергии $\mathcal{E}_{год} = 906662,6$ МВт·ч/год. Суммарный годовой отпуск теплоты $Q_{год} = 796500$ МВт·ч/год. Годовой расход топлива блоком $B_{год} = 345792,24$ т/год. Годовые удельные расходы топлива на блок, подсчитанные по методике ОРГРЭС [3], составили:

– по производству электроэнергии $\epsilon_s = 290$ гр/(кВт·ч);

– по производству теплоты $\epsilon_m = 31,15$ кг/ГДж.

Технические характеристики турбины Р-100-130/15 приняты по [2], приключенной турбины Т-70/110-1,6 по [1]. Расчеты тепловых схем турбин с двумя котлами Е-450-140 выполнены для зимнего и летнего режимов ТЭЦ.

Исходные данные для турбины Р-100-130/15:

– электрическая мощность $N_n = 100$ МВт, максимальная $N_s = 107$ МВт;

– начальные параметры пара $P_o = 13$ МПа, $t_o = 555^\circ\text{C}$;

– давление пара на выходе из турбины $P_n = 1,6$ МПа;

– температура питательной воды $t_{пв} = 232^\circ\text{C}$;

– расход пара на турбину $D_o = 210$ кг/с (756 т/ч), в отборы $D_{отб} = 67,8$ кг/с (244 т/ч), на выходе из турбины $D_n = 142,2$ кг/с (512 т/ч).

В результате расчета тепловой схемы турбины Р-100 при указанных исходных данных для зимнего режима получена электрическая мощность $N_s = 99,33$ МВт, которая условно принята одинаковой и для летнего режима.

Исходные данные приключенной турбины Т-70/110-1,6:

– электрическая мощность $N_3 = 70$ МВт, максимальная $N_3 = 110$ МВт;

– начальные параметры пара $P_o = 1,6$ МПа, $t_o = 285^\circ\text{C}$ с учетом гидравлических потерь $P'_o = 1,47$ МПа, $t'_o = 275^\circ\text{C}$;

– расход пара на турбину в зимнем режиме: $D_o = 142,2$ кг/с (512 т/ч), в отборы $D_{омб} = 108,37$ кг/с (390,2 т/ч), на регенеративный подогрев питательной воды $D_{рег} = 15$ кг/с (54 т/ч), расход пара в конденсатор $D_k = 18,84$ кг/с (67,8 т/ч), в летнем режиме: $D_o = 142,2$ кг/с (512 т/ч), $D_{омб} = 43,04$ кг/с (155 т/ч), $D_{рег} = 25,8$ кг/с (93 т/ч), $D_k = 73,32$ кг/с (263,9 т/ч);

– тепловая мощность турбины в зимнем режиме $Q_m^3 = 230$ МВт, в летнем $Q_{эв} = 92$ МВт;

– температура прямой и обратной сетевой воды в зимнем режиме: $t_{пр} = 112^\circ\text{C}$, $t_{обр} = 70^\circ\text{C}$, в летнем $t_{пр} = 70^\circ\text{C}$, $t_{обр} = 40^\circ\text{C}$;

– давление в регулируемых отборах в зимнем режиме: $P_{мс}^3 = 0,1985$ МПа, $P_{ми}^3 = 0,1$ МПа, в летнем $P_m^3 = 0,1$ МПа;

– давление пара в конденсаторе $P_k = 0,004$ МПа;

– длительность зимнего режима $\tau_3 = 4780$ ч/год, летнего $\tau_л = 3980$ ч/год.

В результате расчета тепловой схемы турбины Т-70/110-1,6 получено: в зимнем режиме $N_3^3 = 62,1$ МВт, в летнем $N_3^л = 84,1$ МВт при заданных расходах пара.

Суммарная электрическая мощность турбин Р-100 и Т-70 в зимнем режиме составила $N_3^3 = 161,42$ МВт, в летнем $N_3^л = 183,43$ МВт.

Суммарный годовой отпуск электроэнергии $\mathcal{E}_{год} = 1501,65 \cdot 10^3$ МВт·ч/год и теплоты $Q_{год} = 1465,56 \cdot 10^3$ МВт·ч/год.

Годовой расход топлива блоком $B_{год} = 641,757 \cdot 10^3$ т/год.

Годовые удельные расходы топлива на блок, рассчитанные по методике ОРГРЭС [3], составили:

– по производству электроэнергии $\epsilon_3 = 0,313$ кг/(кВт·ч);

– по производству теплоты $\epsilon_m = 33,61$ кг/ГДж.

Расчет технико-экономического эффекта от технического перевооружения ТЭС с противодавленческими турбинами выполнен по методике [4].

В качестве базового принят 2005 год. Интегральный эффект ($\mathcal{E}_{ин}$) или чистый дисконтированный доход (ЧДД) определяется по формуле:

$$\mathcal{E}_{ин} = \text{ЧДД} = \sum_{t=0}^T (R_t - Z_t - H_t) a_t - K_t, \quad (1)$$

где R_t – результаты; Z_t – затраты; H_t – налоги и сборы; K_t – капиталовложения; $a_t = 1/(1+E)^t$ – коэффициент дисконтирования; E – норма дисконта; T – горизонт расчета; t – шаг расчета.

Результаты от продажи продукции на рынке рассчитывались по формуле:

$$R_t = \mathcal{E}_{год} \cdot T_3 + Q_{год} \cdot T_m, \quad (2)$$

где T_3 , T_m – тариф на электроэнергию и теплоту.

Принимая $T_3 = 1,1$ руб./кВт·ч; $T_m = 271,15$ руб./Гкал с учетом НДС; $\mathcal{E}_{год} = 906,6 \cdot 10^3$ МВт·ч/год; $Q_m = 796,5 \cdot 10^3$ МВт·ч/год, получим $R_t = 1153,73$ млн. руб. для варианта с турбиной Р-50-130, а при тех же тарифах T_3 и T_m при $\mathcal{E}_{год} = 1501,65 \cdot 10^3$ МВт·ч/год; $Q_m = 1465,56 \cdot 10^3$ МВт·ч/год, получим для варианта с турбиной Р-100-130 $R_t = 1993,5$ млн. руб.

Затраты состоят из следующих элементов:

$$Z_t = Z_m + Z_{zn} + Z_{ам} + Z_{пр} + Z_{ох} + Z_n + Z_{пр}, \quad (3)$$

где Z_m , Z_{zn} , $Z_{ам}$, $Z_{пр}$, $Z_{ох}$, Z_n , $Z_{пр}$ – затраты на топливо, зарплату, амортизацию, текущий ремонт, экологию, надежность и прочие.

Топливные затраты

$$Z_m = B_{\text{зод}} \cdot C_m, \quad (4)$$

где C_m – цена топлива, руб./т.

Затраты на зарплату определяем по формуле:

$$Z_{\text{зн}} = u \cdot N_{\text{э}} \cdot \phi \cdot (1 + Y), \quad (5)$$

где u – штатный коэффициент; ϕ – среднегодовая зарплата; Y – социальные налоги.

Затраты на амортизацию: $Z_{\text{ам}} = a_{\text{ам}} \cdot K$, где $a_{\text{ам}}$ – доля отчислений на амортизацию; K – капиталовложения в модернизацию ТЭЦ.

Затраты на текущий ремонт: $Z_{\text{мр}} = a_{\text{мр}} \cdot Z_{\text{ам}}$; $a_{\text{мр}}$ – доля отчислений на текущий ремонт.

Прочие затраты $Z_{\text{пр}} = a_{\text{пр}} \cdot (Z_{\text{зн}} + Z_{\text{ам}} + Z_{\text{мр}})$; $a_{\text{пр}}$ – доля отчислений на прочие затраты.

Капиталовложения в модернизацию ТЭЦ оценим по следующей формуле:

$$K = k_{\text{уд}} \cdot \beta \cdot N_{\text{э}} \cdot 10^3, \quad (6)$$

где $k_{\text{уд}}$ – удельная стоимость модернизации, долл/кВт; β – курс доллара в рублях на 2005 год.

Налоги и сборы вычисляем по формуле:

$$H_t = a_n (R_t - Z_t), \quad (7)$$

где a_n – доля отчислений на НДС и прибыль.

Определим интегральный эффект без дисконтирования по формуле:

$$\mathcal{E}_{\text{ин}} = ЧДД = (R_t - Z_t - H_t - K). \quad (8)$$

Срок окупаемости без дисконтирования составит:

$$T_{\text{ок}} = K / \mathcal{E}_{\text{ин}}. \quad (9)$$

Принимая $C_m = 1032$ руб./т; $u = 1,2$ чел/МВт; $\Phi = 84000$ руб./год; $Y = 0,26$; $a_{\text{ам}} = 0,07$; $a_{\text{мр}} = 0,15$; $a_{\text{пр}} = 0,25$; $k_{\text{уд}} = 150$ долл/кВт; $\beta = 27,7$; $a_n = 0,3$, рассчитаем по формулам (1)-(9) суммарный интегральный эффект – $\mathcal{E}_{\text{ин}}$; индекс доходности – $ИД$; срок окупаемости – $T_{\text{ок}}$ для варианта с турбиной Р-50-130 (табл. 1).

Таблица 1

Доход (результаты) и расходы (затраты) модернизации ТЭЦ с Р-50-130 и ПК-45-15 при $E = 0,2$

Наименование показателя	Обозначение	Значение показателей по годам, млн. руб.			
		2005	2006	2007	2012
Выручка от реализации продукции	R_t	1153,73	-	-	-
Затраты	Z_t	415,14	-	-	-
Налоги и сборы	H_t	221,5	-	-	-
Капитальные затраты	K_t	399,23	-	-	-
Эффект (без дисконтирования) $R_t - Z_t - H_t - K_t$	$\mathcal{E}'_{\text{ин}}$	117,76	-	-	-
Эффект с дисконтированием $\mathcal{E}'_t \cdot a_t$	$\mathcal{E}_{\text{ин}}$	98,1	81,72	68,18	27,55
Коэффициент дисконтирования	a_t	0,833	0,694	0,579	0,234
Срок окупаемости	$T_{\text{ок}}$	3,3 года			
Индекс доходности	$ИД$	2,1 руб/руб			

Если турбина Р-50-130 и котел БКЗ-420 находятся в нормальном состоянии на действующей ТЭЦ, то стоимость модернизации станции будет включать только строительство, монтаж и оборудование приключенной турбины ПТ-45-15.

Капиталовложения в этом варианте составят по формуле (6): $K_{\text{нм}} = 153 \cdot 27,7 \cdot 45 \cdot 10^3 = 190,71$ млн. руб.

При значениях R_t , Z_t , H_t , определенных по (2), (3), (7), и K_{nm} имеем интегральный эффект без дисконтирования $\mathcal{E}'_{ин} = 316,38$ млн. руб. Срок окупаемости $T_{ок} = 0,6$ года. Суммарный интегральный эффект составит $\sum_{t=0}^T \mathcal{E}_{ин} = 1076,52$ млн. руб. Срок окупаемости с учетом дисконтирования $T_{ок} = 3,3$ года.

Ожидаемые технико-экономические показатели модернизируемой ТЭЦ мощностью 95 МВт приведены в табл. 2. Удельные расходы топлива и себестоимость продукции ТЭЦ рассчитывались по методике ОРГРЭС [3] и оказались ниже по сравнению с отдельной схемой КЭС и котельных.

Таблица 2

Ожидаемые технико-экономические показатели ТЭЦ мощностью 95 МВт

Показатели	Единицы измерения	Величина
Установленная мощность	МВт	95
Число часов использования установленной мощности	ч/год	8760
Отпуск электроэнергии	МВт·ч/год	$906,7 \cdot 10^3$
Отпуск теплоты	МВт·ч/год	$796,5 \cdot 10^3$
Капиталовложения	млн. руб.	399,23
Удельные капиталовложения	руб./кВт	4155
Удельный расход топлива на электроэнергию	кг у.т./кВт·ч	0,29
Удельный расход топлива на теплоту	кг у.т./ГДж	31,15
Себестоимость электроэнергии	руб./кВт·ч	0,347
Себестоимость теплоты	руб./ГДж	26,0
Интегральный эффект (ЧДД)	млн. руб.	451,11
Индекс доходности	руб./руб.	2,1
Срок окупаемости	лет	6,0

Для варианта модернизации ТЭЦ с турбиной Р-100-130 и приключенной турбиной Т-70/110-1,6 при аналогичных ценах на топливо и значениях тарифов T_s и T_m получены следующие результаты:

- выручка от реализации продукции $R_t = 1993,5$ млн. руб.;
- суммарные затраты $Z_t = 751,86$ млн. руб.;
- налоги и сборы $H_t = 372$ млн. руб.;
- капитальные затраты $K_t = 720,5$ млн. руб.;
- эффект без дисконтирования $\mathcal{E}'_{ин} = 149,14$ млн. руб.;
- эффект с дисконтированием $\mathcal{E}_{ин} = 1067,76$ млн. руб.;
- срок окупаемости $T_{ок} = 6,5$ года;
- индекс доходности $ИД = 1,2$ руб./руб.

Если турбина Р-100-130/15 и котлы Е-450-140 находятся в рабочем состоянии на действующей ТЭЦ, то стоимость модернизации станции будет включать только строительство, монтаж и оборудование турбины Т-70/110-1,6.

Капиталовложения в этом варианте оцениваются по формуле (6)

$$K_{nm} = 153 \cdot 27,7 \cdot 110 \cdot 10^3 = 466,19 \text{ млн. руб.}$$

В этом случае: $R_t = 1993,2$ млн. руб., $Z_t = 721,4$ млн. руб., $H_t = 381,54$ млн. руб., интегральный эффект без дисконтирования составит $\mathcal{E}'_{ин} = 424$ млн. руб., срок окупаемости $T_{ок} = 1,1$ года.

Срок окупаемости с учетом дисконтирования составил $T_{ок} = 2,25$ года, а суммарный интегральный эффект $\mathcal{E}_{ин} = 2030,7$ млн. руб., индекс доходности $ИД = 1,91$ руб./руб.

Ожидаемые технико-экономические показатели модернизируемой ТЭЦ мощностью 170 МВт приведены в табл. 3.

Удельные расходы топлива и себестоимость продукции ТЭЦ рассчитывались по методике ОРГРЭС и оказались ниже по сравнению с раздельной схемой КЭС и котельных.

Таблица 3

Ожидаемые технико-экономические показатели ТЭЦ мощностью 170 МВт

Показатели	Единицы измерения	Величина
Электрическая мощность	МВт	171,4
Число часов использования мощности	ч/год	8760
Отпуск электроэнергии	МВт·ч/год	1501,6·10 ³
Отпуск теплоты	МВт·ч/год	1465,5·10 ³
Капиталовложения	млн. руб.	720,5
Удельные капиталовложения	руб./кВт	4203,6
Удельный расход топлива на электроэнергию	кг у.т./(кВт·ч)	0,313
Удельный расход топлива на теплоту	кг у.т./ГДж	33,61
Себестоимость электроэнергии	руб./(кВт·ч)	0,367
Себестоимость теплоты	руб./ГДж	28,1
Интегральный эффект	млн. руб.	1067,76
Индекс доходности	руб./руб.	1,2
Срок окупаемости	лет	6,5

Выводы

1. Техническое перевооружение ТЭЦ с турбинами Р-50-130 и ПК-45-15, Р-100-130/15 и Т-70/110-1,6 является актуальной задачей повышения энергетической и экономической эффективности станций.

2. Выполненные технико-экономические расчеты по обоснованию инвестиций в модернизацию ТЭЦ с Р-турбинами свидетельствуют о высокой рентабельности проекта.

3. Предлагаемую модернизацию ТЭЦ можно рекомендовать к внедрению на действующих станциях при детальной доработке проекта с учетом конкретных местных условий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Некоторые направления технического перевооружения теплоэлектроцентралей / В.П. Воронин, А.А. Романов, Ю.А. Цигарелии др. // Теплоэнергетика. 2002. № 12. С. 15-18.

2. Трухний А.Д. Стационарные паровые турбины / А.Д. Трухний. М.: Энергоатомиздат, 1990. 540 с.

3. РД 34.08.552-95 Методические указания по составлению отчета электростанции и акционерного общества энергетики и электрификации о тепловой экономичности оборудования. М.: СПО ОРГРЭС, 1995. 124 с.

4. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов и их отбору для финансирования. М.: Информэнерго, 1994. 80 с.

Хлебалин Юрий Максимович –

доктор технических наук, профессор кафедры «Теплоэнергетика» Саратовского государственного технического университета

Статья поступила в редакцию 12.07.07, принята к опубликованию 05.12.07

Ю.Е. Николаев, С.В. Сизов

ОПТИМИЗАЦИЯ КОЛИЧЕСТВА УСТАНОВЛИВАЕМЫХ ГАЗОВЫХ ТУРБИН НА МАЛЫХ ТЭЦ

Выполнены расчеты по определению оптимального количества устанавливаемых агрегатов на малой ТЭЦ в условиях их работы по тепловому и электрическому графикам нагрузки. Расчеты выполнены с применением методов математического моделирования в среде Mathcad, с использованием законов термодинамики и основных финансово-экономических показателей.

Yu.E. Nikolaev, S.V. Sizov

NUMBER OPTIMIZATION OF INSTALLED GAS TURBINES FOR SMALL HEAT STATIONS

This is the calculation to define the optimal number of installed sets used at small heat station at condition defined by heat and electric diagrams of the load. Accounts based on mathematic modeling with application of MathCAD, laws of thermodynamics and main financial and economics indexes are presented here.

В последнее время в нашей стране для электро- и теплоснабжения небольших городов, поселков и предприятий разворачивается строительство малых ТЭЦ на базе газотурбинных установок (ГТУ), обеспечивающих повышение надежности энергоснабжения и экономии топливно-энергетических ресурсов по сравнению с раздельной схемой производства электроэнергии и теплоты, особенно в условиях высокого физического износа оборудования источников [1, 2].

При сооружении новых или при реконструкции существующих котельных в малые ТЭЦ одним из важных вопросов является выбор оптимального количества и необходимой мощности устанавливаемых ГТУ, а также определение приоритетного графика нагрузки (теплого или электрического), при работе по которому будет достигнут наибольший экономический эффект. Выполненные к настоящему времени исследования по малым ТЭЦ с ГТУ предусматривают их работу по тепловому графику нагрузки [3]. Сравнение различных вариантов работы таких станций по тепловому и электрическому графикам показано в [4]. Здесь наибольший прирост интегрального эффекта для ГТУ без регенерации достигнут при ее работе по тепловому графику нагрузки. Вместе с тем, как показывает анализ суточных графиков энергопотребления небольших городов и поселков, электрическая нагрузка в летний период снижается на 25-35%, тогда как тепловая – на 80-85%. Указанное несоответствие электрического и теплового графиков нагрузок приводит к необходимости останова части энергоагрегатов на ТЭЦ по мере снижения тепловой нагрузки и закупки дефицита энергии из системы или вынуждает их работать с выпуском продуктов сгорания без утилизации, обуславливая потери теплоты. В этих условиях целесообразно применение схем ГТУ с внутрицикловой регенерацией, обеспечивающих повышение тепловой экономичности ТЭЦ.

В данной статье рассмотрен выбор оптимального количества ГТУ в условиях работы агрегатов по электрическому и тепловому графикам нагрузок, применения схем с внутрицикловой регенерацией и без нее с учетом изменения климатических, режимных и экономи-

ческих факторов. Учитывая большое количество факторов, влияющих на эффективность работы малой ТЭЦ, для определения ее характеристик требуется применение методов математического моделирования с использованием основных закономерностей технической термодинамики и теплопередачи, а также с использованием основных финансово-экономических показателей для обоснования рациональных технических решений.

Принципиальная тепловая схема и цикл ГТУ представлены на рис. 1.

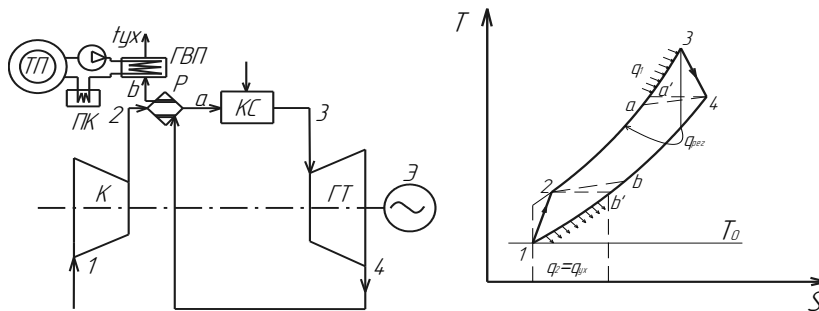


Рис. 1. Тепловая схема и цикл ГТУ: К – компрессор; Р – регенератор; КС – камера сгорания; ГТ – газовая турбина; ПК – пиковый котел; ТП – тепловой потребитель; ГВП – газодводяной подогреватель; Э – электрогенератор

Блок-схема алгоритма определения оптимального количества устанавливаемых ГТУ на малой ТЭЦ приведена на рис. 2.

Математическая модель определения оптимального количества устанавливаемых агрегатов на малой ТЭЦ основана на расчете ГТУ при различных температурах наружного воздуха, определении расхода топлива, электрической и тепловой мощности газодводяного подогревателя (ГВП) и пикового котла (ПК) на отдельных режимах и в годовом периоде, вычислении критерия экономической эффективности – чистого дисконтированного дохода (ЧДД). Последовательно увеличивая число устанавливаемых агрегатов, по величине экономического эффекта оценивается оптимальное количество ГТУ.

В блок исходных данных входят следующие величины:

- тип и параметры ГТУ на расчетном режиме ($t_{нв} = +15^\circ\text{C}$);
- расчетная тепловая нагрузка потребителя Q_T , МВт;
- расчетная электрическая нагрузка потребителя N_s , МВт;
- график тепловой нагрузки в зависимости от температуры наружного воздуха и продолжительность стояния температур в год (рис. 3);
- суточный электрический график нагрузки (рис. 4);
- состав топлива и его теплота сгорания Q_n^p , кДж/нм³;
- степень регенерации σ .

На рис. 5 представлена диаграмма совместной работы компрессора и турбины, полученная по данным Военно-воздушной академии им. Н.Е. Жуковского.

Приведенная частота вращения определяется по формуле:

$$n_{кпр} = n_k \sqrt{\frac{T_{н.р}}{T_n}}, \quad (1)$$

где n_k – частота вращения вала генератора переменного тока; $T_{н.р}$ – расчетная температура наружного воздуха, °С; T_n – температура наружного воздуха в текущем режиме работы ГТУ, °С.

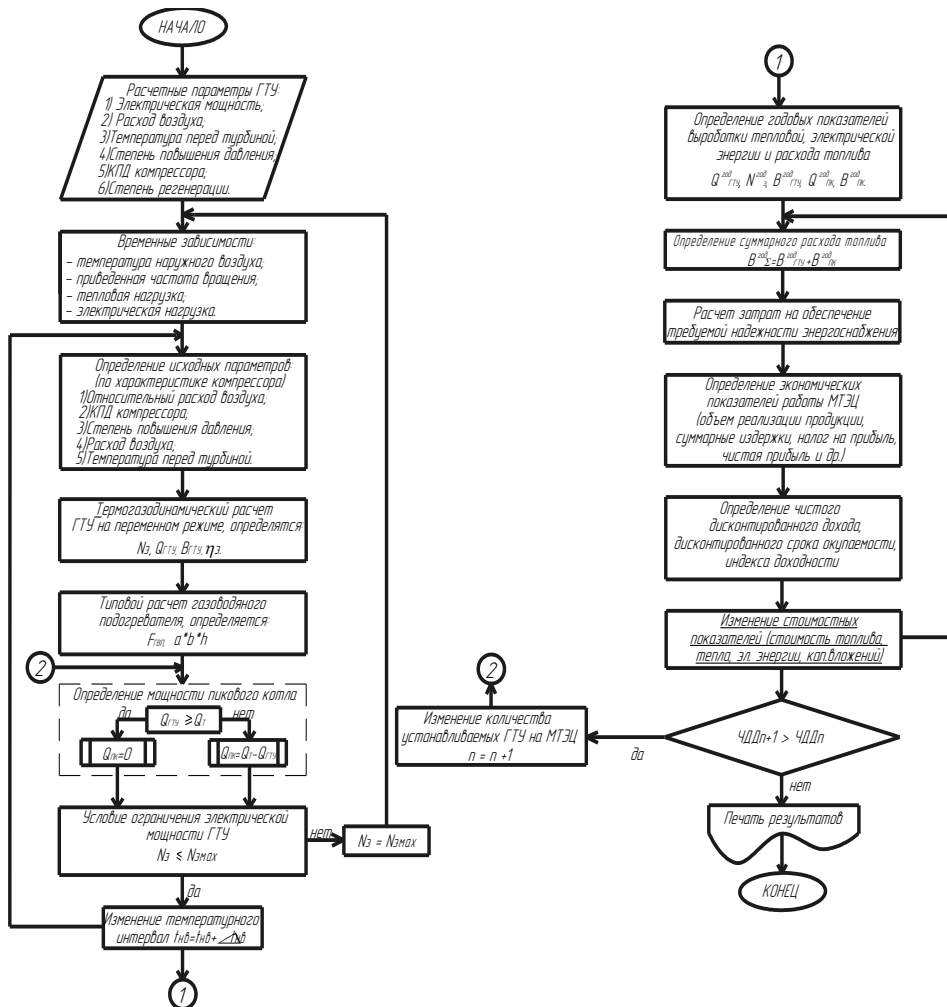


Рис. 2. Блок-схема алгоритма определения оптимального количества устанавливаемых агрегатов на малой ТЭЦ

По характеристике компрессора, зная $n_{кр}$, определяются относительная степень повышения давления ($\bar{\pi}_k$), относительный расход воздуха (\bar{q}_e) и КПД компрессора (η_k). Текущее значение расхода воздуха находится по выражению:

$$G_e = G_e^p \bar{q}_e \sqrt{\frac{T_{н.р}}{T_n}}, \quad (2)$$

где G_e^p – расход воздуха в текущем режиме работы компрессора, кг/с.

Текущее значение температуры перед турбиной определяется по формуле:

$$T_3 = T_3^p \frac{T_n}{T_{н.р}} \left(\frac{\frac{k_e - 1}{\pi_k k_e} - 1}{\frac{k_e - 1}{\pi_k^p k_e} - 1} \right) \frac{\eta_k^p}{\eta_k}, \quad (3)$$

где T_3^p – расчетная температура перед турбиной, К; π_k^p – расчетное значение степени повышения давления; η_k^p – расчетное значение КПД компрессора; k_a – показатель адиабаты.

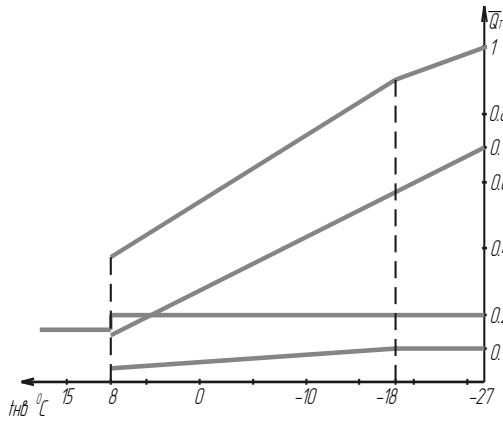


Рис. 3. Зависимость тепловых нагрузок от температуры наружного воздуха

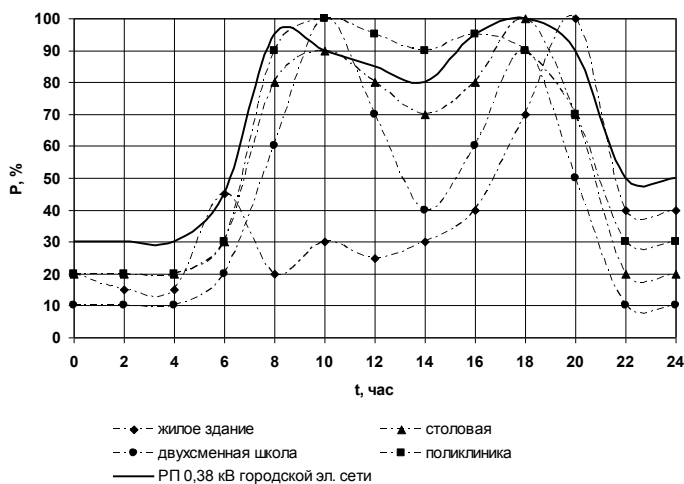


Рис. 4. Суточные графики электрических нагрузок различных потребителей

Термогазодинамический расчет ГТУ на переменном режиме (при известных T_n , π_k , σ , η_k , η_m , $N_{ГТУ}$ и T_3) заключается в определении параметров состояния рабочего тела в точках термодинамического цикла, расхода топлива, воздуха, электрического КПД ГТУ, вырабатываемой тепловой и электрической мощности.

Конструктивный расчет газоводяного подогревателя (ГВП) выполнен при максимальной тепловой нагрузке, а при текущей температуре наружного воздуха выполнялся поверочный расчет. Для сокращения габаритов ГВП использовалась интенсификационная поверхность теплообмена со спирально-ленточным оребрением. Расчет проводился по методике [5].

Тепловая мощность пикового котла при различных температурах наружного воздуха определялась по выражению:

$$Q_{ПК} = Q_T - Q_{ГВП}, \quad (4)$$

Если

$$Q_{ГВП} \geq Q_T, \text{ то } Q_{ПК} = 0,$$

где $Q_{ПК}$ – тепловая нагрузка пикового котла, МВт; $Q_{ГВП}$ – вырабатываемая тепловая мощность ГВП, МВт.

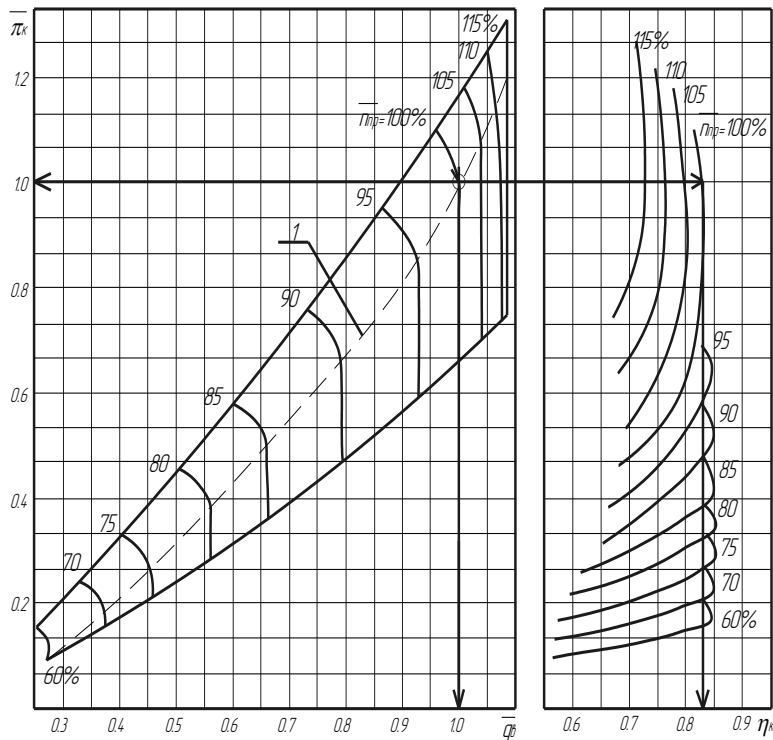


Рис. 5. Диаграмма характеристик компрессора:

1 – рабочая характеристика совместной работы турбины, компрессора и камеры сгорания

При определении тепловой и электрической мощности ГТУ были введены следующие ограничения:

$$N_{э} \leq N_{э}^{\max}, \quad (5)$$

где $N_{э}^{\max}$ – допустимая (максимально возможная для данного типа агрегата) вырабатываемая электрическая мощность, МВт.

Если вырабатываемая электрическая мощность ГТУ превышает допустимую, то принимаются следующие условия:

$$N_{э} = N_{э}^{\max}. \quad (6)$$

Годовые показатели расхода топлива, вырабатываемой электрической и тепловой энергии находятся по следующим выражениям.

Годовой расход топлива малой ТЭЦ, кг у.т./год:

$$B^T = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^m (\beta_n B_{ГТУ} + B_{ПК})_{i,k} \tau_{i,k}, \quad (7)$$

где β_n – коэффициент, учитывающий увеличение расхода топлива на пуск и останов ГТУ; $B_{ГТУ}$ – расход топлива ГТУ, кг у.т./с; $B_{ПК}$ – расход топлива ПК, кг у.т./с; $\tau_{i,k}$ – продолжительность стояния i, k -х режимов, соответствующие тепловому и электрическому графикам нагрузки, ч/год; n, m – число рассматриваемых режимов.

Годовая выработка электрической энергии малой ТЭЦ, МВт×ч/год:

$$\mathcal{E}^G = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^m N_{эi,k} \tau_{i,k}, \quad (8)$$

где $N_{эi,k}$ – электрическая мощность МТЭЦ на i -м и k -м режимах, МВт.

Годовая выработка тепловой энергии ГВП и ПК, МВт×ч/год:

$$Q_{ГВП}^G = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^m Q_{ГВПi,k} \tau_{i,k}, \quad (9)$$

$$Q_{ПК}^G = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^m Q_{ПКi,k} \tau_{i,k}, \quad (10)$$

где $Q_{ГВПi,k}$, $Q_{ПКi,k}$ – соответственно, вырабатываемая тепловая энергия ГВП и ПК в i, k -х режимах работы МТЭЦ, МВт×ч.

Годовая выработка тепловой энергии малой ТЭЦ определяется по выражению, МВт×ч/год:

$$Q_{МТЭЦ}^G = Q_{ГВП}^G + Q_{ПК}^G. \quad (11)$$

Увеличение количества устанавливаемых агрегатов на малой ТЭЦ приводит к изменению величины резерва электрической мощности в энергосистеме. Эта величина определяется количеством энергоагрегатов в системе, их мощностью и с ростом числа ГТУ на малой ТЭЦ уменьшается. Затраты на обеспечение резервной мощности в энергосистеме определяются по выражению:

$$\Delta K_{рез.} = k_{рез.} P_{рез.} N_3^{MT}, \quad (12)$$

где $k_{рез.}$ – удельная стоимость создания резервных энергоагрегатов, руб./кВт; $P_{рез.}$ – суммарный расчетный резерв в энергосистеме до подключения к ней новой станции, %; N_3^{MT} – установленная мощность новой МТЭЦ, МВт.

Величина $\Delta K_{рез.}$ учитывается в виде платы за присоединение МТЭЦ к энергосистеме и включается в состав капиталовложений.

Определение оптимального количества устанавливаемых ГТУ рассматривалось на примере строительства малой коммунальной ТЭЦ с расчетной нагрузкой 55 МВт. При работе малой ТЭЦ по тепловому графику предусматривалось поочередное отключение ГТУ по мере снижения нагрузки. При работе по электрическому графику нагрузки расчетная максимальная электрическая мощность была принята равной 35 МВт.

При решении данной задачи рассматривались следующие режимы малой ТЭЦ:

- работа по тепловому графику нагрузки без регенерации теплоты в ГТУ;
- работа по тепловому графику нагрузки с регенерацией теплоты в ГТУ;
- работа по электрическому графику нагрузки без регенерации теплоты в ГТУ;
- работа по электрическому графику нагрузки с регенерацией теплоты в ГТУ.

Количество устанавливаемых агрегатов варьировалось от 1 до 4. В качестве исследуемых агрегатов рассматривались ГТУ мощностью 6,5 и 6 МВт, основные технические данные которых приведены в табл. 1. ГТУ-6,5 рассматривалась без регенерации теплоты, поскольку при высоких π_k прирост электрического КПД составляет 1-1,5%. Применение ГТУ-6 целесообразно только с внутрицикловой регенерацией, так как без регенерации ее электрический КПД не превышает 24%.

Таблица 1

Технические данные энергоустановок

Показатель	Тип энергоустановки		
	ГТД-6 ДВ 71	ГТД 6000	ГТЭ-6
Электрическая мощность, МВт	6,5		5,7
Электрический КПД брутто, %	32,0		32,0
Степень повышения давления	14		6
Расход газов на выходе, кг/с	30,4		42,5
Температура газов, °С: перед турбиной за турбиной	1000		760
	414		405

Примечание: * – судовой, изготовитель «Машпроект», Украина

** – энергетический, изготовитель ОАО «ТМЗ», Россия

Количество устанавливаемых агрегатов и режимы их использования приведены в табл. 2-4.

Для каждого из рассмотренных вариантов определены расход топлива, выработка тепловой и электрической энергии в годовом периоде, объем реализации продукции, суммарные издержки, чистая прибыль [6]. Срок эксплуатации ГТУ принят 12 лет, норма дисконта – 0,15. С учетом прогнозируемого темпа инфляции были приняты следующие изменения стоимостных показателей (табл. 5).

Таблица 2

При работе МТЭЦ с ГТУ-6,5 по тепловому графику нагрузки

Рассматриваемый вариант	Количество устанавливаемых двигателей в зависимости от температуры наружного воздуха и времени суток							
	с -30 до -20°С		с -15 до -10°С		с -5 до 0°С		с 5 до 25°С	
	день	ночь	день	ночь	день	ночь	день	ночь
I вариант (1 ГТУ)	1	1	1	1	1	1	1	1
II вариант (2 ГТУ)	2	2	2	2	2	2	1	1
III вариант (3 ГТУ)	3	3	3	3	2	2	1	1
IV вариант (4 ГТУ)	4	4	3	3	2	2	1	1
Общее число часов работы в год	331,2		1289,8		2021,8		4863,4	

Σ 8506,2 часов

Таблица 3

При работе МТЭЦ с ГТУ-6 по тепловому графику нагрузки

Рассматриваемый вариант	Количество устанавливаемых двигателей в зависимости от температуры наружного воздуха и времени суток							
	с -30 до -20°С		с -15 до -10°С		с -5 до 0°С		с 5 до 25°С	
	день	ночь	день	ночь	день	ночь	день	ночь
I вариант (1 ГТУ)	1	1	1	1	1	1	1	1
II вариант (2 ГТУ)	2	2	2	2	2	2	2	2
III вариант (3 ГТУ)	3	3	3	3	2	2	2	2
IV вариант (4 ГТУ)	4	4	4	4	4	4	2	2
Общее число часов работы в год	331,2		1289,8		2021,8		4863,4	

Σ 8506,2 часов

Таблица 4

При работе МТЭЦ с ГТУ-6,5(6) по электрическому графику нагрузки

Рассматриваемый вариант	Количество устанавливаемых двигателей в зависимости от температуры наружного воздуха и времени суток							
	с -30 до -20°С		с -15 до -10°С		с -5 до 0°С		с 5 до 25°С	
	день	ночь	день	ночь	день	ночь	день	ночь
I вариант (1 ГТУ)	1	1	1	1	1	1	1	1
II вариант (2 ГТУ)	2	1	2	1	2	1	2	1
III вариант (3 ГТУ)	3	1	3	1	3	1	3	1
IV вариант (4 ГТУ)	4	1	4	1	4	1	4	1
Общее число часов работы в год	331,2		1289,8		2021,8		4863,8	

Σ 8506,2 часов

Таблица 5

Изменение стоимостных показателей

Варьируемый показатель	Стоимость тепловой энергии, руб./Гкал	Стоимость электрической энергии, руб./кВт·ч	Стоимость топлива, руб./кг у.т.	Удельная стоимость малой ТЭЦ, тыс. руб./кВт
A	425	1,6	1,5	21,9 ; 20,3*
B	600	2,2	2,3	22,5 ; 20,9*
C	730	2,7	3	23,2 ; 21,6**

* – ГТУ-6 (с регенератором);

** – ГТУ-6,5 (без регенератора).

Капиталовложения в сооружение малой ТЭЦ определены с учетом изменения стоимости первого и каждого последующего агрегата. Результаты технико-экономического расчета представлены на рис. 6-9.

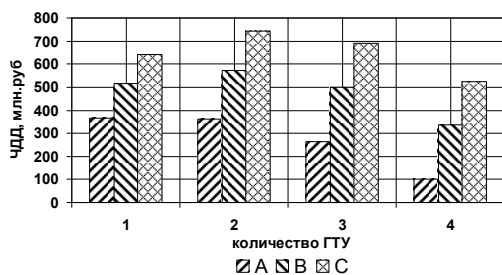


Рис. 6. Изменение ЧДД от количества устанавливаемых ГТУ-6,5 при работе по тепловому графику нагрузки

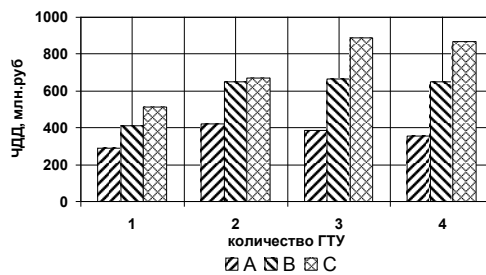


Рис. 7. Изменение ЧДД от количества устанавливаемых ГТУ-6 при работе по тепловому графику нагрузки

Анализируя полученные результаты, находим, что при работе по тепловому графику оптимальное количество ГТУ составляет 2-3 агрегата. При этом интегральный эффект в схемах с регенерацией на 14-19% выше, чем в схеме без регенерации, по причине большого отпуска теплоты от ГВП в годовом периоде. Оценивая работу малой ТЭЦ по электрическому графику, видно, что оптимальное количество агрегатов равно 4 и соответствует наибольшей величине элек-

трической нагрузки. Однако вариант без регенерации оказывается на 17-25% эффективнее, чем в схеме с регенерацией. Это объясняется большей выработкой электрической энергии и отпускаемой теплоты. В целом работа по электрическому графику нагрузки обеспечивает увеличение ЧДД в 1,7-1,9 раза в схеме без регенерации и на 10-30% – в схеме с регенерацией.

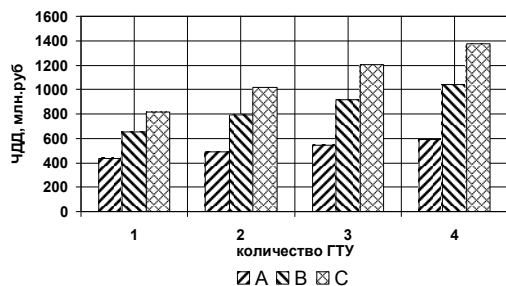


Рис. 8. Изменение ЧДД от количества устанавливаемых ГТУ-6,5 при работе по электрическому графику нагрузки

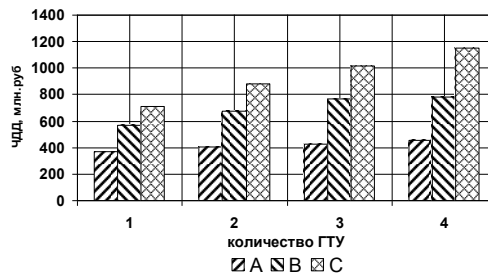


Рис. 9. Изменение ЧДД от количества устанавливаемых ГТУ-6 при работе по электрическому графику нагрузки

Следует заметить, что полученные результаты относятся к рассмотренным типоразмерам ГТУ и принятым соотношениям электрической и тепловой нагрузки района энергопотребления. Требуется дополнительное исследование влияния соотношения расчетных электрических и тепловых нагрузок.

Выводы

1. Разработана математическая модель для выбора оптимального количества ГТУ при работе по тепловому и электрическому графикам нагрузок.
2. При работе малой ТЭЦ по тепловому графику нагрузки ГТУ с регенерацией обеспечивает прирост эффективности на 14-19% по сравнению с установкой без регенерации. При работе по электрическому графику схема без регенерации на 17-25% эффективнее, чем схема с регенерацией. Работа по электрическому графику нагрузки обеспечивает повышение экономической эффективности по сравнению с тепловым графиком в 1,1-1,9 раза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Грищенко Е.А. Первая в России блочно-модульная теплоэлектростанция на базе ГТД авиационного типа НК-37 мощностью 25 МВт / Е.А. Грищенко, В.Н. Орлов // Теплоэнергетика. 2001. № 5. С. 15-17.
2. Андрющенко А.И. Метаморфозы теплофикации и пути совершенствования систем теплоснабжения городов / А.И. Андрющенко // Новости теплоснабжения. 2003. № 12. С. 11-13.
3. Загорский В.А. Экономическая эффективность различных вариантов использования малой промышленной ГТУ-ТЭЦ / В.А. Загорский, М.Ю. Патрикеев // Проблемы повышения эффективности и надежности систем теплоснабжения: сб. материалов межвуз. науч. конф. Самара: СамГТУ, 1999. С. 56-60.
4. Хлебалин Ю.М. Оптимизация электрической мощности ГТУ при реконструкции котельных в малые ТЭЦ / Ю.М. Хлебалин, Ю.Е. Николаев, Д.А. Андреев // Промышленная энергетика. 1998. № 9. С. 28-32.
5. Тепловой расчет котельных (нормативный метод). 3-е изд. СПб: НПО ЦКТИ, 1998. 256 с.
6. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов (вторая ред.) / под ред. В.В. Косова, В.Н. Лившица, А.Г. Шахназарова. М.: Экономика, 2000. 256 с.

Николаев Юрий Евгеньевич –

доктор технических наук, профессор кафедры «Теплоэнергетика»
Саратовского государственного технического университета

Сизов Сергей Валентинович –

аспирант кафедры «Теплоэнергетика»
Саратовского государственного технического университета

Статья поступила в редакцию 30.07.07, принята к опубликованию 05.09.07

УДК 658.26:681.5

И.В. Долотовский, Е.А. Ларин

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА
ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА
ГАЗОПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

Рассмотрены теоретические положения системного анализа эффективности энергетического комплекса газоперерабатывающих предприятий. Приведены система показателей эффективности генерации и потребления ТЭР и основы методического и информационно-программного обеспечения анализа, нормирования и оптимизации энергопотребления для действующих и развивающихся предприятий.

I.V. Dolotovskiy, E.A. Larin

**THEORETICAL POSITIONS OF THE ANALYSIS
OF THE GAS-REPROCESSING ENTERPRISES ENERGY COMPLEX EFFICACY**

The theoretical positions of the system analysis of the effectiveness of the energy complex of the gas-reprocessing enterprises are researched here. The system of indices the effectiveness of generation and consumptions heat-power and energy resource and basis of the systematic and information-software of analysis, rate setting and optimization of energy consumption for the existing and developing enterprises are given here.

Газоперерабатывающие предприятия (ГПП) являются крупными потребителями топливно-энергетических ресурсов (ТЭР). В общем потреблении ТЭР предприятий газовой отрасли 6,5 % приходится на долю ГПП. Структура потребления ТЭР – топливного газа и электроэнергии (в пересчете на условное топливо) показана на рис. 1, а. Из рисунка видно, что энергоемкость основных технологических производств ГПП несоизмеримо выше затрат первичных энергоносителей на прочие технологические нужды. На рис. 1, б приведена структура потребления различных видов первичных и преобразованных ТЭР в газоперерабатывающей подотрасли в 2005 году.

Энергетический комплекс (ЭК) ГПП представляет собой сложную производственную структуру тесно взаимосвязанных по потокам энергоресурсов энергетических установок различных типов и назначений и технологических агрегатов, потребляющих одни виды (обычно несколько) и одновременно генерирующих другие виды ТЭР. При этом функции и парамет-

ры систем генерации и использования ТЭР имеют многоуровневые внутренние взаимосвязи и сложные связи с основными технологическими процессами газопереработки и внешними системами энергообеспечения. Кроме того, режимы эксплуатации ЭК зависят от параметров окружающей среды и экологических факторов регионов расположения ГПП.

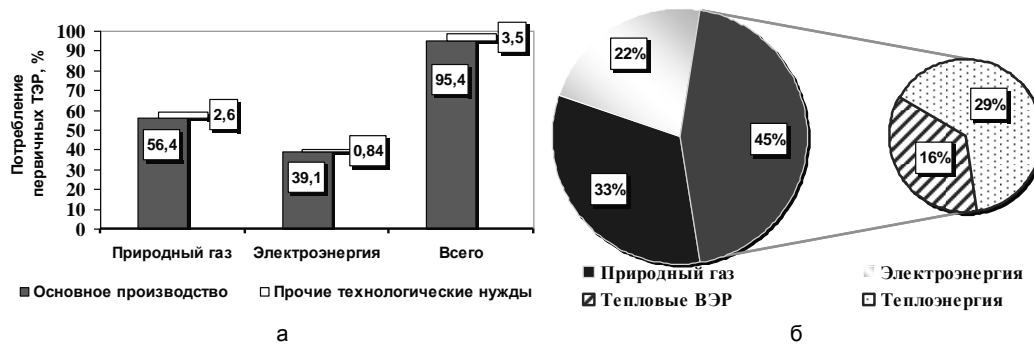


Рис. 1. Потребление ТЭР в газоперерабатывающей подотрасли в 2005 году: а – потребление первичных ТЭР (топливный газ и электроэнергия) в основном и вспомогательном производствах; б – общее потребление топлива, электроэнергии и теплоты

Поэтому проблема повышения эффективности ЭК ГПП не сводится только к решению задачи минимизации потерь ТЭР, а представляет собой комплекс задач по оптимизации всех элементов ЭК ГПП, связанных по параметрам и реальным графикам генерации и потребления ТЭР. Решение этих задач позволяет повысить экономическую эффективность работы ГПП в целом и системную эффективность использования ТЭР. Кроме того, технические решения, направленные на повышение эффективности ЭК ГПП, должны учитывать современные направления развития газоперерабатывающей подотрасли, предусматривающие увеличение глубины переработки сырья с использованием энергоемких низкотемпературных процессов, а также совершенствование систем энергообеспечения, в частности, за счет использования собственных энергоисточников с комбинированной выработкой электрической и тепловой энергии. Одной из важнейших задач общей концепции повышения энергоэффективности, в соответствии с которой реализуется политика конкретного ГПП в области использования ТЭР и разрабатывается стратегия развития ЭК, является задача оценки эффективности действующих систем энергообеспечения с учетом всех влияющих факторов, решение которой возможно только с позиций системного анализа.

Методология системного анализа ЭК ГПП включает два основных аспекта. Первый из них заключается в представлении объекта исследования как единой иерархически структурированной системы с внутренними и внешними связями. Второй аспект связан с разработкой системы задач анализа эффективности ЭК ГПП с использованием методов декомпозиции с последующим решением координирующей задачи оптимизации схемно-параметрических, технических и технологических решений.

С методической точки зрения решение задачи системного анализа эффективности ЭК ГПП и определение направлений его развития можно представить в системе координат, ограниченной тремя гранями – «объект», «задачи», «решение» (см. рис. 2).

I грань – объект. ГПП рассматривается как иерархически структурированная система, целью которой является переработка углеводородного сырья и выпуск востребованной продукции.

II грань – задачи, связанные с системными исследованиями в области энергообеспечения объекта и включающие две основные группы – генерация и потребление энергии и энергоносителей.

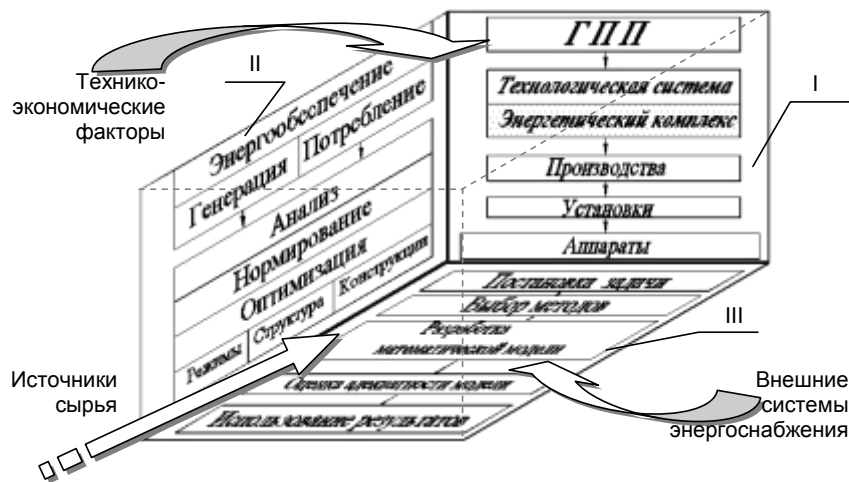


Рис. 2. Координатное пространство системных исследований ЭК ГПП

III грань – решение задачи. Здесь имеется несколько взаимосвязанных направлений – математическое моделирование, экспериментальные исследования, энергетический аудит и другие. На рис. 2 показано направление, в общих чертах отражающее методику математического моделирования.

Кроме того, на решение проблемы оказывают влияние внешние факторы – характеристики внешних систем энергообеспечения, источников сырья и технико-экономические факторы.

В качестве базовых элементов ГПП в технологической системе (ТС) рассматривается основное производство, включающее ряд установок с практически одинаковой для всех ГПП структурой (сепарация, осушка, очистка углеводородного сырья, переработка газового конденсата и другие) и установки, характерные только для единичных объектов (производства технического углерода, серы, гелия).

В энергетическом комплексе выделяются две подсистемы.

Первая (основная) подсистема ЭК включает в себя следующие базовые элементы, формирующие энергетическую составляющую затрат на переработку углеводородного сырья:

- система топливоснабжения, в основном, система снабжения топливным газом;
- система технологического теплоснабжения (пароснабжения);
- система электроснабжения, в том числе от собственных источников;
- система технологического водоснабжения и водоотведения (оборотные системы водоснабжения и снабжение производств химочищенной водой и др.).

Ко второй подсистеме относятся воздушные компрессорные станции и азотно-кислородные станции. Эти элементы имеют простую линейную зависимость от производительности основных технологических установок, уровня автоматизации, общего периода эксплуатации предприятия. Повышение эффективности для этих объектов ЭК связано с применением современного оборудования с высоким КПД, децентрализацией периодически действующих установок и другими мероприятиями, не влияющими на структуру и режимы функционирования технологической системы.

Указанные элементы ЭК имеют сложные внутренние термодинамические, расходные и режимно-параметрические связи и многофункциональную взаимосвязь с технологической системой, отдельные установки и аппараты которой являются генераторами энергоносителей (например, котлы-утилизаторы производства серы или котлы-утилизаторы технологических трубчатых печей). Структура и режимы эксплуатации перечисленных элементов зависят от

качества перерабатываемого сырья, номенклатуры выпускаемой продукции, технологической топологии основных производств ТС, региона расположения объекта, экологических и многих других факторов. Поэтому повышение эффективности данных подсистем соответствует повышению энергоэффективности всего комплекса в целом.

Во II грани координатного пространства общая задача системных исследований ЭК разбивается на три основные задачи: анализ, нормирование, оптимизация. В каждой из выделенных задач формируется ряд самостоятельных вопросов. Например, задача анализа генерации энергоносителей содержит вопросы экспериментальных и теоретических исследований, а задача нормирования предполагает формирование обновляемой базы данных по типовым установкам, процессам, аппаратам, экспериментальные и теоретические исследования.

Решение задач осуществляется с использованием соответствующих направлений III грани. Так, при математическом моделировании результатом является многофункциональная информационно-аналитическая модель, разработанная с использованием результирующих данных других частей III грани, в частности, экспериментальных исследований.

Ход решения задач можно разбить на два этапа, первый из которых состоит в формировании системы показателей для анализа, нормирования и оптимизации, а второй представляет содержательную часть решения задачи с разработкой методического, информационного, программного обеспечения.

Решение задач повышения эффективности ЭК ГПП требует разработки и обоснования показателей эффективности отдельных элементов (агрегатов, подсистем, производств) как на стадии проектирования объекта, так и на стадии его эксплуатации.

1. На стадии проектирования ЭК ГПП в качестве обобщающего показателя его эффективности принята удельная энергоемкость выпускаемой продукции, отнесенная к единице ее эксергии

$$\eta_{ex} = \frac{\sum_{j=1}^n (k_T \cdot B_{jt} + k_{\text{Э}} \cdot \mathcal{E}_{jt} + k_Q \cdot Q_{jt} - \beta \cdot E_{jt}^{BЭР})}{\sum_{k=1}^K (G_{kt} \cdot Q_{Hk}^p)}, \quad (1)$$

где η_{ex} – удельные затраты ТЭР на единицу эксергии продукта; B_{jt} , \mathcal{E}_{jt} , Q_{jt} – расходы топливного газа, м³, электроэнергии, кВт·ч, теплоты, ГДж, в производстве j за период времени t ; k_T , $k_{\text{Э}}$, k_Q – коэффициенты пересчета соответствующих энергоносителей из натуральных единиц в тонны условного топлива; β – коэффициент использования всех видов ВЭР в конкретных условиях; $E_{jt}^{BЭР}$ – объем ВЭР, отходящих от производства j , т у.т.; n – число производств в составе ГПП; τ – расчетный период времени, обычно год; G_{kt} – объем выпущенной k -й продукции (товарного газа, ШФЛУ, стабильного конденсата, пропанобутановой фракции, мазута, дизельного топлива, этана, серы, технического углерода и др.) за время t ; Q_{Hk}^p – низшая теплота сгорания k -й продукции, ГДж/ед. прод.

Уравнение (1) соответствует номенклатуре выпускаемой продукции ГПП в виде горючих веществ (газ, сжиженные газы, автобензины, стабильный конденсат, сера, технический углерод и др.). В общем случае величина эксергии всех потоков должна рассчитываться по известным зависимостям, учитывающим все виды эксергии. При этом возникают проблемы методического характера с определением эксергии веществ и потоков энергии, зависящих как от параметров рассматриваемой системы, так и от температуры окружающей среды, являющейся переменной величиной. Трудности реализации эксергетического метода при оптимизации проектируемых систем ЭК заключаются также в его условности по отношению к таким продуктам ГПП, как сера, технический углерод и другая продукция, не имеющая топливного назначения у потребителя.

На стадии эксплуатации основными отчетными показателями эффективности ЭК ГПП являются следующие удельные величины.

2. Удельные расходы ТЭР на единицу перерабатываемого углеводородного сырья (обычно 1000 м³ газа или 1000 т сырья) [1], определяемые для отдельных видов энергоносителей по установкам, производствам и предприятию в целом:

– удельный расход топлива, м³,

$$E_T = \sum_{j=1}^n E_{Tj}^H = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m E_{Ti}^V ; \quad (2)$$

– удельный расход электроэнергии, кВт·ч,

$$E_{\text{э}} = \sum_{j=1}^n E_{\text{э}j}^H = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m E_{\text{э}i}^V ; \quad (3)$$

– удельный расход тепловой энергии, ГДж,

$$E_Q = \sum_{j=1}^n E_{Qj}^H = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m E_{Qi}^V , \quad (4)$$

где $E_{Tj}^H, E_{\text{э}j}^H, E_{Qj}^H$ – удельный расход соответствующего вида ТЭР в производстве j ; $E_{Ti}^V, E_{\text{э}i}^V, E_{Qi}^V$ – удельный расход соответствующего вида ТЭР в установке i ; m – число установок в составе производства j .

3. Эквивалентный удельный расход всех видов ТЭР, т у. т./тыс.м³ или т у. т./тыс.т

$$E = E_T \cdot k_T + E_{\text{э}} \cdot k_{\text{э}} + E_Q \cdot k_Q . \quad (5)$$

Различают фактическое удельное потребление ТЭР, характеризующее состояние ЭК в анализируемый период времени, и нормативное удельное потребление, которое в настоящее время, не имея утвержденной базы, ориентировано на проектные (регламентные) показатели установок и производств газопереработки.

Для действующих отечественных ГПП общее удельное энергопотребление от внешних и внутренних источников приведено в таблице.

Показатели удельного потребления ТЭР на газоперерабатывающих предприятиях

Наименование	Единица измерения	Газоперерабатывающее предприятие				
		Оренбургский ГПЗ	Астраханский ГПЗ	Сосногорский ГПЗ	Уренгойское УПКТ	Сургутский ЗСК
Переработано сырья:						
– газ	млн. м ³	28928,08	9752,5	1424,3	—	—
– конденсат	тыс. т	4568,314	3413,4	365,2	4918,15	3590,64
Удельный расход ТЭР:						
– газ на собственные технологические нужды и потери	м ³ /тыс. м ³ м ³ /т	20,0	93,9	17,11	— 11,0	— 16,7
– электроэнергия	кВт·ч/тыс. м ³ кВт·ч/т	27,115 —	39,14 —	38,83 —	— 9,10	— 28,85
– тепловая энергия	Гкал/тыс. м ³ Гкал/т	0,119 —	0,441 —	0,137 —	— —	— 0,100
Итого	т у. т./тыс. м ³ т у. т./тыс. т	0,0903 —	0,2703 —	0,0559 —	— 0,0157	— 0,0458

Приведенные в таблице удельные показатели не позволяют оценить эффективность использования энергоносителей на том или ином ГПП путем простого сопоставления, поскольку предприятия перерабатывают различное сырье с разной степенью конверсии в то-

варную продукцию различного вида. Кроме того, общим недостатком приведенных удельных показателей является отсутствие взаимосвязей как внутри установок и подсистем ЭК, так и связей ЭК и технологических процессов, установок и производств. Это не позволяет определить величину потерь в отдельных подсистемах ЭК и установить взаимозависимость этих потерь от различных влияющих факторов и параметров.

Чтобы выполнить анализ перспективных направлений развития ЭК ГПП в соответствии с меняющимися технологическими и внешними условиями и номенклатурой выпускаемой продукции, предлагается использовать следующие показатели.

4. Удельная энергоёмкость ГПП по выпускаемой продукции – величина удельных затрат всех видов ТЭР (в тоннах условного топлива) к стоимости реализованной продукции

$$\eta_R = \sum_{t=0}^{\tau} \frac{\sum_{j=1}^n (k_T \cdot B_{jt} + k_{\mathcal{E}} \cdot \mathcal{E}_{jt} + k_Q \cdot Q_{jt})}{R_t}, \quad (6)$$

где η_R – удельные затраты ТЭР на единицу реализованного продукта; R_t – стоимость реализованной продукции за период времени t , определяемой как

$$R_t = \sum_{k=1}^K (G_{kt} \cdot U_k), \quad (7)$$

U_k – цена k -й продукции.

Для учета всего многообразия влияющих факторов и параметров технологических и энергообеспечивающих производств в уравнении (6) расходные характеристики энергоносителей и продукции представлены в виде функционалов

$$\begin{aligned} B_j &= \int_0^{\tau} f(\Omega_{jt}^T, Z_{jt}^T, S_{jt}^T) dt; & \mathcal{E}_j &= \int_0^{\tau} f(\Omega_{jt}^{\mathcal{E}}, Z_{jt}^{\mathcal{E}}, S_{jt}^{\mathcal{E}}) dt; \\ Q_j &= \int_0^{\tau} f(\Omega_{jt}^Q, Z_{jt}^Q, S_{jt}^Q) dt; & G_k &= \int_0^{\tau} f(\Omega_{jt}^G, Z_{jt}^G, S_{jt}^G) dt, \end{aligned} \quad (8)$$

где подынтегральные функции описывают взаимосвязь расхода соответствующего энергоносителя в j -м производстве в момент времени t , объема выпускаемой продукции и технологических (Ω), конструктивных (Z), климатических (S) факторов и параметров.

Использование функциональных зависимостей (8), которые в конечном итоге отражают энерготехнологический баланс ГПП, позволяет выполнить всесторонний анализ ЭК и нормирование потребления ТЭР и по отчетным показателям (2)...(5).

5. Использование тепловых ВЭР целесообразно оценивать двумя показателями.

Доля использования ВЭР для выработки тепловой энергии для собственных нужд в конкретных условиях действующего ГПП

$$\delta_Q = \sum_{t=0}^{\tau} \sum_{j=1}^n \left(\frac{Q_{jt}^{BЭР}}{Q_{jt}} \right), \quad (9)$$

где $Q_{jt}^{BЭР}$ – количество тепловой энергии, полученной за счет утилизации ВЭР, в производстве j за период времени t , ГДж.

Коэффициент использования ВЭР для выработки тепловой энергии

$$\eta_Q^{BЭР} = \sum_{t=0}^{\tau} \sum_{j=1}^n \left(\frac{Q_{jt}^{BЭР}}{Q_{jtРАСП}} \right), \quad (10)$$

где $Q_{jtРАСП}^{BЭР}$ – располагаемая теплота ВЭР в производстве j за период времени t , ГДж.

Системы технологического теплоснабжения (пароснабжения) имеют наиболее сложные внутренние взаимосвязи с технологической системой. Кроме того, теплоснабжение ГПП представляет собой многоуровневую структуру по параметрам генерируемого пара. Общий вид такой структуры приведен на рис. 3.

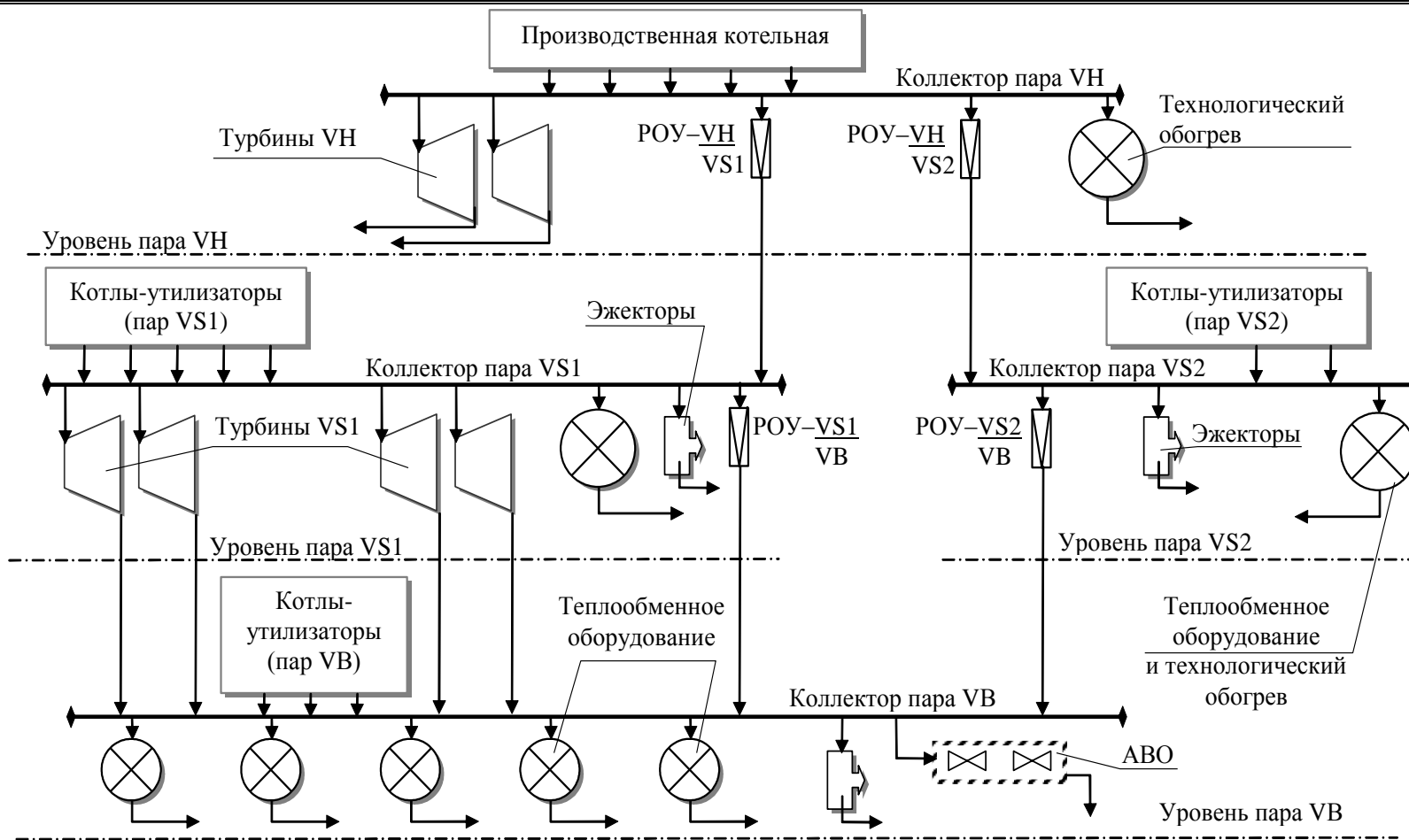


Рис. 3. Блочнo-иерархическая структура подсистем генерации и использования тепловой энергии

На уровне пара высокого давления (VH) осуществляется генерация тепловой энергии в котельной предприятия, а потребителями энергии является паровой турбопривод высоконапорного компримирующего оборудования технологических процессов.

На уровне пара среднего давления производств по переработке газа (VS1) основными генераторами теплоты являются котлы-утилизаторы производства серы (установки Клауса).

Вырабатываемый на этом уровне пар используется на собственные нужды производства серы в паровых турбинах для привода газо- и воздуходувов, а также в турбинах привода компрессоров товарного газа, на технологический обогрев оборудования, пароспутники, факельные системы всего предприятия.

На уровне пара среднего давления производств по переработке газового конденсата (VS2) тепловая энергия генерируется в котлах-утилизаторах технологических установок, теплообменное и эжектирующее оборудование которых практически полностью потребляет пар данного уровня давления.

Уровень пара низкого давления (VB) является замыкающим для всей теплотехнологической подсистемы ЭК ГПП. На этот уровень поступает пар от расположенных выше уровней после трансформации в противодавленческих турбинах или в редуционно-охладительных установках (РОУ). Кроме того, в котлах-утилизаторах производства серы также осуществляется генерация пара низкого давления. Потребители пара VB – кипятильницы колонн, технологический обогрев оборудования и трубопроводов, эжекционные системы, вспомогательные нужды производств (приготовление растворов, паротушение печей и их паровые завесы, факельные системы).

Для обеспечения надежной работы нагнетательного оборудования на уровне пара VS1 предусматривается выработка некоторого избыточного количества пара на уровне VH, который затем через РОУ поступает на следующий уровень (рис. 3). Избыток пара с уровня VS1 через соответствующие РОУ поступает на более низкий уровень пара VB. На замыкающем уровне возникающее избыточное количество пара (летний период при отключении теплового обогрева ряда установок) подается на конденсацию в аппараты воздушного охлаждения (АВО).

Для оценки эффективности такой сложной подсистемы ЭК ГПП предлагается использовать следующие коэффициенты.

б. Коэффициент использования теплоты в системе технологического пароснабжения

$$\eta_{TTC}'' = \prod_{p=1}^P \frac{Q_p \cdot k_Q \cdot \eta_p}{\sum_{j=1}^n B_j \cdot k_T + Q_{jPACII}^{BЭP} \cdot \eta_{jQ}^{BЭP}}, \quad (11)$$

где η_{TTC}'' – коэффициент полезного использования (КПИ) теплоты в системе теплоснабжения технологических установок; P – уровни установок, составляющих группу конечного потребления пара различных давлений, за исключением установок, где происходят процессы его преобразования в полезную работу; Q_p – расход тепловой энергии на уровне p ; η_p – КПИ на соответствующем уровне потребления.

Комплекс методического и информационно-программного обеспечения решения поставленных задач разрабатывается на основе математического моделирования процессов, аппаратов и установок ГПП, экспериментальных работ на действующем объекте, материалов энергетического аудита.

Генерация и потребление энергоносителей в технологических установках зависят от расхода целевых продуктов, следовательно, определяющим фактором в функциях (8) является технологический фактор Ω , представляющий систему материальных балансов процессов. В соответствии с общими теоретическими положениями структурного анализа энерготехнологических систем газоперерабатывающих предприятий [2, 3] взаимосвязи диаграмм мате-

риального и энергетических балансов осуществляются через функцию Ω_j^W производства j для соответствующего энергоносителя W

$$\Omega_j^W = f\left(\sum_{i=1}^m (w_{yDi}, G_j), \sum_{u=1}^r (W_u, \tau_u)\right), \quad (12)$$

где w_{yDi} – удельное потребление / генерация энергоносителя W в i -м непрерывном процессе (непрерывно действующей установке или аппарате); G_j – расходная характеристика производства, по которой определяется потребление / генерация энергоносителя; W_u, τ_u – потребление энергоносителя W в периодическом процессе u и время этого процесса.

В свою очередь, $G_j, w_{yDi}, W_u, \tau_u$ в общем случае зависят от качества и количества входных перерабатываемых потоков, параметров процессов, технического состояния оборудования, качества катализаторов, климатических и экологических факторов.

Так, расходная характеристика производства G_j зависит от степени детализации математической модели материального баланса отдельных процессов. Были использованы точные закономерности химических и массообменных процессов, эмпирические соотношения, полученные на основании экспериментальных данных, а также зависимости, сформированные на основании опыта эксплуатации конкретных производств по переработке газа и газового конденсата. Например, для Астраханского ГПЗ для многих технологических производств на основании эксплуатационных данных [4] расходную характеристику можно преобразовать в линейную зависимость вида

$$G_j = A_j \cdot G_j', \quad (13)$$

где G_j', G_j – технологический поток на входе и выходе j -го производства соответственно; A_j – функция, характеризующая степень преобразования (конверсии) потока G_j' в поток G_j и зависящая от режимно-технологических факторов. Вид данной функции определяется на уровне аппаратов и отражает особенности основных процессов ГПП – химические превращения в реакторных блоках, разделение потоков в абсорбционно-десорбционных и ректификационных аппаратах, накопление вещества в емкостном оборудовании, стоки веществ в факельные, канализационные и вентиляционные системы. Для реакторных блоков величина A_j обычно соответствует степени превращения при оптимальной температуре ведения процесса и определяется на основании расчетов кинетики химических реакций. При блочно-иерархическом принципе математического моделирования из системы функций (13) на уровне аппаратов выводится обобщающая функция для уровня установок и для уровня производства.

Например, для производства серы степень конверсии сероводорода в серу на установках Клауса и Сульфрен определяется зависимостью от срока эксплуатации аппаратов после капитального ремонта τ_p (месяцы) $A_j = 0,9943 - 10^{-5} \cdot \tau_p^2$.

Аналогичным образом путем проведения пассивных экспериментов на действующих производствах были установлены функциональные зависимости w_{yDi} от влияющих технологических факторов

$$w_{yDi} = f(G_i^C, \chi_i), \quad (14)$$

где G_i^C – расходная характеристика i -го процесса, в котором происходит потребление / генерация энергоносителя; χ_i – обобщенная технологическая функция i -го процесса, включающая технологические параметры и некоторые конструктивные, климатические и экологические параметры.

Например, для конденсаторов-генераторов в отделении Клауса производства серы удельная выработка пара средних параметров d_{VS} в диапазоне производительности реакторов

по кислороду газу $V_{\text{КГ}} = (71 \dots 100)$ тыс. м³/ч линеаризуется от концентрации сероводорода $C_{\text{H}_2\text{S}}$ и расходной характеристики функцией вида

$$d_{\text{VS}} = 0,01 \cdot (0,01365 \cdot V_{\text{КГ}} + 0,2314) \cdot C_{\text{H}_2\text{S}}. \quad (15)$$

Для этой же установки собственное потребление пара средних параметров турбинами газодувок и воздуходувок (d_{VS}^T) является функцией номинального часового потребления пара в рабочем режиме d_H , времени работы в номинальном режиме τ_0 и времени работы установки при неблагоприятных метеорологических условиях τ_H , когда вынужденно снижается производительность реакторных блоков

$$d_{\text{VS}}^T = d_H \cdot (\tau_0 - 0,15 \cdot \tau_H). \quad (16)$$

Конструктивные параметры Z отражены в математических моделях для соответствующих аппаратов, входящих в установку, в виде системы констант. В систему включены КПД нагнетательного оборудования (компрессоров, насосов, вентиляторов, газодувок, воздуходувок); КПД турбин, котельных агрегатов, трубчатых печей; коэффициенты тепловых потерь трубопроводных и теплообменных систем и другие показатели.

С учетом конструктивных параметров турбин зависимость (16) имеет вид

$$d_{\text{VS}}^T = d_H \cdot (\tau_0 - 0,15 \cdot \tau_H) \cdot \left(\frac{\eta_H}{\eta_Э} \right), \quad (17)$$

где η_H , $\eta_Э$ – КПД проточной части турбины нормативный (паспортный) и КПД по данным последних испытаний (эксплуатационный) соответственно.

Следует отметить, что система констант, отражающих конструктивные характеристики оборудования, является одним из элементов обновляемой базы данных по оборудованию, которая входит в разработанную информационно-аналитическую модель объекта.

Климатические параметры S определяют для всех видов ТЭР расчетные параметры окружающей среды (минимальные – для теплотребляющих систем и максимальные – для систем охлаждения), при которых были выбраны соответствующие конструктивные характеристики оборудования. Эксплуатация установок при других, отличных от расчетных, температурах окружающей среды вызывает изменения и в расходах энергоносителей, и системах энергообеспечения в целом.

Например, удельное потребление электроэнергии воздуходувками и компрессорами для эксплуатационных режимов $\mathcal{E}_{\text{уд}}^Э$ имеет линейную зависимость от температуры окружающего воздуха

$$\mathcal{E}_{\text{уд}}^Э = \mathcal{E}_{\text{уд}}^P \cdot \left(\frac{T_{\text{OC}}^Э}{T_{\text{OC}}^P} \right), \quad (18)$$

где $\mathcal{E}_{\text{уд}}^P$ – удельное потребление электроэнергии для расчетной T_{OC}^P , К, температуры окружающего воздуха; $T_{\text{OC}}^Э$ – температура воздуха в соответствующем эксплуатационном режиме, К.

Более сложную зависимость имеет удельное потребление электроэнергии для аппаратов воздушного охлаждения (АВО). После проведения численных экспериментов по разработанным моделям АВО [5] взаимосвязь $\mathcal{E}_{\text{уд}}^P$ и $\mathcal{E}_{\text{уд}}^Э$ была аппроксимирована эмпирической зависимостью:

$$\mathcal{E}_{\text{уд}}^Э = \mathcal{E}_{\text{уд}}^P \cdot \frac{1,945 - 0,0295 \cdot (T_{\text{OC}}^P - 273)}{1,945 - 0,0295 \cdot (T_{\text{OC}}^Э - 273)} \cdot \left(\frac{N^P}{N^Э} \right)^{1+\gamma}, \quad (19)$$

где N^P , $N^Э$ – число параллельно включенных по охлаждаемому продукту АВО в расчетном и эксплуатационном режиме; γ – коэффициент, учитывающий загрязненность поверхности при

различном расположении труб; $\gamma = 0,72$ для коридорных пучков и $\gamma = 0,64$ для шахматных пучков труб.

Приведенные общие положения системных исследований ЭК ГПП были реализованы в информационно-аналитической модели, позволяющей осуществить анализ энергопотребления, выполнить перспективное планирование с учетом влияния технологических, конструктивных, климатических и других факторов.

Например, для теплотехнологической и теплоутилизационной подсистем ГПП (рис. 3) были определены показатели эффективности для трех уровней параметров потребляемого пара. Коэффициент использования высокотемпературных тепловых ВЭР составил $\eta_Q^{ВЭР} \sim 89,3 \%$; КПИ по уровням давления пара составили соответственно: VH МПа – $\eta_{VH} \sim 83,2 \%$; $VS1$ – $\eta_{VS1} \sim 87,6 \%$; VB – $\eta_{VB} \sim 82,7 \%$; $\eta_{ГТС}^H \sim 48,9 \%$ [6].

По результатам анализа технологических, конструктивных, климатических факторов было установлено, что причиной низкого значения общесистемных показателей эффективности является нерациональная схема пароснабжения (редуцирование пара на различных уровнях), более низкие по сравнению с паспортными данными КПД турбин среднего давления, длительная эксплуатация турбин в режимах холостого хода и утилизационных установок в неблагоприятных по экологическим показателям режимах (с пониженной производительностью).

Помимо анализа действующих установок и планирования потребления ТЭР комплекс программно-методического обеспечения ЭК ГПП позволяет также разработать направления развития энергетической системы при изменении технологической топологии и увеличении глубины переработки сырья.

Выводы

1. Для энергетического комплекса предприятий по переработке газа и газового конденсата разработаны теоретические основы системного анализа, включающие выбор показателей эффективности использования топлива, тепловой и электрической энергии, вторичных энергоресурсов и водопотребления.

2. Разработана информационно-аналитическая система и программно-методическое обеспечение для анализа, нормирования, оптимизации энергообеспечения установок, производств и предприятий.

3. Выполнен анализ эффективности теплотехнологических и теплоутилизационных систем ГПП и определены направления оптимизации режимов эксплуатации действующего оборудования этих систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Временные методические указания по проведению анализа эффективности использования энергоресурсов, разработке Программ энергосбережения обществ (организаций) и предложений к Программе энергосбережения ОАО «Газпром» на 2001-2003 гг. М.: ВНИИГАЗ, ДОО «ПРОМГАЗ», 2001. 12 с.

2. Долотовский И.В. Методология структурного анализа теплотехнологических и теплоутилизационных систем газоперерабатывающих производств / И.В. Долотовский, Н.В. Долотовская, Н.В. Винниченко // Энергосбережение в промышленности и теплоэнергетике: сб. науч. тр. Саратов: СГТУ, 2005. С. 97-102.

3. Структурный анализ энерготехнологических систем Астраханского газоперерабатывающего завода / В.А. Федоров, Н.В. Винниченко, И.В. Долотовский, Н.В. Долотовская // Электро- и теплотехнологические процессы и установки-2: сб. науч. тр. Саратов: СГТУ, 2005. С. 118-123.

4. Расчет материального баланса переработки газа Астраханского ГКМ / Г.В. Тараканов, С.Н. Крупина, В.М. Спиридонов и др. // Газовая промышленность. 2000. № 3. С. 56-57.

5. Долотовский И.В. Моделирование динамических тепловых режимов АВО предприятий подготовки и транспорта газа / И.В. Долотовский, И.И. Артюхов, Н.В. Долотовская // Актуальные вопросы промышленной теплоэнергетики и энергосбережения: сб. науч. тр. Саратов: СГТУ, 2004. С. 91-99.

6. Потенциал энергосбережения газоперерабатывающих предприятий / Н.В. Винниченко, Е.А. Ларин, И.В. Долотовский, Л.А. Мигачева // Газовая промышленность. 2006. № 6. С. 77-80.

Долотовский Игорь Владимирович –
аспирант кафедры «Теплоэнергетика»
Саратовского государственного технического университета

Ларин Евгений Александрович –
кандидат технических наук, профессор кафедры «Теплоэнергетика»
Саратовского государственного технического университета

Статья поступила в редакцию 17.07.07, принята к опубликованию 05.12.07

УДК 697.536

Б.А. Семенов, О.П. Хомякова

МЕТОДИКА СРАВНЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЬСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ДЛЯ ТЕПЛОЗАЩИТЫ ТРУБОПРОВОДОВ

Предложена проиллюстрированная примером методика определения частных потребительских потенциалов теплоизоляционных материалов при теплозащите цилиндрических поверхностей с заданным радиусом кривизны. Практическая реализация данной методики позволит достигать наибольшего экономического эффекта от устройства теплозащиты любых объектов в каждом конкретном случае.

B.A. Semyonov, O.P. Khomyakova

COMPARISON TECHNIQUE OF CONSUMER EFFICIENCY HEAT ISOLATION OF MATERIALS USED FOR HEAT-SHIELDING OF PIPELINES

The technique of definition of private individual consumer potentials of heat isolation materials, illustrated with an example, is offered at a heat-shielding of cylindrical surfaces with given radius of curvature. The practical realization of the given technique will allow reaching the greatest economic benefit of the device of a heat-shielding of any objects in each concrete case.

В работе [4] рассмотрен ряд принципиальных вопросов, связанных с комплексной оценкой потребительской эффективности теплоизоляционных материалов, используемых для теплозащиты плоских поверхностей различных теплоотражающих элементов, технологического и энергетического оборудования. Обоснована методика и предложены критерии для определения интегральной эффективности теплозащиты, базирующиеся на оценке полного и частного потребительских потенциалов теплоизоляционных материалов. Эта методика обеспечивает однозначность оценок, а критерии, имеющие ясный физический смысл, просты и удобны для практического использования. Однако следует понимать, что при обосновании данной методики были использованы законы теплопередачи через плоские стенки [1], в связи с чем, основные выводы, полученные в работе [4], носят частный характер, не позволяющий автоматически распространять их на теплозащиту трубопроводов.

Основные расчетные зависимости, описывающие процесс теплопередачи через криволинейные теплоизоляционные слои цилиндрических поверхностей, в отличие от зависимостей, используемых при расчете плоских стен, имеют более сложный, логарифмический характер, что приводит к возникновению трансцендентных уравнений и существенно затрудняет получение аналитического решения задач, связанных с расчетом оптимальной теплозащиты трубопроводов и выбором наиболее эффективных материалов.

Аналитическое решение задачи оптимизации теплозащиты трубопроводов приведено в работе [5]. Однако относительная сложность этого решения и необходимость использования встроенной процедуры итерационного расчета для его практической реализации не позволили в рамках предложенного подхода выявить и строго математически обосновать критерии потребительской эффективности теплоизоляционных материалов, однозначно определяющие интегральную эффективность теплозащиты трубопроводов. При этом на основании многовариантных вычислений, выполненных в работе [8], было установлено, что помимо тех факторов, которые определяют потребительскую эффективность теплоизоляционных материалов в плоских конструкциях, на показатели интегральной эффективности теплозащиты трубопроводов существенное влияние оказывает кривизна теплоизолируемых поверхностей. Поэтому при теплозащите трубопроводов, в отличие от [4], оценка частных потребительских потенциалов теплоизоляционных материалов должна обязательно производиться с учетом фактической кривизны теплоизолируемых поверхностей.

Отсутствие объективных критериев и научно обоснованной методики расчета является главной причиной того, что в специальной литературе до сих пор нет полной ясности по вопросу рационального выбора теплоизоляционных материалов для теплозащиты трубопроводов.

Аналитическое обоснование методики определения частных потребительских потенциалов теплоизоляционных материалов при теплозащите цилиндрических поверхностей с заданным радиусом кривизны приводится в настоящей работе.

Оценим потери теплоты через криволинейный слой теплоизоляционного материала, защищающий боковую цилиндрическую поверхность трубопровода с заданным радиусом кривизны наружной поверхности r_o , м. Эту поверхность в дальнейшем будем считать базовой, а радиус r_o – базовым радиусом кривизны теплоизолируемой цилиндрической стенки.

Удельные годовые потери теплоты в расчете на 1 м^2 базовой поверхности Q_{y0}^{zod} , Вт·ч/($\text{м}^2 \cdot \text{год}$), согласно [5], можно представить выражением

$$Q_{y0}^{zod} = \frac{T_{zod}^{n.z} \cdot \Delta t_{zod}^{cp}}{\frac{r_o}{\lambda_m} \left(C_o + x + \frac{\lambda_m}{r_o \cdot \alpha_n} \cdot e^{-x} \right)}, \quad (1)$$

где $T_{zod}^{n.z}$ – продолжительность годового периода эксплуатации, ч/год; Δt_{zod}^{cp} – среднегодовая разность температур теплоносителя и окружающего воздуха, °С; λ_m – теплопроводность теплоизоляционного материала, Вт/(м·°С); α_n – коэффициент теплоотдачи от наружной поверх-

ности, Вт/(м²·°С); x – безразмерная формальная переменная, определяемая выражением (2); C_o – безразмерная конструктивная константа, определяемая выражением (3).

Формальная переменная x в данном случае используется для упрощения математических преобразований. Согласно [5], она представляет собой логарифмическую функцию толщины δ , м, и кривизны r_o , м, теплоизоляционного слоя цилиндрической стенки

$$x = \ln \frac{r}{r_o} = \ln \left(1 + \frac{\delta}{r_o} \right), \quad (2)$$

где r – радиус наружной поверхности теплоизоляционного слоя, м.

Безразмерная конструктивная константа C_o определяется известными значениями коэффициента теплоотдачи от транспортируемого теплоносителя к внутренней поверхности трубы $\alpha_{вн}$, Вт/(м²·°С), теплопроводностью материала, из которого изготовлен трубопровод $\lambda_{мп}$, Вт/(м·°С), и радиусом кривизны внутренней поверхности трубопровода $r_{вн}$, м

$$C_o = \frac{\lambda_m}{\alpha_{вн} \cdot r_{вн}} + \frac{\lambda_m}{\lambda_{мп}} \ln \frac{r_o}{r_{вн}}. \quad (3)$$

С учетом выражения (1), зависимость вызванных потерями теплоты удельных годовых эксплуатационных издержек от безразмерной формальной переменной x представим в виде

$$I_{zod} = c_3 \cdot Q_{yod}^{zod} = \frac{c_3 \cdot T_{zod}^{н.з} \cdot \Delta T_{zod}^{cp}}{\frac{r_o}{\lambda_m} \left(C_o + x + \frac{\lambda_m}{r_o \cdot \alpha_n} \cdot e^{-x} \right)}, \quad (4)$$

где I_{zod} – годовые издержки в расчете на 1 м² базовой поверхности трубопровода, руб./(год·м²); c_3 – тарифная стоимость теплоты, руб./(Вт·ч).

Зависимость удельных капвложений в тепловую изоляцию трубопроводов от формальной переменной x , согласно [5], имеет вид

$$K_m = 0,5 \cdot c_m \cdot r_o [e^{2x} - 1], \quad (5)$$

где K_m – удельные капвложения в теплоизоляционный слой, рассчитанные на 1 м² базовой поверхности трубопровода, руб./м².

Адаптируем введенное в работе [4] понятие частного потребительского потенциала теплоизоляционных материалов к условиям теплозащиты цилиндрических поверхностей трубопроводов. Выражение для расчета частного потребительского потенциала теплоизоляционных материалов в любых конструкциях в наиболее общем виде можно записать следующим образом

$$P_m^* = -\frac{\alpha^* \cdot dI_{zod}}{\beta \cdot dK} = -\alpha \cdot \frac{dI_{zod}}{dK} \cdot \frac{\alpha^*}{\alpha \cdot \beta} = -\alpha \cdot \frac{dI_{zod}}{dK} \cdot \eta_m, \quad (6)$$

где dI_{zod} – годовой эффект от устройства элементарного теплозащитного слоя бесконечно малой толщины на теплоизолируемой поверхности, руб./год; dK – капитальные вложения в элементарный теплоизоляционный слой, руб; α – коэффициент дисконтирования прибыли, рассчитываемый по формуле (7), за весь срок службы теплоизоляционного материала; α^* – коэффициент дисконтирования прибыли, рассчитываемый по формуле (8) за срок службы теплоизолируемого объекта; β – рассчитываемый по формуле (9) коэффициент дисконтирования капвложений, учитывающий необходимость замены теплоизоляционного слоя после выработки эксплуатационного ресурса теплоизоляционного материала [5]; η_m – коэффициент использования потребительского потенциала теплоизоляционного материала на объекте, определяемый по выражению (10).

При реальной норме дисконта [3], принимаемой согласно [4] $E^* = 0,05$, коэффициенты дисконтирования α и α^* определяются выражениями

$$\alpha = \frac{1}{E^*} \left[1 - (1 + E^*)^{-T_{cl}^{mam}} \right] = 20 \cdot \left[1 - (1,05)^{-T_{cl}^{mam}} \right], \quad (7)$$

$$\alpha^* = \frac{1}{E^*} \left[1 - (1 + E^*)^{-T_{cl}^{ob}} \right] = 20 \cdot \left[1 - (1,05)^{-T_{cl}^{ob}} \right], \quad (8)$$

где T_{cl}^{mam} – установленный изготовителем нормативный срок службы теплоизоляционного материала (эксплуатационный ресурс материала), лет; T_{cl}^{ob} – нормативный срок службы теплоизолируемого объекта, лет.

Коэффициент дисконтирования капложений β , учитывающий необходимость полной замены тепловой изоляции после выработки ее эксплуатационного ресурса, согласно [5], определяется выражением

$$\beta = \sum_{j=0}^n (1 + E^*)^{-j \cdot T_{cl}^{mam}} = 1 + \left[1 - (1,05)^{-n \cdot T_{cl}^{mam}} \right] \cdot \left[(1,05)^{T_{cl}^{mam}} - 1 \right]^{-1}, \quad (9)$$

где j, n – номер и количество капремонтов, предусматривающих полную замену тепловой изоляции, в течение всего срока службы объекта.

С учетом выражений (7), (8) и (9) коэффициент использования потребительского потенциала теплоизоляционного материала на объекте может быть определен как

$$\eta_m = \frac{\alpha^*}{\alpha \cdot \beta} = \frac{1 - (1 + E^*)^{-T_{cl}^{ob}}}{1 - (1 + E^*)^{-T_{cl}^{mam}(n+1)}} = \frac{1 - 1,05^{-T_{cl}^{ob}}}{1 - 1,05^{-T_{cl}^{mam}(n+1)}}. \quad (10)$$

Элементарный годовой теплозащитный эффект для цилиндрической поверхности «голового» трубопровода может быть рассчитан как дифференциал функции (4), вычисленный в точке $x = 0$. С учетом допущения о незначительности конструктивной константы $C_o = 0$, которое справедливо при теплозащите любых металлических труб, используемых для транспортировки жидкостей, элементарный теплозащитный эффект составит

$$\begin{aligned} dH_{zod} = & -c_3 \cdot T_{zod}^{n.3} \cdot \Delta t_{zod}^{cp} \cdot \frac{\lambda_m}{r_o} \cdot \left(C_o + x + \frac{\lambda_m}{r_o \cdot \alpha_n} e^{-x} \right)^{-2} \cdot \left(1 - \frac{\lambda_m}{r_o \cdot \alpha_n} e^{-x} \right) \cdot dx = \\ & -c_3 \cdot T_{zod}^{n.3} \cdot \Delta t_{zod}^{cp} \cdot \frac{\lambda_m}{r_o} \cdot \left(\frac{r_o \cdot \alpha_n}{\lambda_m} \right) \cdot \left(\frac{r_o \cdot \alpha_n}{\lambda_m} - 1 \right) \cdot dx. \end{aligned} \quad (11)$$

Капложения в элементарный теплоизоляционный слой, защищающий цилиндрическую поверхность «голового» трубопровода, найдем как дифференциал функции (5), вычисленный в той же точке $x = 0$

$$dK = c_m \cdot r_o \cdot e^{2x} = c_m \cdot r_o. \quad (12)$$

Подставив дифференциалы, определяемые выражениями (11) и (12), в выражение (6), после элементарных математических преобразований получим следующий вид функции, определяющей значения частных потребительских потенциалов теплоизоляционных материалов $p_{m,tr}^*$, используемых для теплозащиты трубопроводов в стандартных условиях сопоставления

$$\begin{aligned} p_{m,tr}^* = & -\alpha \cdot \frac{dH_{zod}}{dK} = \alpha \cdot \frac{c_3}{c_m \cdot \lambda_m} \cdot T_{zod}^{n.3} \cdot \Delta t_{zod}^{cp} \cdot \eta_m \cdot \left(\frac{\lambda_m}{r_o} \right)^2 \cdot \left(\frac{r_o \cdot \alpha_n}{\lambda_m} \right) \cdot \left(\frac{r_o \cdot \alpha_n}{\lambda_m} - 1 \right) = \\ = & \alpha \cdot \frac{c_3}{c_m \cdot \lambda_m} \cdot \frac{T_{zod}^{n.3} \cdot \Delta t_{zod}^{cp}}{(R_{o,cm})^2} \cdot \eta_m \cdot \left(\frac{\lambda_m \cdot R_{o,cm}}{r_o} \right)^2 \cdot \left(\frac{r_o \cdot \alpha_n}{\lambda_m} \right) \cdot \left(\frac{r_o \cdot \alpha_n}{\lambda_m} - 1 \right) = \\ = & \alpha \cdot \frac{c_3}{c_m \cdot \lambda_m} \cdot p_o \cdot \eta_m \cdot \left(\frac{\lambda_m \cdot R_{o,cm}}{r_o} \right)^2 \cdot Bi \cdot (Bi - 1), \end{aligned} \quad (13)$$

где $p_{m,tr}^*$ – частный потребительский потенциал теплоизоляционного материала при его использовании для теплозащиты трубопроводов; $R_{o,cm}$; p_o – стандартные значения, предложенные [4] для оценки полных потребительских потенциалов теплоизоляционных материалов в плоских конструкциях: сопротивление теплопередаче стандартной плоской стенки $R_{o,cm} = 1,0 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$; стандартное значение комплекса постоянных величин $p_o = 125 \cdot 10^3 \text{ Вт}^2 \cdot \text{ч}/(\text{год} \cdot \text{м}^4 \cdot \text{°C})$; Bi – модифицированный критерий Био, определяемый по выражению

$$Bi = \frac{r_o \cdot \alpha_n}{\lambda_m} . \quad (14)$$

Сравнивая выражение (13) с полученными в работе [4] выражениями, определяющими общие и частные потребительские потенциалы теплоизоляционных материалов в плоских теплоизоляционных конструкциях, можно установить связь между всеми этими показателями

$$p_{m,tr}^* = P_m \cdot \eta_m \cdot m_{tr} = p_m^* \cdot m_{tr} , \quad (15)$$

где P_m – полный потребительский потенциал теплоизоляционного материала в стандартных условиях сопоставления; p_m^* – частный потребительский потенциал теплоизоляционного материала в плоской конструкции; m_{tr} – поправочный коэффициент на цилиндрическую форму теплоизолируемой поверхности трубопровода, определяемый выражением

$$m_{tr} = \left(\frac{\lambda_m \cdot R_{o,cm}}{r_o} \right)^2 \cdot Bi \cdot (Bi - 1) = (\alpha_n \cdot R_{o,cm})^2 \cdot \frac{1}{Bi} \cdot (Bi - 1) , \quad (16)$$

где α_n – коэффициент теплоотдачи с поверхности теплоизоляционного слоя, $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$, расчетное значение которого должно приниматься согласно [9].

На основании вышеизложенного можно констатировать, что частные потребительские потенциалы теплоизоляционных материалов, используемых для теплозащиты трубопроводов $p_{m,tr}^*$, легко определять путем пересчета по формуле (15) с учетом выражений (10) и (16). Для этого необходимо располагать лишь данными о полных потребительских потенциалах соответствующих материалов P_m , которые, согласно [4], легко определяются при стандартных значениях $p_o = 125 \cdot 10^3 \text{ Вт}^2 \cdot \text{ч}/(\text{год} \cdot \text{м}^4 \cdot \text{°C})$ по формуле

$$P_m = \alpha \cdot \frac{c_o}{c_m \cdot \lambda_m} \cdot p_o , \quad (17)$$

α – коэффициент дисконтирования, определяемый по выражению (7).

Установим связь между частным потребительским потенциалом теплоизоляционного материала $p_{m,tr}^*$ и индексом доходности инвестиций в теплозащиту трубопровода.

Согласно [2], индекс доходности инвестиций i_o определяется отношением суммарных дисконтированных результатов к дисконтированным капвложениям, необходимым для достижения этих результатов. Поэтому в данном случае можно записать

$$i_o = \frac{\alpha^* \cdot \Delta I_{zod}}{\beta \cdot \Delta K_m} = \alpha \cdot \frac{\Delta I_{zod}}{\Delta K_m} \cdot \frac{\alpha^*}{\alpha \cdot \beta} = \alpha \frac{\Delta I_{zod}}{\Delta K_m} \cdot \eta_m , \quad (18)$$

где ΔI_{zod} – сокращение годовых эксплуатационных издержек, достигаемое при теплозащите «голового» трубопровода теплоизоляционным слоем конечной толщины, $\text{руб.}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$; ΔK_m – капвложения в теплоизоляционный слой конечной толщины, $\text{руб.}/\text{м}^2$.

Используя выражения (4) и (14), с учетом ранее принятого допущения ($C_o = 0$), получим следующую зависимость между сокращением годовых эксплуатационных издержек ΔI_{zod} и текущим значением формальной переменной x

$$\Delta I_{zod} = I_{(x),zod} - I_{(x=0),zod} = -c_3 \cdot T_{zod}^{n.3} \cdot \Delta t_{zod}^{cp} \cdot \frac{\lambda_m}{r_o} \cdot Bi \cdot \left[\frac{1}{(Bi \cdot x + e^{-x})} - 1 \right]. \quad (19)$$

Используя выражение (5), получим зависимость капложений ΔK в теплоизоляционный слой от формальной переменной x

$$\Delta K_m = K_{m,(x)} - K_{m,(x=0)} = 0,5 \cdot c_m \cdot r_o [e^{2x} - 1]. \quad (20)$$

Подставив выражения (19) и (20) в (18), после преобразований с учетом (13), (15) и (16) можно получить следующую функциональную зависимость между частным потребительским потенциалом теплоизоляционного материала p_m^* , рассчитанным в условиях плоской стенки, и индексом доходности инвестиций i_o , достигающимся при использовании этого материала для теплозащиты трубопроводов

$$i_o = p_m^* \cdot \frac{q}{q_o^*} \cdot \psi_{ycl} \cdot \varepsilon_{tr}, \quad (21)$$

где q/q_o^* – относительное снижение тепловых потерь изолированным трубопроводом, определяемое по выражению (22); ψ_{ycl} – коэффициент учета условий реального эксплуатационного режима трубопровода, определяемый по формуле (23); ε_{tr} – коэффициент снижения доходности инвестиций в теплозащиту трубопроводов, рассчитываемый по формуле (24) с учетом фактической кривизны теплоизоляционного слоя.

Формула для расчета относительного снижения тепловых потерь изолированным трубопроводом, полученная в результате преобразований с использованием выражений (1) и (14), имеет вид

$$\frac{q}{q_o^*} = \frac{1}{(Bi \cdot x + e^{-x})}, \quad (22)$$

где q – удельные теплотери изолированного трубопровода, Вт/м² (Вт/м); q_o^* – удельные теплотери «голого» трубопровода, Вт/м² (Вт/м); x – формальная безразмерная переменная, значения которой, согласно выражению (2), зависят от толщины δ и кривизны r_o теплоизоляционного слоя.

Коэффициент учета условий реального эксплуатационного режима, зависящий от фактической продолжительности периода эксплуатации $T_{zod}^{n.3}$, среднегодовой разности температур Δt_{zod}^{cp} и коэффициента теплоотдачи с поверхности трубопровода α_n , в данном случае определяется выражением

$$\psi_{ycl} = \frac{T_{zod}^{n.3} \cdot \Delta t_{zod}^{cp}}{p_o} \cdot (\alpha_n \cdot R_{o,cm})^2 = 8 \cdot 10^{-6} \cdot T_{zod}^{n.3} \cdot \Delta t_{zod}^{cp} \cdot (\alpha_n \cdot R_{o,cm})^2. \quad (23)$$

Формула для расчета коэффициента снижения доходности инвестиций в криволинейный теплоизоляционный слой, относительно аналогичного показателя, достигаемого при теплозащите плоской стенки, имеет вид

$$\varepsilon_{tr} = 2 \cdot \frac{[(Bi \cdot x + e^{-x}) - 1]}{Bi \cdot (e^{2x} - 1)}. \quad (24)$$

Анализируя выражение (24), понимаем, что величина коэффициента ε_{tr} определяется сочетанием значений двух безразмерных параметров: x и Bi . При этом, согласно выражениям (2) и (14), оба этих параметра, в свою очередь, зависят от кривизны теплоизоляционного слоя, определяющейся радиусом базовой поверхности – r_o . Следовательно, при прочих равных условиях величина ε_{tr} должна существенно зависеть от диаметра трубопровода.

В качестве примера на рис. 1 показаны графики зависимостей коэффициента снижения доходности инвестиций в теплозащиту трубопроводов, построенные на основании расчета по формуле (24).

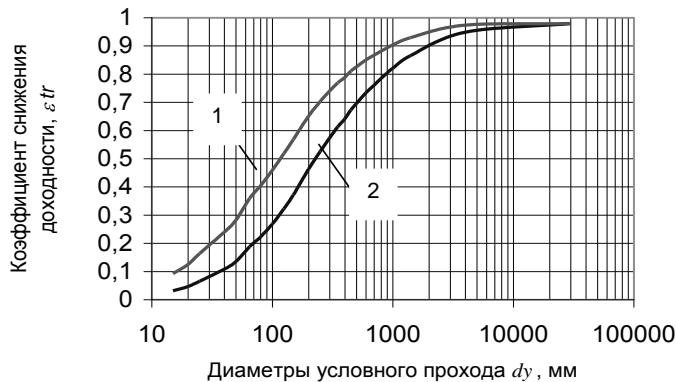


Рис. 1. Изменение коэффициента снижения доходности инвестиций в теплоизоляционный слой заданной толщины для трубопроводов различных диаметров:
 кривая 1 – $\delta_1 = 0,05$ м (при использовании материала с $\lambda_m = 0,03$ Вт/м·°C);
 кривая 2 – $\delta_2 = 0,10$ м (при использовании материала с $\lambda_m = 0,06$ Вт/м·°C)

Целью построения этих графиков является получение наглядного представления о сравнительной экономичности теплозащиты трубопроводов, выполненной из различных теплоизоляционных материалов, отличающихся друг от друга элементарными свойствами (теплопроводностью – λ_m , стоимостью – c_m и долговечностью – T_{cl}^{mat}), но имеющих одинаковые значения частных потребительских потенциалов – p_m^* при теплозащите плоской стенки. Основные характеристики сравниваемых материалов представлены в таблице. Нормативный срок службы трубопроводов принят равным $T_{cl}^{об} = 30$ лет.

Показатели элементарных свойств сравниваемых теплоизоляционных материалов

Материал	λ_m , Вт/м·°C	c_m , руб/м ³	T_{cl}^{mat} , лет	α , лет	β	P_m	η	p_m^*
1	0,03	2962	35	16,374	1	12,616	0,93882	11,844
2	0,06	1000	15	10,380	1,481	11,844	1,0	11,844

Примечание. При расчете полного и частного потребительских потенциалов теплоизоляционных материалов использовались значения: $\alpha^* = 15,373$ лет; $c_3 = 547,7$ руб./(МВт·ч); $p_0 = 125 \cdot 10^3$ Вт²·ч/(год·м⁴·°C).

На рис. 1 кривая 1 соответствует материалу 1, имеющему наименьшую теплопроводность, а кривая 2 – материалу 2 с теплопроводностью, в 2 раза большей. Поэтому, исходя из принципа обеспечения одинакового сопротивления теплопередаче сравниваемых теплоизоляционных слоев ($\delta/\lambda_m = \text{const}$ при $d_y \rightarrow \infty$), толщина теплоизоляционного слоя второго материала при построении графиков рис. 1 выбрана в 2 раза большей, по сравнению с первым ($\delta_2 = 2\delta_1$). Значение коэффициента теплоотдачи от наружной поверхности к воздуху в обоих рассмотренных случаях было принято одинаковым $\alpha_n = 8$ Вт/(м²·°C).

Анализ представленных графиков совместно с выражением (21) убедительно доказывает, что в случае использования для теплозащиты трубопроводов теплоизоляционных материалов, характеризующихся одинаковыми значениями частных потребительских потенциалов в плоских конструкциях ($p_m^* = \text{const}$), но различающихся теплопроводностью, наибольший индекс доходности (при любом заданном $\psi_{усл} = \text{const}$) всегда будет соответствовать теплоизоляционному материалу с наименьшей теплопроводностью. Это значит, что, в отличие

от плоских стенок, для которых индекс доходности инвестиций в теплозащиту зависит только от величины частного потребительского потенциала теплоизоляционного материала p_m^* [4], значение индекса доходности инвестиций в теплозащиту трубопроводов является функцией двух независимых переменных

$$i_d = f(p_m^*; \varepsilon_{tr}). \quad (25)$$

В этом состоит кардинальное различие принципов выбора теплоизоляционных материалов, предназначенных для теплозащиты трубопроводов и плоских поверхностей оборудования.

Полученное выше выражение (21) дает обобщенное представление о характере зависимости между индексом доходности инвестиций в теплозащиту и потребительскими потенциалами теплоизоляционных материалов при теплозащите плоских стенок и цилиндрических поверхностей заданной кривизны. Графики, показанные на рис. 1, свидетельствуют о том, что с увеличением диаметра трубопровода коэффициент снижения доходности ε_{tr} , зависящий от кривизны теплоизоляционного слоя, асимптотически приближается к единице. Хорошо видно, что при $d_y \geq 2$ м влияние кривизны становится очень незначительным, что дает возможность использования закономерностей плоской стенки в технико-экономических расчетах теплозащиты цилиндрических поверхностей большого диаметра. При диаметрах трубопроводов $d_y < 2$ м пренебрегать значением коэффициента ε_{tr} нельзя.

Необходимо понимать, что графики рис. 1, построенные для условий данного конкретного примера (при единой толщине теплоизоляционного слоя трубопроводов разных диаметров, зависящей только от теплопроводности используемого материала), носят чисто иллюстративный характер. Они подтверждают лишь факт снижения доходности инвестиций в теплозащиту с уменьшением диаметра трубопровода. При решении же любых реальных задач, связанных с оценкой экономичности теплозащиты трубопроводов, величина коэффициента снижения доходности ε_{tr} должна определяться расчетом по выражению (24) в зависимости от значений x и Bi , имеющих место в конкретно рассматриваемом случае.

Однако, если толщина теплоизоляционного слоя трубопровода δ не известна (то есть, не задана условиями задачи, как при построении графиков рис.1), получить значение формальной переменной x прямым расчетом по формуле (2) не представляется возможным. В этом случае для получения значений x может быть использована процедура итерационного расчета по уравнению (22).

Так, например, СНиПом [7] установлены нормативные значения удельного теплового потока с единицы длины изолированного трубопровода q_{req} , Вт/м, зависящие от диаметра d_y и температуры транспортируемой среды t , °С. При тех же параметрах d_y и t можно рассчитать удельный тепловой поток q_o^* , Вт/м, с одного метра длины неизолированного трубопровода

$$q_o^* = \pi \cdot d_n \cdot \alpha_n \cdot (t - t_{окр}), \quad (26)$$

где d_n – наружный диаметр неизолированного трубопровода, м; $t_{окр}$ – средняя температура окружающей среды, °С.

После этого, приняв $r_o = d_n/2$ и определив по формуле (14) значение Bi , соответствующее теплопроводности выбранного теплоизоляционного материала, можно путем итерационного расчета по уравнению (22) легко найти соответствующие нормативным требованиям значения формальной переменной x . Затем, подставив значения x и Bi в выражение (24), можно определить фактическое значение коэффициента снижения доходности ε_{tr} , соответствующее случаю нормативной теплозащиты трубопровода с использованием данного теплоизоляционного материала. Результирующее значение индекса доходности нормативной теплозащиты при этом легко определить с учетом величины частного потребительского потенциала выбранного материала, p_m^* , по выражению (21).

В качестве примера на рис. 2 приведены рассчитанные по предлагаемой методике графики изменения индексов доходности инвестиций в нормативную теплозащиту трубопроводов с температурой транспортируемой среды $t = 100^\circ\text{C}$ при использовании теплоизоляционных материалов, характеристики которых были представлены ранее в таблице.

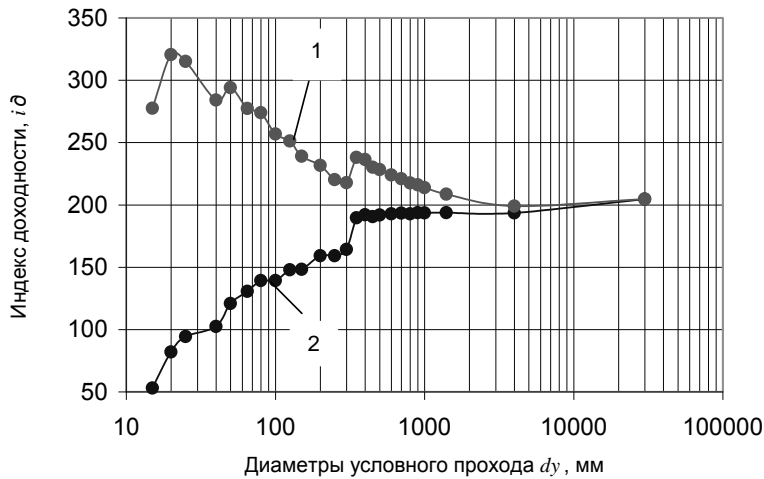


Рис. 2. Изменение индекса доходности нормативной теплозащиты для трубопроводов различных диаметров:
 кривая 1 – материал 1 ($\lambda_m = 0,03 \text{ Вт/м}\cdot^\circ\text{C}$; $p_m^* = 11,844$);
 кривая 2 – материал 2 ($\lambda_m = 0,06 \text{ Вт/м}\cdot^\circ\text{C}$; $p_m^* = 11,844$)

Анализируя графики рис. 2, видим, что при минимальном диаметре труб ($d_y = 15 \text{ мм}$) выбор материала 1, имеющего меньшую теплопроводность, дает возможность получить значение индекса доходности инвестиций, почти в 5 раз большее того, которое в тех же условиях способен обеспечить материал 2 при соблюдении нормативных значений теплового потока. Однако с ростом диаметра и уменьшением кривизны теплоизолируемой поверхности индексы доходности инвестиций в теплозащиту трубопроводов, определяемые сходящимися кривыми 1 и 2, стремятся к одному и тому же значению. Это объясняется тем, что в рассмотренном примере частные потребительские потенциалы, определяющие доходность теплозащиты при использовании выбранных для сравнения материалов в плоских конструкциях, были приняты одинаковыми по условию задачи.

Рассмотренный пример является частным. В действительности почти всегда приходится иметь дело с теплоизоляционными материалами, имеющими не только разные коэффициенты теплопроводности – λ_m , но и разные потребительские потенциалы – p_m^* . Причем, как правило, более долговечные материалы с меньшими коэффициентами теплопроводности более дороги и, в связи с этим, имеют гораздо более низкие потребительские потенциалы. В качестве примера на рис. 3 приведены построенные по изложенной выше методике графики изменения индексов доходности инвестиций в нормативную теплозащиту при использовании теплоизоляционных материалов, имеющих разные значения частных потребительских потенциалов в плоских конструкциях. Расчеты выполнены при $t = 100^\circ\text{C}$.

Анализируя графики рис. 3, видим, что для теплозащиты трубопроводов с диаметрами условного прохода от 15 до 200 мм экономически целесообразным является выбор материала 1, так как этот материал в рассматриваемом случае способен обеспечить более высокий индекс доходности. По этим же причинам для теплозащиты плоских поверхностей и трубопроводов

большого диаметра ($d_y > 300$ мм) экономически целесообразным является выбор материала 2. В интервале изменения диаметров от 200 до 300 мм оба материала равноэкономичны.

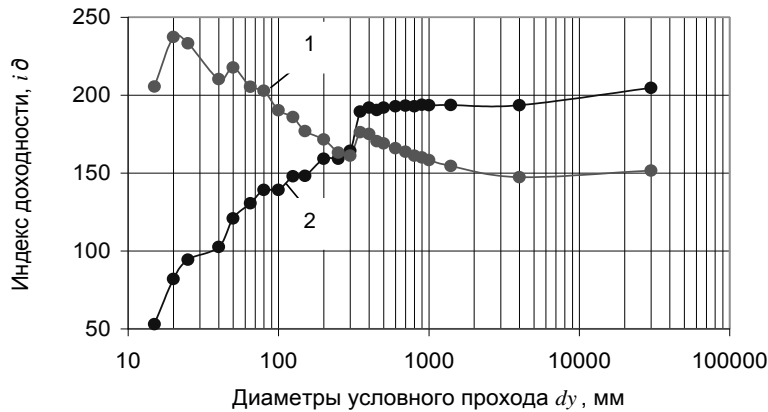


Рис. 3. Изменение индексов доходности нормативной теплозащиты:
 кривая 1 – материал 1 ($\lambda_m = 0,03$ Вт/м·°С; $p_m^* = 8,770$);
 кривая 2 – материал 2 ($\lambda_m = 0,06$ Вт/м·°С; $p_m^* = 11,844$)

Таким образом, приведенный пример убедительно доказывает, что, в отличие от плоских конструкций, использование теплоизоляционных материалов с наивысшими значениями частных потребительских потенциалов ($p_m^* = \max$) для теплозащиты трубопроводов не всегда обеспечивает достижение максимальной доходности принимаемых инженерных решений. При проектировании теплозащиты для трубопроводов малых диаметров наибольшая экономическая эффективность в ряде случаев может достигаться при использовании материалов с минимальной теплопроводностью, частные потребительские потенциалы которых из-за высокой стоимости не имеют максимальных значений.

Индекс доходности является относительным показателем эффективности инвестиций. Показателем абсолютной экономической эффективности любых инвестиционных проектов, согласно [2], является интегральный эффект, $\mathcal{E}_{инт}$, руб.

$$\mathcal{E}_{инт} = \alpha^* \cdot \Delta I_{год} - \beta \cdot \Delta K. \quad (27)$$

Как было показано ранее, для оценки интегральной эффективности конкурирующих вариантов теплозащиты вместо интегрального эффекта гораздо удобнее использовать рассчитываемый по его величине коэффициент интегральной эффективности теплозащиты $\eta_{инт}$, который является безразмерным технико-экономическим показателем, изменяющимся в интервале от 0 до 1, и определяется выражением

$$\eta_{инт} = \frac{\mathcal{E}_{инт}}{\alpha^* \cdot I_{год}^*}, \quad (28)$$

где $I_{год}^*$ – годовые эксплуатационные издержки базового варианта, руб./год, равные стоимости теплоты, потерянной неизолированным трубопроводом за год, и определяемые как

$$I_{год}^* = c_{\varepsilon} \cdot q_0^* \cdot T_{год}^{n_{\varepsilon}}. \quad (29)$$

Эксплуатационные издержки базового варианта, как и весь знаменатель выражения (28), в каждом конкретном случае определяются особенностями теплоизолируемого объекта и внешними условиями, а значит, являются постоянными величинами, не зависящими ни от параметров теплозащиты, ни от выбранного теплоизоляционного материала. Поэтому между

интегральным эффектом $\mathcal{E}_{инт}$ и коэффициентом $\eta_{инт}$ существует жесткая функциональная связь, позволяющая использовать численные значения $\eta_{инт}$ для однозначной количественной оценки экономической эффективности конкурирующих вариантов теплозащиты.

В результате подстановки выражения (27) в (28) и математических преобразований с учетом (18) можно получить следующую обобщенную формулу для расчета коэффициента интегральной эффективности, $\eta_{инт}$, справедливую для любых вариантов теплозащиты и поверхностей любой формы

$$\eta_{инт} = \frac{\mathcal{E}_{инт}}{\alpha^* \cdot I_{20\delta}^*} = \frac{\Delta I_{20\delta}}{I_{20\delta}^*} \left(1 - \frac{\beta \cdot \Delta K}{\alpha^* \cdot \Delta I_{20\delta}} \right) = \left(1 - \frac{q}{q_o^*} \right) \cdot \left(1 - \frac{1}{i_o} \right). \quad (30)$$

Подставляя в выражение (30) установленные СНиПом [7] нормативные значения q , а также рассчитанные по формуле (26) значения тепловых потерь неизолированных трубопроводов – q_o^* совместно с индексами доходности, соответствующими полученным отношениям q/q_o^* , можно легко определять числовые значения коэффициентов интегральной эффективности нормативной теплозащиты трубопроводов различных диаметров при использовании различных теплоизоляционных материалов.

В качестве примера на рис. 4 представлены построенные таким образом графики изменения интегральной эффективности нормативной теплозащиты трубопроводов. Расчеты выполнены при температуре теплоносителя $t = 100^\circ\text{C}$.

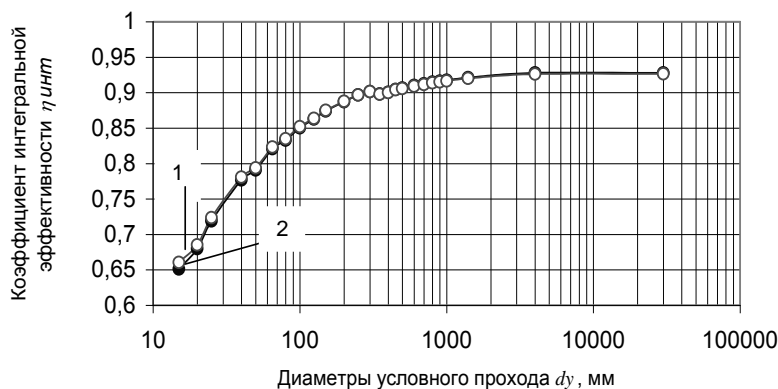


Рис. 4. Зависимости коэффициентов интегральной эффективности нормативной теплозащиты от диаметра трубопроводов:
 кривая 1 – материал 1 ($\lambda_m = 0,03$ Вт/м·°С; $p_m^* = 8,770$);
 кривая 2 – материал 2 ($\lambda_m = 0,06$ Вт/м·°С; $p_m^* = 11,844$)

Кривые 1 и 2 этих графиков соответствуют тем же двум материалам, для которых ранее были построены графики изменения индексов доходности, показанные на рис.3. Анализируя графики рис. 4, можно сделать вывод о том, что интегральная эффективность нормативной теплозащиты снижается с уменьшением диаметра трубопроводов. Кроме того, хорошо видно, что при всех стандартных значениях d_y кривые 1 и 2 практически совпадают друг с другом, а значит, величина интегрального эффекта нормативной теплозащиты трубопроводов в данном случае мало зависит от выбора теплоизоляционного материала и может считаться постоянной для трубопровода заданного диаметра.

Для проверки этого факта был выполнен многовариантный расчет интегральной эффективности нормативной теплозащиты при различных комбинациях параметров p_m^* , λ_m и

различных температурах теплоносителя t . В результате выполненного расчета было подтверждено, что коэффициенты интегральной эффективности нормативной теплозащиты, $\eta_{\text{инт}}^{\text{req}}$, практически не зависят от вида теплоизоляционных материалов и с достаточной точностью могут считаться постоянными для трубопроводов заданного диаметра, транспортирующих теплоноситель с заданной средней температурой.

Объяснением этому может служить тот факт, что при высоких индексах доходности $i_d \geq 50$ числовое значение второго сомножителя в выражении (30), не может отличаться от единицы более, чем на 2%. Это значит, что при индексах доходности $i_d \geq 50$ коэффициент интегральной эффективности нормативной теплозащиты трубопроводов с достаточной точностью можно определять по формуле (30) без учета второго сомножителя, то есть

$$\eta_{\text{инт}}^{\text{req}} = \left(1 - \frac{q_{\text{req}}}{q_o^*}\right), \text{ при } i_d \geq 50. \quad (31)$$

Входящие в выражение (31) нормативные значения удельного теплового потока $-q_{\text{req}}$, Вт/м, установленные [7], так же как и удельные линейные теплопотери неизолированного трубопровода $-q_o^*$, Вт/м, рассчитываемые по формуле (26), не зависят от вида теплоизоляционного материала. Как показывают расчеты, численные значения индексов доходности нормативной теплозащиты трубопроводов в большинстве случаев превышают 50. Поэтому коэффициент интегральной эффективности нормативной теплозащиты $\eta_{\text{инт}}^{\text{req}}$ с достаточной точностью можно считать параметром, не зависящим от вида теплоизоляционного материала.

Согласно [2], выбор наилучшего варианта при одинаковой интегральной эффективности конкурирующих проектных решений должен производиться по величине индекса доходности. С учетом всего вышеизложенного можно констатировать, что главным критерием выбора наиболее экономичного теплоизоляционного материала при устройстве нормативной теплозащиты трубопроводов должен быть индекс доходности инвестиций.

Иначе обстоит дело с оптимальной теплозащитой. Общие принципы и методика оптимизации теплозащиты наружных трубопроводов подробно изложены в работе [5], а трубопроводов, проложенных в каналах, – в работе [6]. Как в том, так и в другом случае, первичным результатом оптимизационных расчетов является определение оптимальных значений безразмерной формальной переменной x_{opt} при использовании ряда заданных теплоизоляционных материалов. Располагая полученными значениями x_{opt} , а также величиной модифицированного критерия Vi , рассчитанной по выражению (14), по формуле (22) можно вычислить отношение удельных тепловых потоков q_{opt}/q_o^* , соответствующее оптимальным для каждого материала параметрам теплозащиты. Затем по формулам (23), (24), (21) и (30) можно определить значения показателей $\epsilon_{\text{лр}}$, $\psi_{\text{усл}}$, i_d и $\eta_{\text{инт}}^{\text{opt}}$, которые будут иметь место при реализации этих оптимальных параметров.

В качестве примера на рис. 5 и 6 представлены рассчитанные по изложенной выше методике графики зависимостей индексов доходности $-i_d$ и коэффициентов интегральной эффективности оптимальной теплозащиты $-\eta_{\text{инт}}^{\text{opt}}$ от диаметра наружных трубопроводов $-d_y$ при использовании тех же теплоизоляционных материалов, результаты сравнения которых уже были представлены ранее на графиках рис. 3 и 4, применительно к случаю нормативной теплозащиты.

Сравнивая графики рис. 5 и 6, построенные для случая оптимальной теплозащиты, с аналогичными графиками рис. 3 и 4, иллюстрирующими случай нормативной теплозащиты, можно убедиться в том, что при оптимальной теплозащите от вида теплоизоляционного материала зависят не только индексы доходности $-i_d$, но также и коэффициенты интегральной эффективности $-\eta_{\text{инт}}$. Поэтому, согласно приоритетам, установленным [2], выбор наиболее рационального материала при оптимальной теплозащите должен осуществляться по максимуму интегрального эффекта.

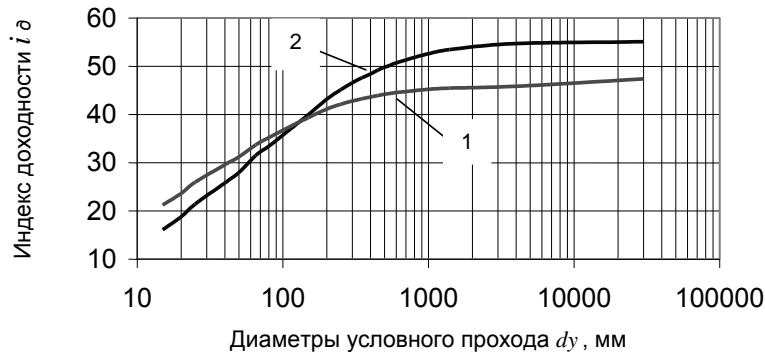


Рис. 5. Изменение индексов доходности оптимальной теплозащиты:
 кривая 1 – материал 1 ($\lambda_m = 0,03$ Вт/м·°С; $\rho_m^* = 8,770$);
 кривая 2 – материал 2 ($\lambda_m = 0,06$ Вт/м·°С; $\rho_m^* = 11,844$)

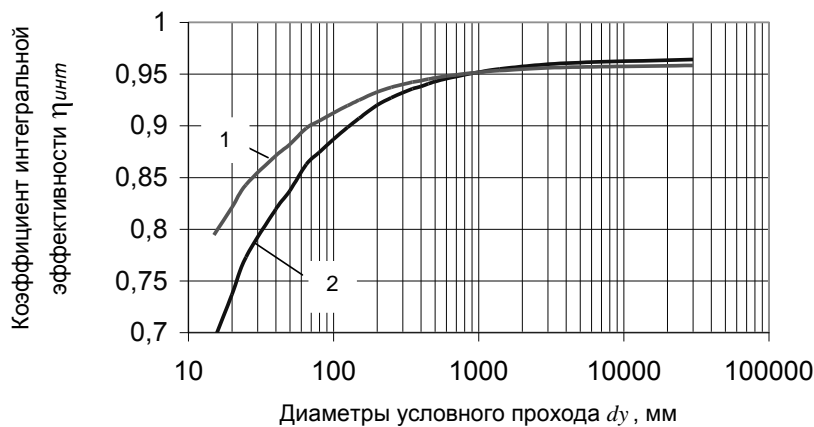


Рис. 6. Зависимости коэффициентов интегральной эффективности оптимальной теплозащиты от диаметра трубопроводов:
 кривая 1 – материал 1 ($\lambda_m = 0,03$ Вт/м·°С; $\rho_m^* = 8,770$);
 кривая 2 – материал 2 ($\lambda_m = 0,06$ Вт/м·°С; $\rho_m^* = 11,844$)

Применительно к условиям рассмотренного примера это означает расширение диапазона диаметров трубопровода, для которых экономически эффективным будет неэкономичный для использования в плоских конструкциях (из-за более низкого потребительского потенциала) материал 1, имеющий меньшую теплопроводность. Из представленных графиков видно, что в данном случае указанный диапазон увеличился с 250 мм – при нормативной, до 1000 мм – при оптимальной теплозащите.

Приведенные примеры убедительно доказывают преимущества предлагаемой универсальной методики сопоставления и выбора теплоизоляционных материалов, основанной на комплексной оценке потребительских потенциалов этих материалов в плоских конструкциях и определении результирующих индексов доходности и коэффициентов интегральной эффективности теплозащиты, которые могут быть достигнуты при использовании этих же материалов для теплозащиты трубопроводов. Практическое использование данной методики

позволит достигать наибольшего экономического эффекта от устройства теплозащиты любых объектов в каждом конкретном случае.

Выводы

1. В качестве критериев для совокупной оценки эффективности теплоизоляционных материалов предложено использовать полный и частный потребительские потенциалы, объединяющие в себе комплекс единичных свойств (теплопроводность, стоимость, долговечность), влияющих на технико-экономические характеристики теплозащиты. Получены выражения для расчета этих критериев применительно к случаю теплозащиты трубопроводов.

2. Обоснован универсальный относительный показатель, названный коэффициентом интегральной эффективности теплозащиты, который удобен для оценки результирующей технико-экономической эффективности конкурирующих вариантов любых проектируемых теплоизоляционных конструкций.

3. Получены аналитические зависимости, связывающие коэффициент интегральной эффективности и индексы доходности теплозащиты с потребительскими потенциалами теплоизоляционных материалов при теплозащите плоских и цилиндрических поверхностей.

4. Разработана универсальная методика сопоставления и выбора теплоизоляционных материалов, позволяющая достигать наибольшего экономического эффекта от устройства теплозащиты трубопроводов в каждом конкретном случае

ЛИТЕРАТУРА

1. Семенов Б.А. Нестационарная теплопередача и эффективность теплозащиты ограждающих конструкций зданий / Б.А. Семенов. Саратов: СГТУ, 1996. 176 с.

2. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов и их отбору для финансирования. Официальное издание / Утверждено: Госстрой России № 7-12/47. М.: Информэлектро, 1994. 78 с.

3. Фишер С. Экономика / С. Фишер, Р. Дорнбуш, Р. Шмалензи; пер. с англ. М.: Дело, 1993. 828 с.

4. Ивашенко Ю.Г. Критерии технико-экономической оценки потенциальной эффективности теплоизоляционных материалов с учетом их долговечности / Ю.Г. Ивашенко, Б.А. Семенов, Г.Г. Старостин // Известия вузов. Строительство. 2004. № 2. С. 32-38.

5. Семенов Б.А. Техничко-экономическая оптимизация теплозащиты наружных трубопроводов тепловых сетей / Б.А. Семенов, О.П. Хомякова // Известия вузов. Проблемы энергетика. 2006. № 3-4. С. 61-71.

6. Семенов Б.А. Оптимизация теплозащиты трубопроводов двухтрубных тепловых сетей при подземной канальной прокладке / Б.А. Семенов, О.П. Хомякова // Вопросы совершенствования систем теплогасоснабжения и вентиляции: межвуз. науч. сб. Саратов: СГТУ, 2002. С. 40-48.

7. СНиП 41-03-2003. Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов. Издание официальное. М.: Госстрой России, ФГУП ЦПП, 2004. 26 с.

8. Семенов Б.А. Принципы эффективной теплозащиты трубопроводов и оборудования / Б.А. Семенов, О.П. Хомякова // Проблемы рационального использования топливно-энергетических ресурсов и энергосбережения: сб. науч. трудов. Саратов: СГТУ, 2006. С. 55-69.

9. СП 41-103-2000. Проектирование тепловой изоляции оборудования и трубопроводов. Издание официальное. М.: Госстрой России, ФГУП ЦПП, 2001. 42 с.

Семенов Борис Александрович –

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Промышленная теплотехника» Саратовского государственного технического университета

Хомякова Ольга Павловна –

соискатель кафедры «Промышленная теплотехника»
Саратовского государственного технического университета

Статья поступила в редакцию 12.07.07, принята к опубликованию 05.12.07

УДК 533.601

Ю.Л. Леухин, Э.Н. Сабуров, И. А. Усачев

ОСОБЕННОСТИ ОБТЕКАНИЯ ЗАГОТОВКИ, СМЕЩЕННОЙ С ОСИ РАБОЧЕГО ОБЪЕМА ЦИКЛОННОГО НАГРЕВАТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА

Приводятся и анализируются особенности гидродинамического взаимодействия закрученного потока в циклонном нагревательном устройстве с заготовками различного диаметра, смещенными с его аэродинамической оси.

Yu.L. Leukhin, E.N. Saburov, I.A. Usatchov

FEATURES OF THE STREAM FLOWING ROUND PREPARATION DISPLACED FROM THE AXIS WORKING VOLUME OF THE CYCLONIC HEATING DEVICE

Physical features of hydrodynamic interaction of the twirled stream in the cyclonic heating device with the preparations of various diameter displaced from its aerodynamic axis are studied and analyzed in this article.

Введение

Широкое применение циклонных нагревательных устройств в машиностроительной промышленности объясняется в первую очередь универсальностью, благодаря которой можно обрабатывать разные по форме и габаритам детали или заготовки по сложным температурным режимам [1]. В одних случаях это могут быть крупные части энергетического оборудования (роторы, валы турбин и др.), а в другом – группа (садка) заготовок небольшого диаметра, расположенных осесимметрично в рабочем объеме печи. В циклонных нагревательных устройствах обеспечивается значительная интенсификация конвективного теплообмена к заготовкам за счет особой организации движения греющего потока у их поверхности. Как показали исследования [2, 3], обтекание и теплоотдача круглых заготовок, смещенных с аэродинамической оси закрученного греющего потока, зависят от совокупного влияния их диаметра, длины, величины смещения, геометрических параметров циклонного устройства и т.д. Несимметричность формирования пограничных слоев и особенности их отрыва с поверхности заготовок, интенсивные трехмерные вихревые течения, возникающие при этом, высокая турбулентность потока и неравномерное распределение ее характеристик по радиусу, определяют различие интенсивности теплоотдачи в характерных точках и участках поверхности заготовки.

Рассматриваемая задача представляет как теоретический, так и практический интерес с точки зрения дальнейшего изучения аэродинамики вертикальных циклонных нагревательных устройств для группового нагрева заготовок, а также совершенствования методик их теплового и аэродинамического расчетов.

Методика исследования

Опыты выполнены на стенде (рис. 1) по методике, подробное описание которой приведено в работе [4]. Модель нагревательного устройства – циклонная камера имела внутренний диаметр $D_k = 2R_k = 179$ мм и длину $L_k = 272$ мм. Подвод воздуха в камеру осуществлялся тангенциально внутренней поверхности с двух диаметрально противоположных сторон через каналы с высотой $h_{ex} = 13$ мм и длиной (размер по образующей) $l_{ex} = 40$ мм. Безразмерная суммарная площадь входа потока $\bar{f}_{ex} = 4f_{ex}/\pi D_k^2$ равнялась $4,13 \cdot 10^{-2}$. Отвод воздуха из циклонной камеры производился через осесимметричное с рабочим объемом отверстие в верхнем торце с относительным диаметром $\bar{d}_{вых} = d_{вых}/D_k$, равным 0,4.

Нагреваемые заготовки имитировались сплошными цилиндрами из фторопласта, имели длину 231,5 мм и диаметр $d = 31$ и 61,5 мм, что соответствовало параметру $\bar{d} = d/D_k = 0,173$ и 0,344. Торцы цилиндров отстояли от торцов камеры на расстоянии 23 мм. Величина относительного смещения $\bar{e} = e/R_k$ цилиндра с относительным диаметром $\bar{d} = 0,344$ равнялась 0,034; 0,067; 0,101; 0,134; 0,190 (3, 6, 9, 12 и 17 мм), а для $\bar{d} = 0,173-0,190$ и 0,324 (17 и 29 мм).

Распределения осредненных и пульсационных значений тангенциальной и осевой составляющих вектора скорости исследовались двухлучевым лазерным доплеровским анемометром¹ в среднем поперечном сечении циклонной камеры при $\bar{z} = 0,670$ ($\bar{z} = z/D_k$ – безразмерная координата, совпадающая с осью камеры и отсчитываемая от ее глухого торца).

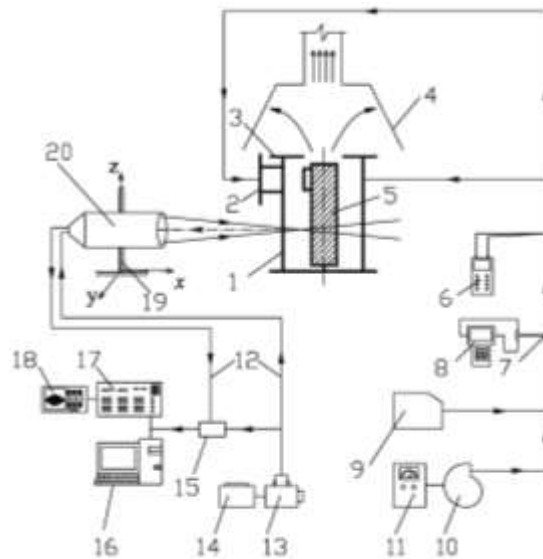


Рис. 1. Схема аэродинамического стенда: 1 – циклонная камера; 2 – входной канал; 3 – выходной торец; 4 – вытяжной зонт; 5 – цилиндр; 6 – цифровой термометр; 7 – трубка Пито-Прандтля; 8 – цифровой микроанометр; 9 – генератор тумана; 10 – воздуходувка; 11 – блок управления напряжением воздуходувки; 12 – волоконные световоды; 13 – оптический коммутатор; 14 – лазер; 15 – фотомультиплекейер; 16 – компьютер; 17 – контроллер–счетчик; 18 – осциллограф; 19 – система перемещения зонда; 20 – оптический зонд

¹ Опыты выполнены в Университете прикладных наук, г. Эмден (Германия). В создании экспериментального стенда и отработке методики измерений активное участие принимал профессор В. Гарен.

Результаты и обсуждение

Даже при сравнительно небольшом смещении цилиндра с диаметром $\bar{d} = 0,344$ ($\bar{e} = 0,034$) с оси циклонной камеры происходит нарушение равномерности его обтекания закрученным потоком. Изменение безразмерного радиуса $\bar{r}_{\varphi m} = r_{\varphi m}/R_k$, характеризующего положение максимума тангенциальной составляющей полной скорости $\bar{w}_{\varphi m} = w_{\varphi m}/V_{ex}$ (V_{ex} – средняя скорость воздуха во входном канале), качественно напоминает синусоиду с максимумом в точке $\varphi = 0^\circ$ (φ – угол с вершиной на оси камеры, отсчитываемый в направлении движения потока от радиуса, по которому происходит смещение цилиндра), минимумом при $\varphi = 180^\circ$ и амплитудой, равной величине смещения цилиндра (рис. 2). Поток как бы концентрируется вокруг цилиндра и перемещается за ним.

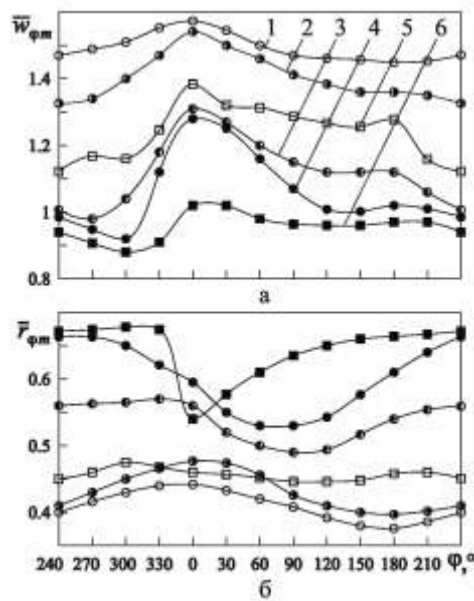


Рис. 2. Изменение $\bar{w}_{\varphi m}$ (а) и $\bar{r}_{\varphi m}$ (б) по периметру поперечного сечения циклонной камеры при различных смещениях цилиндра с ее оси: 1 – $\bar{e} = 0,034$; 2 – $0,067$; 3 – $0,134$; 4 – $0,190$ при $\bar{d} = 0,344$; 5 – $\bar{e} = 0,190$; 6 – $0,324$ при $\bar{d} = 0,173$

При $\bar{e} \geq 0,067$ смещение цилиндра с оси закрученного потока приводит к нарушению устойчивости течения у его поверхности. При всех исследованных расположениях цилиндра максимальное в поперечном сечении значение $\bar{w}_{\varphi m}$ находится при $\varphi = 0^\circ$, а минимальное $\bar{r}_{\varphi m}$ с увеличением \bar{e} перемещается от $\varphi = 180^\circ$ в сторону меньших углов. Смещенный с аэродинамической оси цилиндр и боковая поверхность рабочего объема циклонной камеры образуют по направлению движения замкнутый криволинейный канал потока переменного сечения (типа конфузур – диффузур – конфузур и т.д.).

На рис. 3 приведены распределения безразмерной тангенциальной скорости ($\bar{w}_\varphi = w_\varphi/V_{ex}$), линий тока, а также изотех тангенциальной и осевой ($\bar{w}_z = w_z/V_{ex}$) скоростей при обтекании цилиндра $\bar{d} = 0,344$ при $\bar{e} = 0,034$ (φ_d – угол, отсчитываемый в поперечном сечении камеры от линии смещения цилиндра, с вершиной на его оси). По мере перемеще-

ния потока в конфузурной части течения и приближения его к наиболее стесненному проходному сечению $\varphi = 0^\circ$ происходит увеличение уровня тангенциальных скоростей, перестройка их профиля. Максимум \bar{w}_φ приближается к поверхности цилиндра и увеличивается по величине. Поток перемещается здесь под влиянием отрицательного градиента давления, способствующего его разгону. В диффузорной части поперечного сечения ($\varphi > 0^\circ$), положительный градиент давления препятствует продвижению потока у поверхности цилиндра и приводит к его отрыву в окрестности точки 2. Практически во всей диффузорной зоне течения у поверхности цилиндра наблюдается попятное движение газа. Существование этого течения обусловлено главным образом общей перестройкой циклонного потока в связи со смещением цилиндра с его аэродинамической оси. В результате образуется значительная по размерам вихревая область (вихрь), размеры которой возрастают с увеличением \bar{e} . О размерах вихря можно судить по положению нулевой линии тока, соединяющей точки 1 и 2.

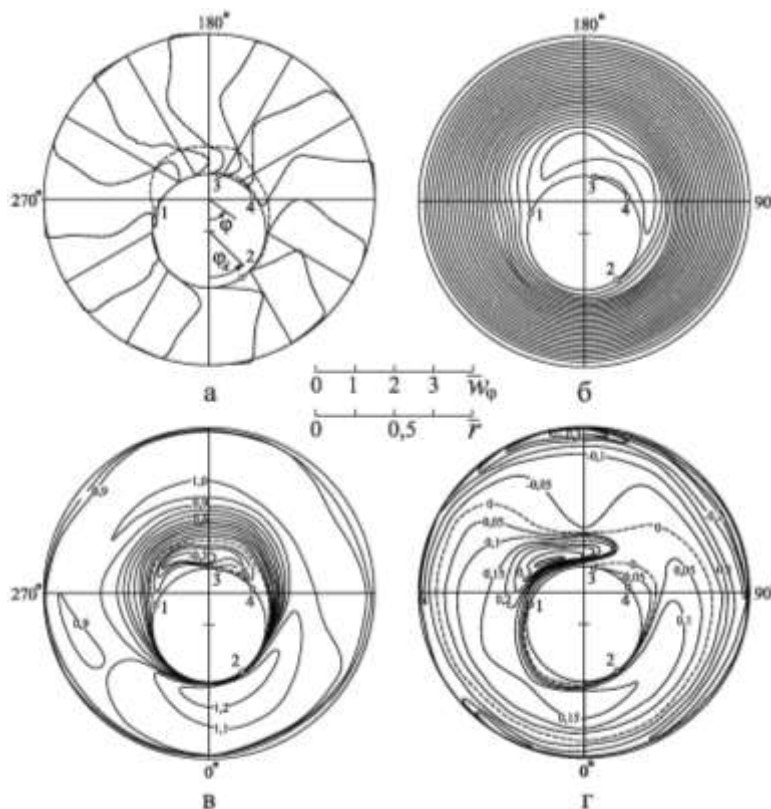


Рис. 3. Распределения тангенциальной скорости, линий тока, изотак тангенциальной и осевой скоростей ($\bar{d} = 0,344$; $\bar{e} = 0,190$)

Граница разделения прямого и обратного течений в вихре (изотаха нулевого значения тангенциальной скорости) на рис. 3, в показана штриховой линией и берет начало в окрестности точки 1. Попятный поток, в свою очередь, срывается с поверхности цилиндра около точки 3. Между точками 3 и 4 расположена область сравнительно небольшого обратного течения, по направлению совпадающего с основным циклонным. В результате вероятно возникновение небольшой вихревой циркуляционной зоны. У поверхности цилиндра от точки 4

поток перемещается в направлении точки 2. Особую роль с точки зрения анализа обтекания цилиндра и теплоотдачи играют две характерные точки его поверхности: передняя 1 (лобовая), расположенная в месте разделения набегающего на цилиндр потока при $\varphi_d \approx 250^\circ$ – начальная точка натекания циклонного потока, практически определяющая начало конфузорной зоны течения, и задняя (кормовая) 2 при $\varphi_d \approx 35^\circ$ – точка стока.

Распределения изотак осевой скорости (рис. 3, г) показывают, что в вихре наблюдается интенсивный сток газа в направлении выходного отверстия. Осевые скорости в этой области соизмеримы с тангенциальными. Характер изменения изотак \bar{w}_z в остальной части поперечного сечения также является сложным и неосесимметричным.

На рис. 4 приведены распределения тангенциальной скорости и линий тока, а на рис. 5 – изотак \bar{w}_φ и \bar{w}_z для цилиндра с диаметром $\bar{d} = 0,173$ при $\bar{e} = 0,190$ и $0,324$. Характер обтекания цилиндра $\bar{d} = 0,173$ при $\bar{e} = 0,190$, качественно соответствует обтеканию цилиндра $\bar{d} = 0,344$ при том же смещении. Несмотря на значительные изменения $\bar{w}_{\varphi m}$ в поперечном сечении камеры $\bar{r}_{\varphi m}$ меняется незначительно (рис. 2). При данном смещении цилиндр располагается в области слабоинтенсивного индуцированного вращения потока.

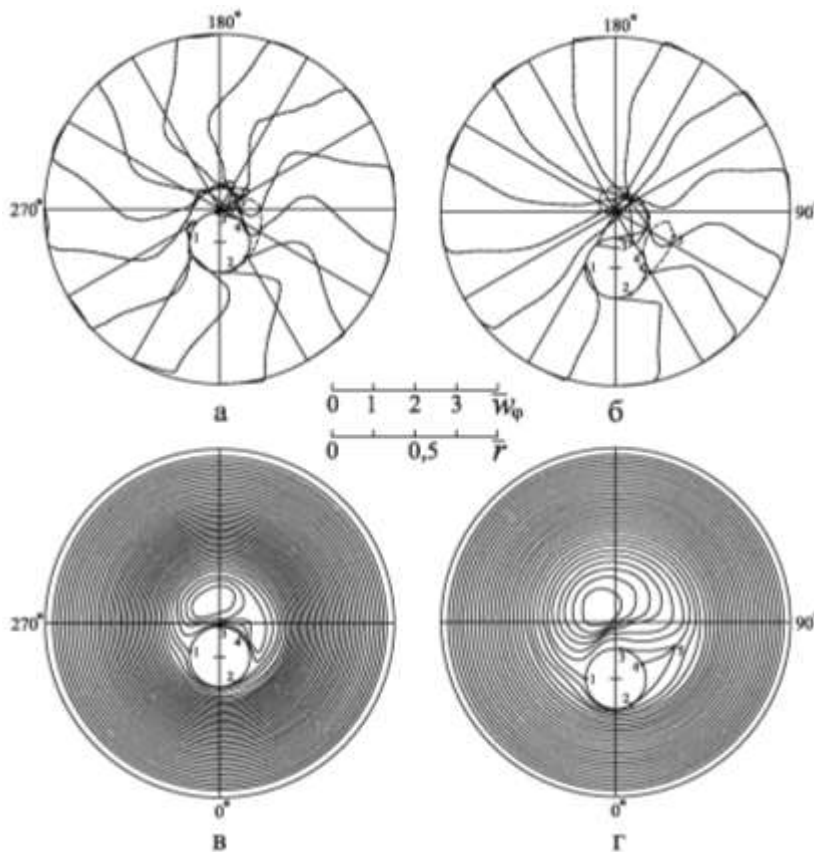


Рис. 4. Распределения \bar{w}_φ (а, б) и линий тока (в, г) при обтекании цилиндра $\bar{d} = 0,173$ ($\bar{e} = 0,190$ и $0,324$)

Величина диаметра, описывающего цилиндр из центра циклонной камеры, практически равняется диаметру, разделяющему области свободного и сконцентрированного вращательного движения потока в загруженной циклонной камере [3]. Циклонный поток как бы сосредоточен вокруг описывающего диаметра. Лобовая точка находится при $\varphi_d \approx 260^\circ$, а точки 2 и 3 соответственно при 30° и 180° .

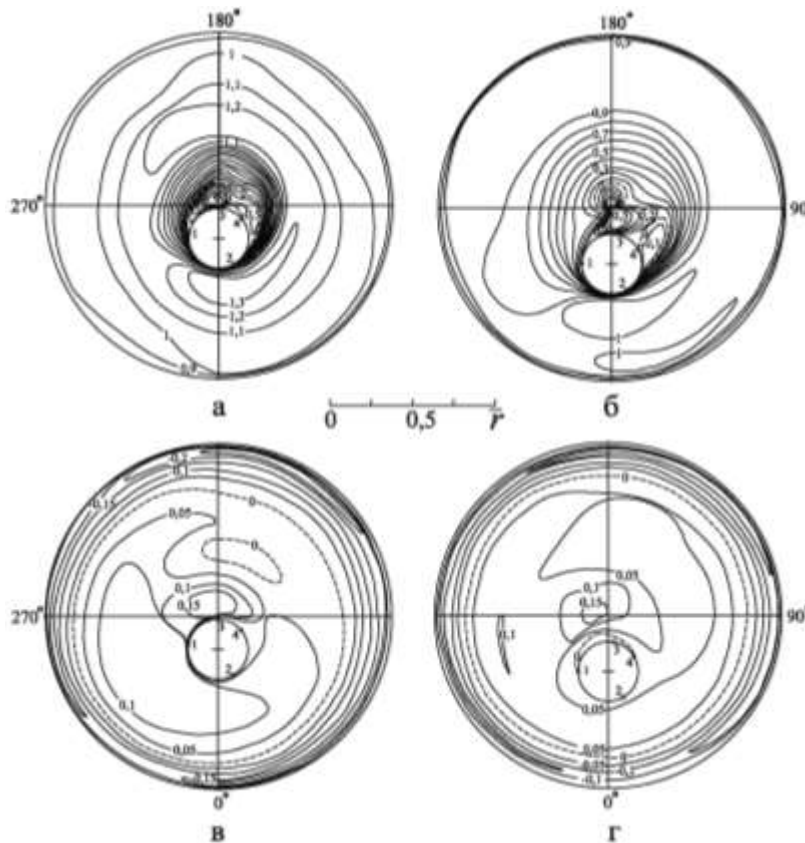


Рис. 5. Распределения изотях \bar{w}_φ (а, б) и \bar{w}_z (в, г) при обтекании цилиндра $\bar{d} = 0,173$ ($\bar{e} = 0,190$ и $0,324$)

При большем смещении ($\bar{e} = 0,324$) в конфузурной части течения при приближении потока к зажатому сечению (при $\varphi = 0^\circ$) наблюдается не только возрастание $\bar{w}_{\varphi m}$, но и перестроение профиля \bar{w}_φ – происходит резкое уменьшение $\bar{r}_{\varphi m}$. Вихрь имеет более значительные размеры и занимает свободную от цилиндра приосевую область рабочего объема. Уровень тангенциальных скоростей в нем становится соизмеримым по величине с их значениями во внешнем потоке, а осевых скоростей, наоборот, существенно ниже, чем для цилиндра $\bar{d} = 0,344$. Как и для $\bar{d} = 0,344$, при обоих исследованных смещениях рассматриваемого цилиндра, наиболее высокий уровень осевых скоростей в поперечном сечении наблюдается в вихре. При наибольшем \bar{e} характер обтекания цилиндра потоком качественно приближается к его обтеканию плоским потоком [5]. Лобовая точка перемещается к значению угла $\varphi_d \approx 270^\circ$, а точка 3 – в сторону меньшего его значения ($\varphi_d \approx 170^\circ$). Положение точки отрыва

циклонного потока с поверхности цилиндра 2 при исследованных смещениях практически не зависит от \bar{e} ($\varphi_d \approx 30^\circ$). За цилиндром между точками отрыва потока 2 и 3 происходит формирование двух вращающихся в противоположные стороны вихревых структур, разделенных линией 4-5 (рис. 4). Точка 5 является критической, в которой смыкаются нулевые линии тока, оторвавшиеся с поверхности цилиндра в точках 2 и 3.

Следует заметить, что при смещении цилиндра $\bar{d} = 0,173$ изоахи \bar{w}_φ и \bar{w}_z в основном циклонном потоке более равномерные и осесимметричные (рис. 5), чем при большем диаметре $\bar{d} = 0,344$.

Большое значение с точки зрения изучения и анализа закономерностей гидродинамики и теплообмена имеет исследование микроструктуры закрученного потока в циклонных нагревательных устройствах при сложных условиях течения теплоносителя.

При смещении цилиндра с оси циклонного потока наблюдается нарушение осевой симметрии распределений не только осредненных параметров потока, но и интенсивности пульсаций тангенциальной $\varepsilon_\varphi = \sqrt{w_\varphi'^2} / V$ и осевой $\varepsilon_z = \sqrt{w_z'^2} / V$ (V – осредненное значение полной скорости в данной точке) составляющих скорости (рис. 6). Распределения ε_φ и ε_z по рабочему объему определяются совокупным влиянием на турбулентность потока массовых сил, пограничных слоев, которые образуются и затем срываются с поверхности цилиндра, особенностями формирования вихря и т.д.

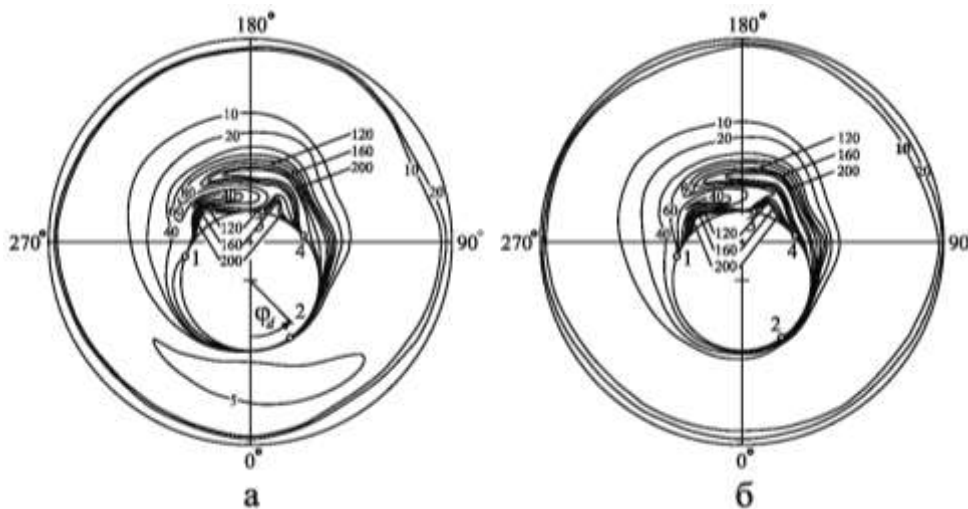


Рис. 6. Распределения ε_φ (а) и ε_z (б) в поперечном сечении циклонной камеры ($\bar{d} = 0,344$; $\bar{e} = 0,190$)

Как следует из данных, представленных на рис. 6 для $\bar{d} = 0,344$ при $\bar{e} = 0,190$, происходит увеличение ε_φ и ε_z не только около цилиндра, но также и на периферии потока. Изменяется характер распределений ε_φ , ε_z и вдоль линий тока (траекторий) циклонного потока. В конфузорной части течения радиус, соответствующий минимальным значениям интенсивности пульсаций скорости (4...5,5%) при $\varphi = 0^\circ$, практически совпадает с $\bar{r}_{\text{от}}$. В области $\bar{r} > \bar{r}_{\text{от}}$ при увеличении радиуса интенсивность пульсаций возрастает до 10...20%. В диффузорной части поперечного сечения минимальные значения ε_φ и ε_z перемещаются к боковой поверхности рабочего объема на радиус, равный примерно 0,9, и увеличиваются до 6...7% при

$\varphi=180^\circ$. С уменьшением радиуса, при $\bar{r} < \bar{r}_{\varphi m}$, в этой области течения происходит резкое увеличение ε_φ и ε_z . Наиболее высокие значения ε_φ и ε_z (до 200% и более) достигаются в центре вихря, на изотах нулевого значения тангенциальной скорости, и в начале его образования у поверхности цилиндра за лобовой точкой 1 (при $\varphi_d = 200^\circ \dots 220^\circ$), а также за точками отрыва потока 2 и 3.

В циклонном потоке, обтекающем цилиндр $\bar{d}=0,173$ при \bar{e} , равных 0,190 и 0,324, интенсивности пульсаций скорости, как и для цилиндра $\bar{d}=0,344$, не превышают 10%, причем изолинии 10% представляют собой практически концентрические окружности (рис. 7) с центром на оси рабочего объема циклонной камеры. При $\bar{e}=0,190$ и $\bar{r} > \bar{r}_{\varphi m}$, распределения ε_φ и ε_z по радиусу подобны и практически не зависят от угла φ . Их минимальные значения наблюдаются на радиусе, несколько большем, чем $\bar{r}_{\varphi m}$. Так, наименьшие ε_φ , равные 4,5...5,5%, расположены на $\bar{r}=0,5 \dots 0,6$, а $\varepsilon_z=5,5 \dots 6\%$ – на $\bar{r}=0,6 \dots 0,7$.

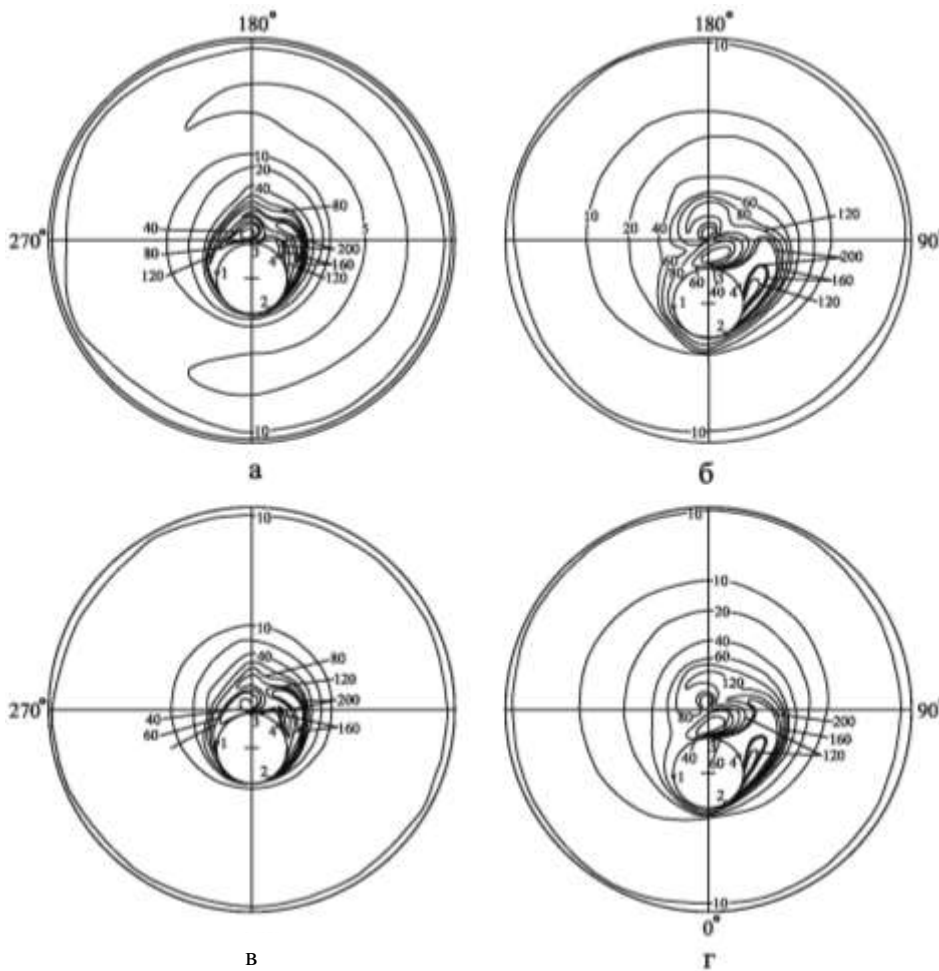


Рис. 7. Распределения ε_φ (а, б) и ε_z (в, г) в поперечном сечении циклонной камеры при обтекании цилиндра ($\bar{d}=0,173$; $\bar{e}=0,190$ и $0,324$)

Следует отметить, что в циклонном потоке при всех смещениях рассматриваемых цилиндров имеется небольшая анизотропия распределений ε_φ и ε_z , причем ε_z имеют на 0,5...1,5% большие значения, чем ε_φ . Распределения ε_φ и ε_z при $\bar{e}=0,190$ около поверхности цилиндра и в вихре качественно соответствуют их распределениям для $\bar{d}=0,344$ при том же смещении (рис. 6). При $\bar{e}=0,324$ наиболее высокая интенсивность пульсаций составляющих скорости (свыше 200%) наблюдается в кормовой области течения за точками отрыва 2 и 3, где происходит образование пары противоположно вращающихся вихрей (рис. 7, в, г). Из-за большей стесненности циклонного потока ε_φ и ε_z изменяются не только от \bar{r} , но и от φ . В конфузорной части течения минимальные значения ε_φ и ε_z расположены ближе к поверхности цилиндра и равняются 6...7%, а в диффузорной части они смещаются к боковой поверхности циклонной камеры на $\bar{r} \approx 0,9$.

Выводы

1. Течение в окрестностях заготовки (цилиндра), особенности формирования на ее поверхности пограничных слоев, их отрыва определяются совокупным влиянием диаметра и величины ее смещения с аэродинамической оси циклонного потока.
2. Сложная картина обтекания заготовки, смещенной с аэродинамической оси циклонного потока, распределения интенсивности турбулентности вызывает необходимость в дальнейшем тщательного исследования местных коэффициентов теплоотдачи на ее поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сабуров Э.Н. Интенсификация конвективного теплообмена в промышленных нагревательных устройствах на основе циклонного принципа: дис. ... доктора техн. наук / Э.Н. Сабуров. Саратов, 1990. 423 с.
2. Леухин Ю.Л. Особенности обтекания цилиндра, смещенного с аэродинамической оси циклонного потока / Ю.Л. Леухин, Э.Н. Сабуров, Д.В. Васильев // Известия вузов. Энергетика. 1999. № 3. С. 56-62.
3. Сабуров Э.Н. Циклонные нагревательные устройства с интенсифицированным конвективным теплообменом / Э.Н. Сабуров. Архангельск: Сев.-Зап. кн. изд-во, 1995. 341 с.
4. Разработка экспериментального стенда и исследование с помощью LDA аэродинамики циклонного нагревательного устройства / Ю.Л. Леухин, Э.Н. Сабуров, И.А. Усачев, В. Гарен // Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов: сб. науч. тр. Архангельск: Изд-во АГТУ, 2004. Вып. IX. С. 136-143.
5. Жукаускас А.А. Теплоотдача цилиндра в поперечном потоке жидкости / А.А. Жукаускас, И.И. Жюгжда. Вильнюс: Мокслас, 1979. 240 с.

Леухин Юрий Леонидович –

кандидат технических наук, доцент кафедры «Теплотехника»
Архангельского государственного технического университета

Сабуров Эдуард Николаевич –

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теплотехника»
Архангельского государственного технического университета

Усачев Илья Александрович –

инженер кафедры «Теплотехника»
Архангельского государственного технического университета

Статья поступила в редакцию 05.07.07, принята к опубликованию 05.12.07

С.В. Карпов, Э.Н. Сабуров, А.В. Быков

ТЕПЛООТДАЧА ЦИЛИНДРА В ЦИКЛОННОЙ КАМЕРЕ ПРИ БЛИЗКИХ К ПРЕДЕЛЬНЫМ УСЛОВИЯМ ВВОДА И ВЫВОДА ГАЗОВ

Рассмотрены результаты исследования и установлены закономерности теплоотдачи на боковой поверхности круглого цилиндра, осесимметрично расположенного в циклонной камере, при предельных и близких к предельным условиям ввода и вывода потока: при больших значениях площади входа, малых и больших диаметрах выходного отверстия, предельной высоте входных каналов, равных радиусу камеры.

Полученные обобщенные уравнения подобия применимы в широких диапазонах изменения относительного диаметра цилиндра, условий ввода и вывода газов.

S.V. Karpov, E.N. Saburov, A.V. Bykov

CONVECTIVE HEAT TRANSFER FROM A CYLINDER IN CYCLONE CHAMBER UNDER CONDITIONS OF INPUT AND OUTPUT OF THE FLOW, LIMITING AND CLOSE TO LIMITING

The research results have been considered here and regularities of lateral face heat exchange at the axial symmetrically located round cylindrical insertion in a cyclone chamber, under conditions of input and output of the flow, limiting and close to limiting: at the high total values of the stream inputting area, small and high diameters of the output hole, limiting height input channels, equal to a radius of the chamber was established here as well.

A generalized equation of the similarity is obtained.

Исследование конвективного теплообмена на поверхности осесимметричных тел в закрученном потоке представляет как теоретический, так и практический интерес при расчетах и проектировании нагревательных печей, теплообменников, сепараторов-пылеуловителей, вихревых охлаждающих устройств, плазмотронов с вихревой стабилизацией дуги и другого энергетического оборудования [1-5].

Теплоотдача на поверхности цилиндра в циклонном потоке достаточно полно исследована лишь при следующих значениях геометрических параметров, характеризующих условия ввода и вывода газов из циклонной камеры: безразмерной площади входа потока $0,04 \leq \bar{f}_{вх} = 4f_{вх}/(\pi D_k^2) \leq 0,1$ (D_k – внутренний диаметр циклонной камеры); безразмерной высоты входных каналов $\bar{h}_{вх} = h_{вх}/D_k \leq 0,25 \dots 0,3$; безразмерного диаметра выходного отверстия $0,3 \leq \bar{d}_{вых} = d_{вых}/D_k \leq 0,6$. В то же время загруженные циклонные камеры с малыми значениями $\bar{d}_{вых}$ и большими $\bar{f}_{вх}$ используются в обеспыливающей и сушильной технике, при нагреве металла, термической обработке заготовок [2, 5], а циклонные камеры с $\bar{h}_{вх} \rightarrow 0,5$, $\bar{f}_{вх} > 0,1$ – в топках обезвреживания и сжигания горючих отходов производства [4], печах безокислительного нагрева металла [1, 3].

В развитие ранее выполненных экспериментальных исследований [1-5] в настоящей работе рассмотрены аэродинамика и теплоотдача круглого цилиндра, соосного с аэродинамической осью стабилизированного закрученного потока в вертикальной циклонной камере как при сравнительно малых (0,05...0,2), так и больших (0,8...1,0) значениях $\bar{d}_{вых}$, малых (0,02) и больших (0,2...0,267) значениях $\bar{f}_{вх}$ и $\bar{h}_{вх}$, близких или равных 0,5.

Опытная часть работы выполнена на двух экспериментальных стендах. Первый из них – аэродинамический, подробно описан в работе [6], второй, предназначенный для исследования движения газов и теплоотдачи в циклонной загруженной камере, – в [7].

Основным элементом второго стенда являлась гладкостенная циклонная камера (закручиватель) с внутренним диаметром $D_k = 2R_k = 160$ (310) мм и длиной $L_k = 160$ (263,5) мм. Ввод воздуха в камеру осуществлялся расположенными тангенциально к внутренней поверхности рабочего объема шлицами с одной или двух диаметрально противоположных сторон. Ширина прямоугольных шлицев l_{ex} составляла 33,5 мм, их высота h_{ex} могла варьироваться специальными деревянными вкладышами от 12 до 80 мм. Выходной (по направлению движения потока) конец вкладышей был отфрезерован таким образом, что его торцевая поверхность при любой высоте совпадала с внутренней поверхностью камеры.

Опыты по исследованию влияния условий ввода потока на теплоотдачу цилиндра проводили при одном работающем шлице и его безразмерной высоте $\bar{h}_{ex} = h_{ex}/D_k = 0,075$ и двух шлицах при $\bar{h}_{ex} = 0,075; 0,394; 0,5$. С изменением высоты шлица в опытах менялась и безразмерная площадь входа потока $\bar{f}_{ex} = 4l_{ex}h_{ex}/(\pi D_k^2)$ в диапазоне значений от $2,0 \cdot 10^{-2}$ (при $\bar{h}_{ex} = 0,075$) до $26,67 \cdot 10^{-2}$ (при $\bar{h}_{ex} = 0,5$). За счет крепления к закручивателям сменных цилиндрических обечаек относительная длина камер $\bar{L}_k = L_k/D_k$ могла варьироваться от 1,55 до 2,75.

Отвод газов из рабочего объема циклонной камеры производили через пережим (круглое отверстие) в его выходном торце. Безразмерный диаметр $\bar{d}_{вых}$ мог принимать значения от 0,05 до 1,0. В рабочем объеме камеры устанавливались пустотельные тонкостенные металлические паровые калориметры, теплоотдача конвекцией к воздуху от которых определялась по методу изменения агрегатного состояния греющего агента [1, 5] – конденсации слегка перегретого (на $2 \dots 3^\circ\text{C}$) водяного пара, подаваемого внутрь калориметров. Длина калориметров составляла 400 мм, толщина стенки – 2 мм, его наружный диаметр $d_e = 2r_e$ мог принимать значения от 25 до 130 мм, в безразмерном виде $\bar{d}_e = d_e/D_k$ – от 0,0806 до 0,419. Верхние торцы рабочего участка калориметров были теплоизолированы текстолитовыми крышками. Более подробное описание стенда и методики измерений приведено в работе [5].

Измерение скоростей и давлений в рабочем объеме камеры производилось трехканальным цилиндрическим зондом по радиусам в среднем сечении или сечении ввода потока. Распределения безразмерных величин тангенциальной $\bar{w}_\varphi = w_\varphi/v_{ex}$ (v_{ex} – средняя входная скорость потока) и аксиальной $\bar{w}_z = w_z/v_{ex}$ скоростей потока, статического $p_c = 2p_s/(\rho_{ex}v_{ex}^2)$ (ρ_{ex} – плотность воздуха во входных каналах) и полного $\bar{p}_n = 2p_n/(\rho_{ex}v_{ex}^2)$ давлений по радиусу циклонной камеры при различных значениях \bar{d}_e представлены на рис. 1.

Здесь же приведены аппроксимационные зависимости, полученные авторами при экспериментальном исследовании предельных и близких к предельным условиям вывода газов из циклонной камеры [6]. Основной безразмерной аэродинамической характеристикой циклонного потока является максимальная вращательная скорость $\bar{w}_{\varphi m}$, достигаемая на радиусе $\bar{r}_{\varphi m}$ (рис. 1). По условиям течения во внешней (квазипотенциальной) зоне ядра при варьировании в широких пределах $\bar{d}_{вых}$ и \bar{d}_e

$$\bar{w}_\varphi = \frac{1}{0,065 + 1,05\bar{r}}, \quad (1)$$

по условиям течения во внутренней зоне ядра

$$\bar{w}_\varphi = \bar{w}_{\varphi m} \left[\frac{2\bar{r}/\bar{r}_{\varphi m}}{1 + (\bar{r}/\bar{r}_{\varphi m})^2} \right]^{n_\omega}, \quad (2)$$

где n_ω – показатель степени, зависящий от геометрических характеристик циклонной камеры и учитывающий особенности течения в приосевой области потока [2-5].

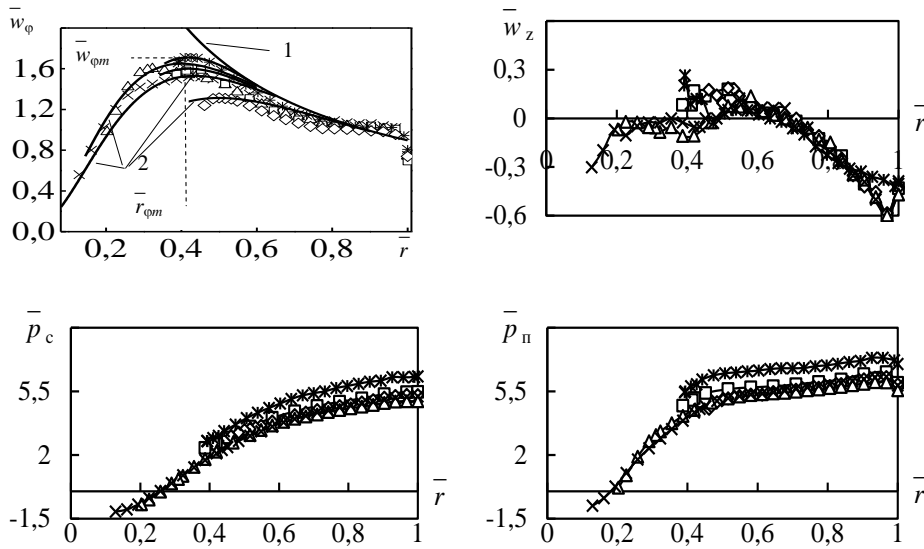


Рис.1. Распределения \bar{w}_ϕ , \bar{w}_z , \bar{p}_c , \bar{p}_n в среднем сечении рабочего объема циклонной камеры при $\bar{d}_{\text{вых}} = 0,4$ и различных значениях \bar{d}_6 : \times – 0,0806; \triangle – 0,145; \square – 0,342; $*$ – 0,355; \diamond – 0,419; 1 – расчет по уравнению (1); 2 – по уравнению (2)

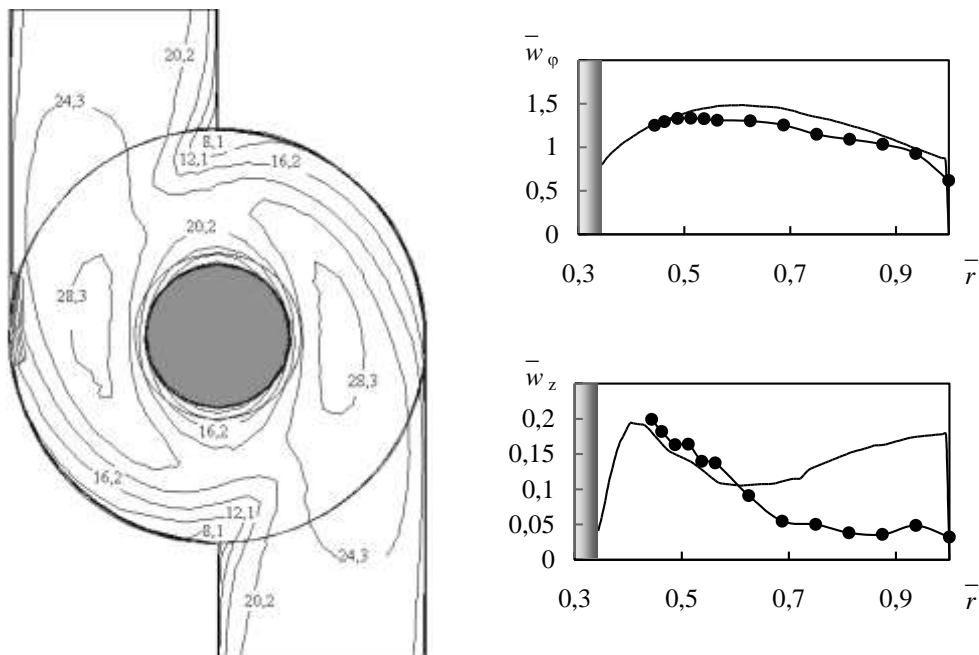


Рис. 2. Картина распределения полной скорости потока, м/с, в среднем поперечном сечении циклонной камеры с осесимметричной вставкой ($\bar{d}_6 = 0,344$) и сопоставление расчетных (кривые) и опытных (точки) профилей \bar{w}_ϕ и \bar{w}_z в рабочем объеме циклонной камеры с $\bar{h}_{\text{ex}} = 0,5$; $\bar{d}_{\text{вых}} = 0,4$

Результаты математического моделирования изотермического течения циклонного воздушного потока с использованием специализированного пакета программ CFX показаны на рис. 2. Расчеты выполнены на основе SST (Shear Stress Transport) – модели турбулентности. Сложная вихревая структура и неосесимметричность закрученного течения, даже в условиях центрирующего влияния цилиндра, обусловлены выполнением предельного геометрического условия – равенства высоты входного канала и радиуса циклонной камеры.

Обработку опытных данных по конвективному теплообмену проводили, принимая в качестве характерного линейного размера диаметр цилиндра (вставки) $d_в$, определяющей температуры – среднюю температуру потока в объеме камеры.

Установлено, что при заданном значении $d_в$ интенсивность конвективного теплообмена на поверхности гладкостенного цилиндра зависит от значений $\bar{f}_{вх}(\bar{h}_{вх})$, $\bar{d}_{ввых}$, $\bar{L}_к$ и диапазона изменения числа Рейнольдса $Re_{\phi m} = w_{\phi m} d_в / \nu_{\phi m}$, где $\nu_{\phi m}$ – кинематический коэффициент вязкости газа на радиусе $r_{\phi m}$.

Впервые в работе [7] показано, что при больших значениях $\bar{f}_{вх}$ и $R_k = h_{вх} \bar{d}_{ввых} \leq 0,4$ обтекание цилиндра в циклонной камере даже при его соосном расположении становится на части поверхности отрывным из-за нарушения осевой симметрии течения (рис. 2). В этих условиях экспериментальные данные по конвективному теплообмену близки к расчетным по известному уравнению подобия [8], описывающему теплоотдачу одиночного цилиндра, обтекаемого плоскопараллельным поперечным потоком воздуха

$$Nu = 0,245 Re^{0,6}, \quad (3)$$

где число Рейнольдса определяется по диаметру цилиндра и скорости набегающего потока, равной в данном случае $w_{\phi m}$, $Re = 1,6 \cdot 10^4 \dots 10^5$. Зависимость (3), вероятно, может рассматриваться как один из предельных (отражающий максимально возможный уровень) законов теплоотдачи осесимметрично расположенного цилиндра в циклонной камере с сильно нарушенной (при одностороннем вводе потока) осевой симметрией течения.

Анализ дифференциальных уравнений движения несжимаемой жидкости в поле инерционных массовых сил показал [5], что при обобщении опытных данных по теплоотдаче может использоваться комплекс $Ko(\eta_в)$, представляющий собой функцию безразмерного диаметра цилиндра $\eta_в = r_в / r_{\phi m}$ и учитывающий особенности циклонного течения в его внутренней зоне ($\eta_в < \eta \leq 1$).

Полученные в работе экспериментальные данные, в том числе при предельных и близких к предельным условиям ввода и вывода газов, а также анализ и обобщение результатов ранее выполненных исследований авторов [1-5] позволили установить следующий вид зависимости для $Ko(\eta_в)$

$$Ko(\eta_в) = 1 - k_в \eta_в^m, \quad (4)$$

где $k_в$ – коэффициент, зависящий от $\eta_в$; при $\eta_в \leq \eta_в^{np}$

$$k_в = \frac{1}{a + b \eta_в^2};$$

при $\eta_в > \eta_в^{np}$

$$k_в = \frac{1}{a + b (\eta_в^{np})^2};$$

$a = 0,31$; $b = 1,64$; $\eta_в^{np}$ – безразмерный диаметр цилиндра, соответствующий переходу от «свободного» течения циклонного потока к «сконцентрированному» [1, 2]

$$\eta_в^{np} = 1,18 \bar{d}_в^2 + 0,55; \quad (5)$$

m – показатель степени; $m = 1$ при $\bar{h}_{вх} \leq 0,4$; $m = 3$ при $\bar{h}_{вх} = 0,5$, $\bar{d}_{ввых} = 0,05 \dots 0,4$; $m = 1/(0,17 + 0,41 \bar{d}_{ввых})$ при $0,4 < \bar{d}_{ввых} \leq 1,0$.

Результаты исследований теплоотдачи на боковой поверхности цилиндра в циклонной камере при различных условиях ввода и вывода газов, в том числе при предельных и близких к предельным, описываются обобщающими уравнениями подобия:

в области чисел $Re_{\varphi m} = 4,5 \cdot 10^4 \dots 1,7 \cdot 10^5$

$$Nu = 0,064 Ko(\eta_6) Re_{\varphi m}^{0,74} ; \quad (6)$$

в области $Re_{\varphi m} = 8,5 \cdot 10^3 \dots 4,5 \cdot 10^4$

$$Nu = 0,464 Ko(\eta_6) Re_{\varphi m}^{0,556} . \quad (7)$$

Сопоставление обобщающих формул (6) и (7) с опытными данными, полученными при различных сочетаниях параметров входа и выхода [2, 3, 5, 7] (см. таблицу), показано на рис. 3. Как следует из представленных данных, при сравнительно малых значениях $\bar{d}_{\text{вых}}$, $\bar{f}_{\text{вх}}$ и числа $Re_{\varphi m} > 6,5 \cdot 10^4$ экспериментальные точки имеют тенденцию к сходу с расчетной кривой (1) вверх. Последнее можно объяснить значительным расширением входящих струй газа из пристенной в приосевую область течения, повышением уровня турбулентности в условиях ослабления стабилизирующего влияния закрутки потока при сравнительно малых величинах $\bar{d}_{\text{вых}}$.

В основу решения задачи конвективного теплообмена на боковой поверхности цилиндра в циклонном потоке положено интегральное соотношение [5, 9, 10], записанное в приближении плоского кругового течения и при использовании ряда допущений, позволивших придать ему форму, аналогичную обычному интегральному соотношению для теплового пограничного слоя:

$$\frac{d}{dr_e} \int_0^{\delta} w_{\varphi} \vartheta dy = \frac{q_e}{\rho c_p} , \quad (8)$$

где δ_m – толщина теплового пограничного слоя; $\vartheta = (T_e - T)$ – избыточная температура; y – координата, направленная по нормали к поверхности цилиндра; q_e – плотность теплового потока на поверхности цилиндра; ρ , c_p – средние плотность и изобарная теплоемкость.

В рассматриваемой задаче формирование пограничного слоя характеризуется в основном переменной η_6 [2, 5]. Принято также, что пограничный слой тонкий и его поперечной кривизной в первом приближении можно пренебречь [9], а распределения w_{φ} и ϑ хорошо описываются обычными степенными формулами

$$\frac{w_{\varphi}}{w_{\varphi \delta}} = \left(\frac{y}{\delta} \right)^{m_1} ; \quad (9)$$

$$\frac{\vartheta}{\vartheta_m} = \left(\frac{y}{\delta_m} \right)^{m_1} , \quad (10)$$

где $w_{\varphi \delta}$ и δ – скорость на границе гидродинамического пограничного слоя и его толщина; ϑ_m – избыточная температура на границе теплового пограничного слоя.

Напряжение трения $\tau_{\varphi e}$ и плотность теплового потока q_e в пределах турбулентного пограничного слоя определены также известными формулами

$$\tau_{\varphi e} = \rho(v + \varepsilon_{\sigma}) \frac{dw_{\varphi}}{dy} , \quad (11)$$

$$q_e = \rho c_p (a + \varepsilon_q) \frac{d\vartheta}{dy} , \quad (12)$$

где a – коэффициент температуропроводности; ε_{σ} , ε_q – турбулентные аналоги коэффициентов ν и a .

При условии, что в турбулентном ядре $\nu \ll \varepsilon_{\sigma}$, $a \ll \varepsilon_q$, из (11), (12) получено соотношение

$$\frac{q_s}{\rho c_p} = \frac{1}{Pr_m} \left(\frac{\delta}{\delta_m} \right)^m \frac{q_m}{w_{ф\delta}}. \quad (13)$$

Здесь Pr_m – турбулентный аналог молекулярного числа Прандтля Pr .

Безразмерные геометрические характеристики циклонных устройств
с цилиндрической вставкой

Вариант	\bar{L}_k	\bar{d}_e	\bar{f}_{ex}	$\bar{d}_{вых}$	Обозн.	Вариант	\bar{L}_k	$\bar{d}_в$	$\bar{f}_{вх}$	$\bar{d}_{вых}$	Обозн.
1	1,55	0,0806	0,0477	0,4		40	2,75	0,344	0,02	0,6	
2		0,145			41	1,0					
3		0,0238	0,2		42	0,05					
4			0,3		43	0,1					
5			0,4		44	0,2					
6			0,6		45	0,4					
7			0,0318	0,2		46			0,8		
8				0,3		47			1,0		
9		0,4			48	0,05					
10		0,177	0,0477	0,6		49			0,1	*	
11				0,2		50			0,2		
12			0,3		51	0,4					
13			0,4		52	2,0			0,4*		
14			0,0957	0,6		53			0,6		
15				0,2		54			0,8		
16		0,3			55	1,0					
17		0,242	0,0477	0,4		56			0,05		
18				0,6		57			0,1		
19			0,0238	0,2		58			0,2		
20				0,3		59			0,4		
21				0,4		60			0,6		
22				0,6		61			1,0		
23		0,342	0,0318	0,2		62			0,2		
24				0,3		63			0,3		
25				0,4		64			0,4		
26			0,0477	0,6		65			0,6		
27				0,2		66			0,2		
28				0,3		67			0,3		
29		0,0957	0,0477	0,4		68			0,4		
30				0,6		69			0,6		
31			0,267	0,0238	0,2				70	0,2	
32					0,3				71	0,3	
33				0,4		72			0,4		
34				0,6		73			0,6		
35		0,419	0,0318	0,2		74			0,2		
36				0,3		75			0,3		
37			0,0477	0,4		76			0,4		
38				0,6		77			0,6		
39		0,0957		0,2		78			0,2		
39	2,75	0,344	0,02	0,05		75			0,3		
				0,1		76			0,4		
				0,2		77			0,6		
				0,4							

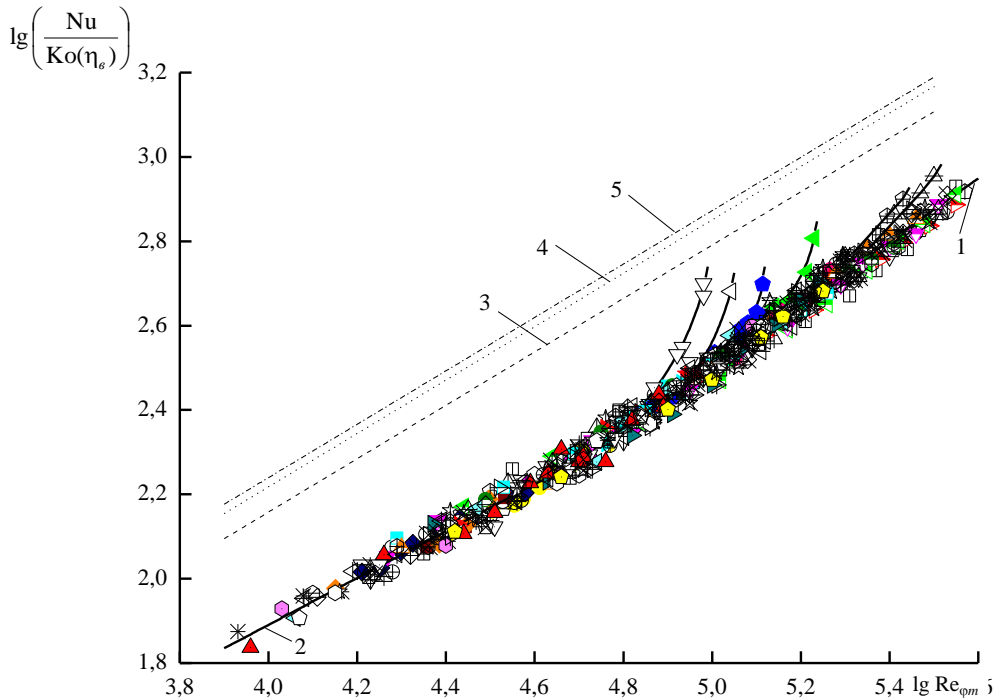


Рис. 3. Обобщение опытных данных по конвективному теплообмену круглого цилиндра в циклонной камере при различных условиях ввода и вывода газов: 1 – расчет по уравнению (6); 2 – по уравнению (7); 3, 4, 5 – по уравнению (3) при $\eta_e=0,35; 0,305; 0,29$

Безразмерная толщина пристенного пограничного слоя $\bar{\delta} = \delta / d_e$ определена как функция числа Рейнольдса $Re_{\phi m}$

$$\bar{\delta} = \frac{\delta^+}{\sqrt{\frac{A(\eta_e)}{2}}} Re_{\phi m}^{\frac{z-1}{2}}, \quad (14)$$

где δ^+ – толщина пограничного слоя в универсальных координатах; $A(\eta_e)$, z – коэффициенты, входящие в уравнение для коэффициента трения

$$c_{f\phi} = \frac{2\tau_{\phi s}}{\rho w_{\phi m}^2} = A(\eta_e) Re_{\phi m}^{-z}. \quad (15)$$

Обобщение экспериментальных данных по поверхностному трению [3, 5] с использованием безразмерного комплекса $Ko(\eta_e)$ позволило получить зависимость (рис. 4)

$$c_{f\phi} = 0,795 [Ko(\eta_e)]^2 k_d Re_{\phi m}^{-0,355}, \quad (16)$$

где k_d – поправочный коэффициент, учитывающий влияние безразмерного диаметра цилиндра (кривизны поверхности теплообмена);

$$k_d = 1,265 - \frac{0,254}{\bar{d}}; \quad \bar{d} = \bar{d}_e / 0,342; \quad \bar{d}_e = 0,0806 \dots 0,419.$$

С учетом соотношения (14) безразмерный радиус внешней границы гидродинамического слоя

$$\eta_\delta = \left(1 + \frac{2\delta^+}{\sqrt{\frac{A(\eta_\delta)}{2}}} \text{Re}_{\varphi m}^{\frac{z-1}{2}} \right) \eta_\delta. \quad (17)$$

Распределение w_φ в приосевой области циклонной камеры с цилиндрической вставкой, в том числе при предельных условиях ввода и вывода газов, зададим, используя аппроксимационную формулу (2).

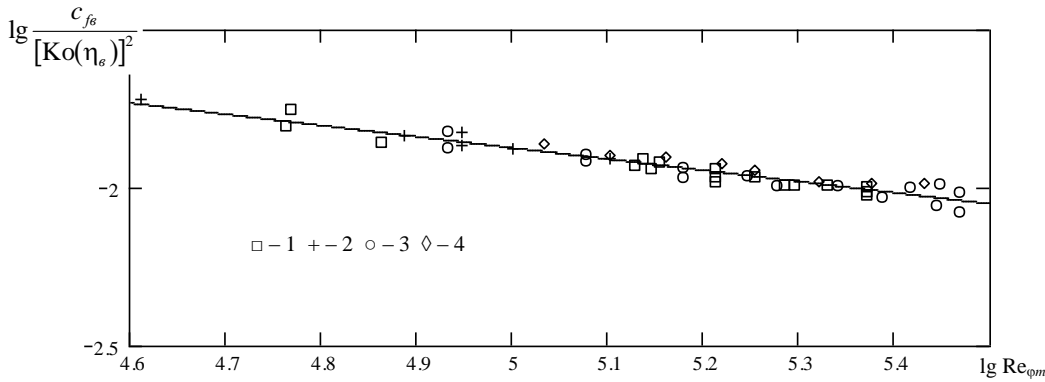


Рис. 4. Зависимость коэффициента трения на боковой поверхности цилиндрической вставки ($\bar{d}_6 = 0,342$; $k_d = 1$) от числа Рейнольдса $\text{Re}_{\varphi m}$ при различных значениях $\bar{d}_{6\text{вх}}$: 1 – $\bar{d}_{6\text{вх}} = 0,2$; 2 – $0,3$; 3 – $0,4$; 4 – $0,6$; линия – расчет по уравнению (16)

Подставив уравнение (2) в (17), получили расчетное выражение для скорости на границе гидродинамического пограничного слоя, приближенно аппроксимированное степенной зависимостью

$$w_{\varphi\delta} = B\eta_\delta \text{Re}_{\varphi m}^{-k} w_{\varphi m}, \quad (18)$$

где B и k – коэффициенты, в общем случае зависящие от закона трения (15), осевой координаты, диапазона изменения $\text{Re}_{\varphi m}$.

Вычислив определенный интеграл в левой части соотношения (8) с учетом выражений (9), (10), (18) и сделав необходимые преобразования, получили линейное дифференциальное уравнение

$$\frac{d}{d\eta_\delta} \left(\frac{\delta_m}{\delta} \right)^{2m_1+1} + \frac{1}{\eta_\delta} \left(\frac{\delta_m}{\delta} \right)^{2m_1+1} = \frac{E}{\eta_\delta^3} \text{Re}_{\varphi m}^{2k-\frac{3}{2}z+1}, \quad (19)$$

$$\text{где } E = \frac{2m_1+1}{4} \sqrt{\frac{A(\eta_\delta)^3}{2}} \cdot \frac{1}{B^2\delta^+ \text{Pr}_m}.$$

Решение уравнения (19) позволяет получить соотношение между толщинами теплового и гидродинамического пограничных слоев на поверхности цилиндра

$$\frac{\delta_m}{\delta} = \left[E \left(\frac{1}{C\eta_\delta} - \frac{1}{\eta_\delta^2} \right) \right]^{\frac{1}{2m_1+1}} \text{Re}_{\varphi m}^{\frac{2k-\frac{3}{2}z+1}{2m_1+1}}. \quad (20)$$

Здесь $C = \eta_\epsilon^0$ – постоянная интегрирования, учитывающая особенности циклонного течения в приосевой зоне, $\eta_\epsilon^0 \cong 6,74 \cdot 10^{-3}$ [9].

Подставив выражения (15) и (20) в зависимость (13) и выделив в правой части число $Nu = \alpha d_\epsilon / \lambda$, получили формулу для расчета средней по длине цилиндра теплоотдачи

$$Nu = \frac{A(\eta_\epsilon)}{B} \frac{Pr}{Pr_m} \frac{1}{\eta_\epsilon} \left[\left(\frac{1}{\eta_\epsilon \eta_\epsilon^0} - \frac{1}{\eta_\epsilon^2} \right) \frac{2m_1 + 1}{4} \frac{\sqrt{A(\eta_\epsilon)^3 / 2}}{B^2 \delta_m^+ Pr_m} \right]^{\frac{m_1}{2m_1 + 1}} Re_{\phi m}^n ; \quad (21)$$

$$n = 1 + k - z - \frac{m_1}{2m_1 + 1} \left(2k - \frac{3}{2}z + 1 \right).$$

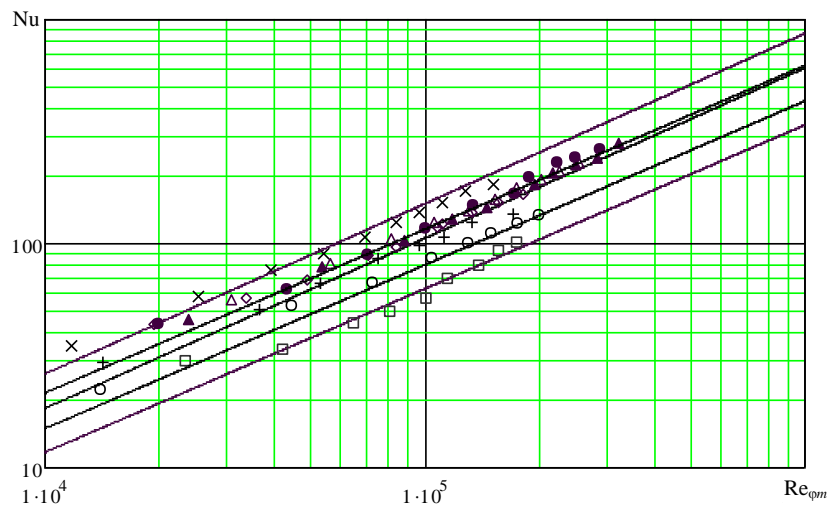


Рис. 5. Сопоставление опытных (точки) и расчетных (линии) данных по теплоотдаче цилиндра в циклонном потоке: \square – $\bar{d}_{вых} = 0,2$; \circ – $0,3$; $+$ – $0,4$; \times – $0,6$ ($\bar{d}_\epsilon = 0,177$; $\bar{f}_{ex} = 0,0318$); \diamond – $\bar{d}_{вых} = 0,2$; Δ – $0,3$; \bullet – $0,4$; \blacktriangle – $0,6$ ($\bar{d}_\epsilon = 0,419$; $\bar{f}_{ex} = 0,0957$); линии – расчет по уравнению (23)

Проведено сравнение (рис. 5) экспериментальных результатов с расчетом теплоотдачи цилиндра в стабилизированном циклонном потоке. Сопоставление выполнено для вариантов «свободного» ($m_1 = 0,05$; $\delta^+ = 150$; $Pr_\tau = 0,75$) и «сконцентрированного» ($m_1 = 0,1$; $\delta^+ = 270$; $Pr_m = 0,9 \dots 1$) течения [1-3] при $B = 5,2$; $k = 0,15$; $Pr = 0,7 \dots 0,72$.

Из рис. 5 следует, что при выбранных условиях сравнения расчетные кривые по уравнению (16) вполне удовлетворительно согласуются с опытными данными при различных значениях безразмерных диаметров цилиндра, выходного отверстия, площади входа потока.

Выводы

1. На основе аэродинамических измерений и результатов математического моделирования установлены закономерности течения потока в циклонной камере, загруженной осесимметричным цилиндром, при близких к предельным и предельных условиях ввода и вывода газов.

2. Предложен безразмерный комплекс, позволивший обобщить многочисленные экспериментальные данные по теплоотдаче и поверхностному трению осесимметричных цилиндров в сильно закрученном циклонном потоке.

3. Полученные уравнения и рекомендации для расчета средних значений коэффициентов теплоотдачи могут быть использованы для совершенствования методики теплового расчета циклонных камер, в том числе специального конструктивного исполнения, и расширения областей их практического применения [1-5].

ЛИТЕРАТУРА

1. Сабуров Э.Н. Циклонные нагревательные устройства с интенсифицированным конвективным теплообменом / Э.Н. Сабуров. Архангельск: Сев.-Зап. кн. изд-во, 1995. 341 с.
2. Сабуров Э.Н. Теория и практика циклонных сепараторов, топок и печей / Э.Н. Сабуров, С.В. Карпов; под ред. Э.Н. Сабурова. Архангельск: Изд-во АГТУ, 2000. 568 с.
3. Сабуров Э.Н. Теплообмен и аэродинамика закрученного потока в циклонных устройствах / Э.Н. Сабуров, С.В. Карпов, С.И. Осташев; под ред. Э.Н. Сабурова. Л.: Изд-во ЛГУ, 1989. 276 с.
4. Сабуров Э.Н. Циклонные устройства в деревообрабатывающем и целлюлозно-бумажном производстве / Э.Н. Сабуров, С.В. Карпов; под ред. Э.Н. Сабурова. М.: Экология, 1993. 368 с.
5. Карпов С.В. Высокоэффективные циклонные устройства для очистки и теплового использования газовых выбросов / С.В. Карпов, Э.Н. Сабуров; под ред. Э.Н. Сабурова. Архангельск: Изд-во АГТУ, 2002. 504 с.
6. Карпов С.В. Аэродинамика циклонных устройств при близких к предельным условиях ввода и вывода газов / С.В. Карпов, Э.Н. Сабуров, А.В. Быков // Вынужденная конвекция однофазной жидкости: труды четвертой Рос. нац. конф. по теплообмену: в 8 т. М.: Издат. дом МЭИ, 2006. Т. 2. С. 141-144.
7. Карпов С.В. Аэродинамика и теплоотдача круглого цилиндра в циклонной камере при условиях вывода газов, близких к предельным / С.В. Карпов, Э.Н. Сабуров, А.В. Быков // Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов: сб. науч. тр. Архангельск, 2006. Вып. 64. С. 103-112.
8. Жукаускас А.А. Теплоотдача цилиндра в поперечном потоке жидкости / А.А. Жукаускас, И. Жюжда. Вильнюс: Мокслас, 1979. 240 с.
9. Карпов С.В. О расчете движения газов и теплоотдачи в приосевой области циклонного потока / С.В. Карпов // Инженерно-физический журнал. 1984. Т. 47, № 6. С. 892-903.
10. Исследование теплоотдачи на поверхности цилиндрической вставки в циклонном потоке / С.В. Карпов, Э.Н. Сабуров, Н.В. Смолина и др. // Российский национальный симпозиум по энергетике: материалы докл.: в 2 т. Казань, 2001. Т. 1. С. 392-396.

Карпов Сергей Васильевич –

доктор технических наук, профессор кафедры «Теплотехника»
Архангельского государственного технического университета

Сабуров Эдуард Николаевич –

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теплотехника»
Архангельского государственного технического университета

Быков Александр Викторович –

инженер кафедры «Теплотехника»
Архангельского государственного технического университета

Статья поступила в редакцию 05.07.07, принята к опубликованию 05.12.07

УДК 621.6.06

**А.П. Усачев, А.Л. Шурайц, А.А. Феоктистов, В.Ю. Каргин,
А.Ю. Фролов, А.В. Рулев, Т.А. Усачева**

**МЕТОД РАЗРАБОТКИ НОВЫХ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК
С МАКСИМАЛЬНО ВОЗМОЖНЫМИ ПОКАЗАТЕЛЯМИ
НА ОСНОВЕ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА**

Предложен метод разработки новых теплоэнергетических установок (ТЭУ) с заданным уровнем требований на основе системного подхода. Метод включает в себя следующие положения: выделение ТЭУ в отдельную систему с установлением ее границ и структуры, выбор целевой функции, дающей математическое описание цели разработки, определение характера ее экстремума, выявление, анализ и структурирование факторов, влияющих на экстремум целевой функции, определение его величины, разработка конструкции новой ТЭУ с максимально возможными показателями.

**A.P. Usachyov, A.L. Shurajts, A.A. Feoktistov, V.Yu. Kargin,
A.Yu. Frolov, A.V. Rulev, T.A. Usachyova**

**NEW HEAT POWER INSTALLATIONS DEVELOPMENT METHOD
WITH MAXIMAL-POSSIBLE PARAMETERS ON SYSTEM APPROACH BASIS**

New heat power installations (NHI) development method is offered here with set level requirements on system approach basis. The method includes following positions: allocation NHI in separate system with an establishment its borders and structures, a choice criterion function, purpose development giving mathematical description, definition character its extremum, revealing, the analysis and structural factors influencing an extremum criterion function, definition its size, development a design new NHI with maximal-possible parameters.

Актуальность применения системного подхода при разработке новых теплоэнергопотребляющих или теплоэнергогенерирующих установок, а также любых других технически сложных объектов обуславливается, прежде всего, необходимостью: наиболее полного, объективного и всестороннего рассмотрения поставленной задачи; выявления всей совокупности факторов и ограничений, позитивно и негативно влияющих на достижение поставленной цели; создания энергетических установок с максимально возможными показателями, полученными при решении поставленной задачи.

В то же время существующие подходы при разработке новых устройств, в том числе и на уровне изобретений [1], базируются в основном на анализе отдельных недостатков известных аналогов и прототипов без системного изучения различных факторов, препятствующих решению поставленной цели. При существующих подходах не предполагается достижение максимально возможных показателей при решении поставленной задачи и отсутствует механизм их получения.

Игнорирование системного подхода при разработке новых энергетических установок приводит к однобокому подходу, когда совершенствуются только отдельные характеристики, параметры и элементы существующих устройств или устраняются наиболее значительные на данный момент недостатки известных аналогов. В результате улучшение отдельных характеристик, параметров и элементов приводит зачастую к ухудшению других.

Такой подход в значительной степени тормозит создание устройств, отличающихся высокими потребительскими качествами с всесторонним учетом всего многообразия их характеристик, состояний и особенностей. В целом такое положение приводит к сдерживанию темпов научно-технического прогресса. Только применение системного подхода позволяет всесторонне исследовать и создавать технически совершенные системы с заранее заданными свойствами.

Теоретические предпосылки создания теплоэнергетических установок на базе системного подхода изложены в работах [2-6].

Рассмотрим более подробно основные положения системного подхода при разработке новых теплоэнергетических установок, последовательность выполнения которых приведена на схеме (рис. 1).

1. Характеристика объекта и цель разработки.

Вначале определяется объект разработки, в качестве которого принимается теплоэнергопотребляющая (ТПУ) или теплоэнергогенерирующая (ТГУ) установка. Приводится ее характеристика, т.е. назначение, область применения, особенности функционирования.

Например, для испарителя СУГ объект разработки: промышленный испаритель сжиженного углеводородного газа (СУГ) по ГОСТ 20448-90*. Сжиженный углеводородный газ, используемый в установках регазификации согласно ГОСТ 20448-90*, состоит из пропана, бутана, их смесей, растворенной воды, следов пентана. В состав СУГ, получаемых с нефтеперерабатывающих заводов, входят непредельные углеводороды, такие как пропилен и бутутилен. Область применения: эксплуатация на наружном воздухе при температурах от -40 до $+45^{\circ}\text{C}$. Особенности функционирования: коэффициент теплопередачи применяемых в настоящее время испарительных установок СУГ с жидким промежуточным теплоносителем составляет $350-380 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{K})$, что существенно ниже по сравнению с аналогичными устройствами, применяемыми в других отраслях техники и что предопределяет необходимость проведения работ по выявлению и анализу внешних параметров и воздействий, снижающих интенсивность теплообмена.

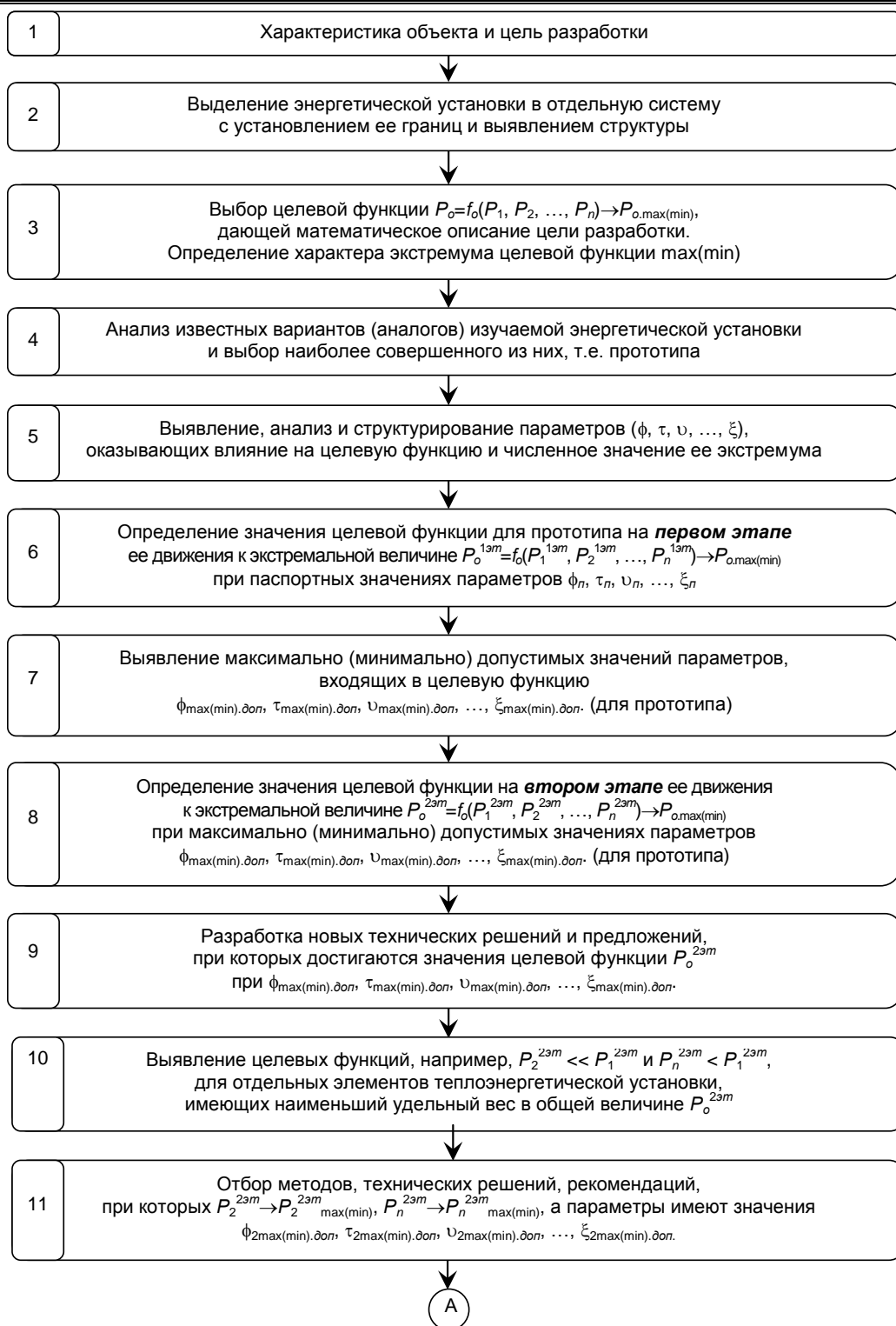
Затем устанавливается цель разработки, например, увеличение интенсивности теплообмена до какого-то заданного или максимально возможного на данном этапе значения.

По отношению к рассматриваемому объекту может быть поставлено, а затем и достигнуто несколько целей разработки. При этом цели могут быть условно разделены на узко и широко направленные, решение которых целесообразно осуществлять на разных иерархических уровнях.

Например, для ТПУ на первом иерархическом уровне могут быть поставлены и реализованы следующие узконаправленные цели разработки:

- 1) увеличение интенсивности теплообмена;
- 2) снижение гидродинамических сопротивлений;
- 3) повышение прочности конструктивных элементов;
- 4) повышение уровня многофункциональности отдельных элементов.

На втором иерархическом уровне могут быть поставлены и реализованы такие широконаправленные цели разработки, как снижение металлоемкости, повышение надежности, безопасности. Такое разделение целесообразно с учетом того, что широконаправленные цели разработки второго иерархического уровня не могут быть реализованы без реализации отдельных целей первого иерархического уровня. Например, для снижения металлоемкости теплоэнергопотребляющей установки необходимо сначала реализовать такие цели первого иерархического уровня, как: увеличение интенсивности теплообмена; повышение прочности конструктивных элементов; повышение уровня многофункциональности отдельных элементов.



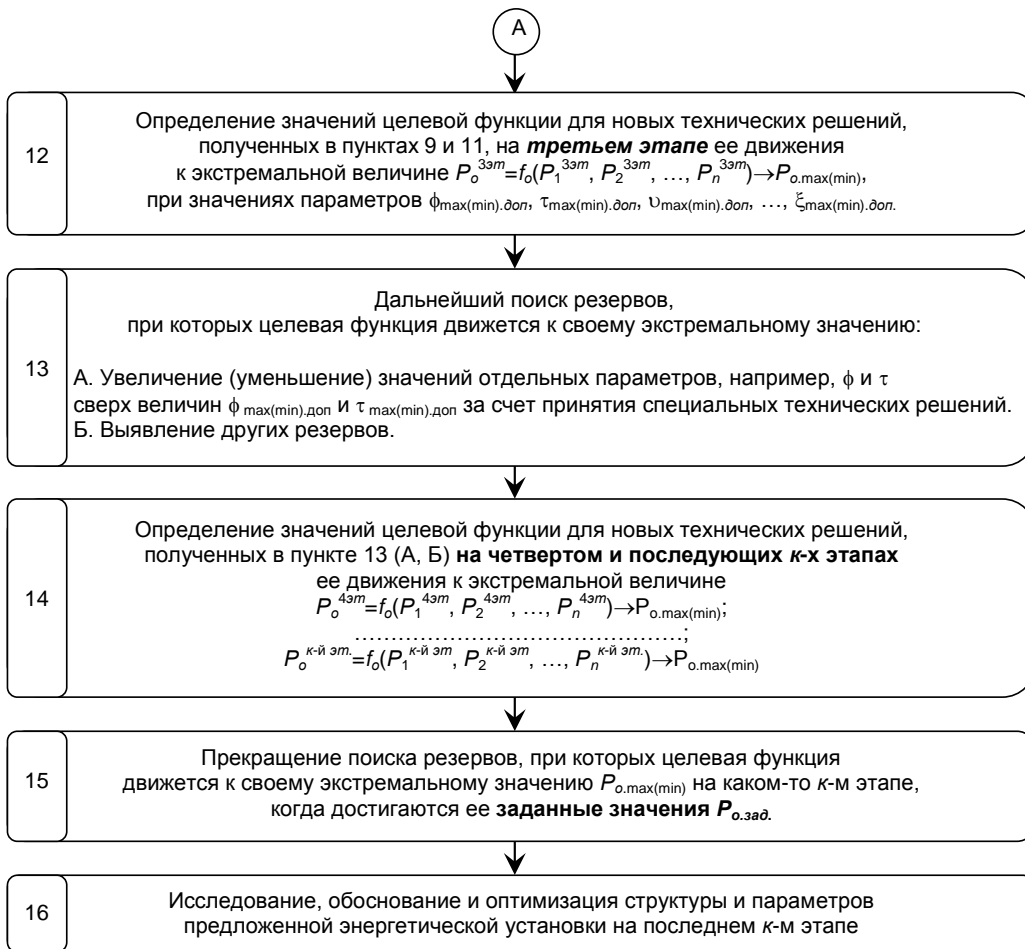


Рис. 1. Последовательность разработки новых теплоэнергетических установок с заданным значением целевой функции

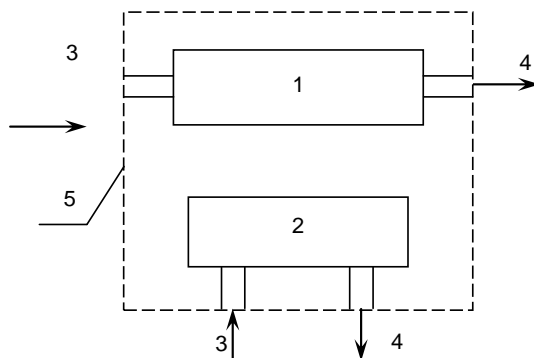


Рис. 2. Структурная схема энергетической установки как отдельной системы с указанием ее границ: 1, 2 – элементы энергетической установки; 3, 4 – входные и выходные связи; 5 – границы рассматриваемого устройства

2. Выделение ТЭУ в отдельную систему с установлением ее границ и выявлением структуры.

Разработка структурной схемы ТЭУ осуществляется как отдельной системы, т.е. совокупности элементов, объединенных одной общей для всех элементов целью (одним назначением). Например, система промышленного энергогазоснабжения на базе сжиженного углеводородного газа (СУГ), состоящая из газоиспользующих аппаратов, промышленного испарителя, газораспределительного пункта, сосудов для хранения СУГ и соединяющих их газопроводов, объединена одной общей для всех указанных элементов целью, – обеспечение бесперебойной подачи топлива потребителю.

Затем устанавливаются связи между отдельными элементами этой отдельной системы и ее границы. Границами ТЭУ как системы являются входные и выходные внешние связи (тепло-, электро-, газо-, водо-, воздухопроводы, любые другие коммуникации, наружные поверхности оболочки, в которую заключен данный элемент).

Переход от реальной теплоэнергетической установки к ее структурной схеме позволяет в дальнейшем более эффективно осуществлять разработку новой установки в нужном направлении в соответствии с заданной целью. Образец структурной схемы энергетической установки как отдельной системы с указанием ее границ приведен на рис. 2.

Вместе с тем, любой элемент всегда может быть выделен в отдельную систему. Система, из которой этот элемент был выделен, является по отношению к нему внешней. Внешних систем по отношению к рассматриваемой всегда несколько. Например, испаритель СУГ с промежуточным теплоносителем можно выделить из системы газоснабжения в отдельную систему. Здесь испарительный и нагревательный элементы испарителя СУГ, размещенные в корпусе с промежуточным теплоносителем, тепловая изоляция корпуса, объединены одной общей для всех указанных элементов целью, – превращение жидкой фазы СУГ в паровую. Границами испарителя СУГ являются вход трубопровода жидкой фазы и выход трубопровода паровой фазы. Система газоснабжения по отношению к испарителю СУГ является внешней.

В связи со всем вышесказанным, очень важно правильно выделить рассматриваемую ТЭУ как отдельную систему, установить границы этой системы, выявить системы, которые по отношению к рассматриваемой являются внешними.

3. Выбор целевой функции, дающей математическое описание цели разработки. Определение характера экстремума целевой функции (max, min).

При выборе следует руководствоваться тем, что целевая функция должна обеспечивать полное математическое описание цели разработки для выбранного объекта и возможность определения экстремума, к которому она должна стремиться.

В общем случае целевая функция P_o для ТЭУ стремится к своему экстремальному значению $\rightarrow P_{o,max (min)}$ т.е.:

$$P_o = f_o(P_1, P_2, \dots, P_n) \rightarrow P_{o,max (min)}, \tag{1}$$

где

$$P_1 = f_1(\phi_1, \tau_1, u_1 \dots, \xi_1) \rightarrow P_{1,max (min)}; \tag{2}$$

$$P_2 = f_2(\phi_2, \tau_2, u_2 \dots, \xi_2) \rightarrow P_{2,max (min)}; \tag{3}$$

$$P_n = f_n(\phi_n, \tau_n, u_n \dots, \xi_n) \rightarrow P_{n,max (min)}. \tag{4}$$

Здесь P_1, P_2, P_n – соответственно целевые функции отдельных элементов ТЭУ; $\phi_1, \tau_1, \xi_1, \phi_2, \tau_2, \xi_2, \phi_n, \tau_n, \dots, \xi_n$ – соответственно параметры, входящие в целевые функции P_1, P_2, P_n отдельных элементов ТЭУ

В качестве целевой функции для теплоэнергогенерирующей установки может использоваться коэффициент полезного действия η или коэффициент использования первичной энергии топлива КПЭ.

В качестве целевой функции для всей энергопотребляющей установки может использоваться коэффициент теплопередачи K , а для отдельных элементов ТЭУ -коэффициенты теплоотдачи α :

$$K_o = f_o[\alpha_1, \alpha_2, \lambda_C / \delta_C, \sum \lambda_3 / \delta_3 \dots] \rightarrow K_{o,max}; \quad (5)$$

$$\alpha_1 = f_1(u_1, \rho_1, \mu_1, t_1, P_1, \beta_1, \Gamma_1 \dots) \rightarrow \alpha_{1,max}; \quad (6)$$

$$\alpha_2 = f_2(u_2, \rho_2, \mu_2, t_2, P_2, \beta_2, \Gamma_2 \dots) \rightarrow \alpha_{2,max}, \quad (7)$$

где α_1 – коэффициент теплоотдачи от теплопередающей среды к стенке ТПУ, Вт/(м²·К); δ_C, δ_3 – соответственно толщина стенки и загрязнений (отложений) на ее поверхности, м; λ_C, λ_3 – соответственно коэффициент теплопроводности стенки теплообменного устройства, загрязнений и отложений, Вт/(м·К); α_2 – коэффициент теплоотдачи от стенки устройства к теплопринимающей среде, Вт/(м²·К); $u_1, \rho_1, \mu_1, t_1, P_1 \dots$ – соответственно скорость течения, плотность, коэффициент динамической вязкости, температура, давление и другие параметры теплопередающей среды; $u_2, \rho_2, \mu_2, t_2, P_2 \dots$ – соответственно скорость течения, плотность, коэффициент динамической вязкости, температура, давление и другие параметры теплопринимающей среды; β_1, β_2 – соответственно факторы, учитывающие состав, примеси, добавки теплопередающей и теплопринимающей сред; Γ_1, Γ_2 – геометрические факторы: шероховатость, выступы, оребрение и т.п. со стороны теплопередающей и теплопринимающей сред.

4. Выявление и анализ известных аналогов. Выбор прототипа.

Выявление аналогов ТЭУ, т.е. устройств такого же назначения осуществляется в результате обзора патентов, авторских свидетельств, научной литературы, справочников.

Прототип, т.е. наиболее близкий по физической сущности к изучаемой ТЭУ, выбирается путем сравнения из числа выявленных аналогов. Прототип должен иметь наибольшее значение целевой функции из всех сравниваемых аналогов данного типа. После выбора прототипа осуществляется проверка соответствия его структурной схеме и ее уточнения при необходимости.

5. Выявление, анализ и структурирование параметров, оказывающих влияние на целевую функцию и численное значение ее экстремума.

Выявление и анализ параметров осуществляются совместно с составлением развернутых выражений целевой функции P_1, P_2, P_n , для отдельных элементов прототипа ТЭУ, рассматриваемого в пункте 4. При описании и анализе особое внимание следует уделить параметрам, негативно влияющим на достижение цели, т.е. удаляющим величину целевой функции от своего экстремального значения.

Для выявления и анализа параметров используются все имеющиеся информационные источники по тематике, связанной с объектом и целью разработки: учебники, справочники, СНиПы, ГОСТы, патенты, статьи и т.п. на бумажном и электронном носителях. Для оперативного и эффективного выявления параметров целесообразно использовать методы направленного поиска, особенно библиотечные фонды основных отечественных и зарубежных библиотек, к которым имеется доступ через сеть Internet.

Все выявленные параметры, влияющие на достижение поставленной цели, т.е. на экстремум целевой функции, показаны на рис. 3 в виде структурной схемы.

Так, применительно к ТПУ, выявление и анализ параметров, влияющих на экстремум целевых функций α_1 и α_2 , осуществляется по учебной, научной и справочной литературе по тепломассообмену, периодическим научным изданиям, СНиП и т.п. Параметрами, влияющими здесь на достижение цели, т.е. когда целевая функция стремится к экстремальному значению, являются соответственно: скорости течения u_1, u_2 ; плотности ρ_1, ρ_2 ; коэффициенты динамической вязкости μ_1, μ_2 ; температура t_1, t_2 ; давление P_1, P_2 ; факторы, учитывающие состав теплопередающей и теплопринимающей сред ϕ_1, ϕ_2 ; факторы, учитывающие при-

меси, добавки в теплопередающей и тепловоспринимающей средах β_1, β_2 ; тепловые нагрузки q_1, q_2 и ряд других параметров для теплопередающей и тепловоспринимающей сред.

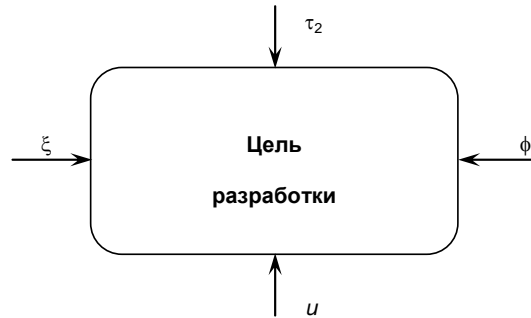


Рис. 3. Структурная схема параметров, влияющих на целевую функцию:
 $\phi, \tau, u, \dots, \xi$ – параметры, влияющие на целевую функцию

Негативными факторами, отрицательно влияющими на цель, т.е. на интенсивность теплообмена, и требующими своего учета, являются: наличие компонентов и примесей в составе теплопередающей и тепловоспринимающей сред ϕ_1, ϕ_2 , которые при повышении температуры, давления до определенной величины, вызывают осаждение, полимеризацию, подгорание на поверхностях теплообмена, образование полимерной пленки; возникновение кризисов кипения и, как следствие, уменьшение интенсивности теплообмена.

6. Определение значения целевой функции для прототипа на первом этапе.

Вычисление значения целевой функции $P_o^{1\Delta m}, P_1^{1\Delta m}, P_2^{1\Delta m}, P_n^{1\Delta m}$ для прототипа на первом этапе своего движения к экстремальной величине $P_{\max(\min)}$ осуществляется при паспортных значениях (n) параметров $\phi_{1П}, \tau_{1П}, u_{1П}, \dots, \xi_{1П}$.

В этом случае целевая функция примет следующий вид:

$$P_o^{1\Delta m} = f_o(P_1^{1\Delta m}, P_2^{1\Delta m}, \dots, P_n^{1\Delta m}); \tag{8}$$

$$P_1^{1\Delta m} = f_1(\phi_{1П}, \tau_{1П}, u_{1П}, \dots, \xi_{1П}); \tag{9}$$

$$P_2^{1\Delta m} = f_2(\phi_{2П}, \tau_{2П}, u_{2П}, \dots, \xi_{2П}); \tag{10}$$

$$P_n^{1\Delta m} = f_n(\phi_{nП}, \tau_{nП}, u_{nП}, \dots, \xi_{nП}). \tag{11}$$

Значения параметров, входящих в целевые функции $P_o^{1\Delta m}, P_1^{1\Delta m}, P_2^{1\Delta m}, P_n^{1\Delta m}$, на первом этапе принимаются на основе технического паспорта (технических характеристик) для прототипа существующей конструкции теплоэнергетической установки. Например, для испарителя СУГ в качестве значений параметров, входящих в целевые функции, принимаются производительность (кг/ч), давление (МПа), температура (°C), тип и состав сред и т.п.

7. Выявление максимально (минимально) допустимых значений параметров для прототипа.

Максимально (минимально) допустимыми значениями параметров являются такие, при превышении которых нарушается нормальный режим эксплуатации ТЭУ.

Осуществляется путем анализа ограничений и требований в международных и отечественных нормативных документах (ГОСТ, СНиП, Правила и т.п.) по рассматриваемым вопросам, а при необходимости путем проведения специальных исследований.

Так, для формул (9)-(11) указанные максимально (минимально) допустимые значения параметров составят:

$$\begin{aligned} & \phi_{1.\max(\min).\text{дон}}, \tau_{1.\max(\min).\text{дон}}, u_{1.\max(\min).\text{дон}}, \dots, \xi_{1.\max(\min).\text{дон}}; \\ & \phi_{2.\max(\min).\text{дон}}, \tau_{2.\max(\min).\text{дон}}, u_{2.\max(\min).\text{дон}}, \dots, \xi_{2.\max(\min).\text{дон}}; \\ & \phi_{n.\max(\min).\text{дон}}, \tau_{n.\max(\min).\text{дон}}, u_{n.\max(\min).\text{дон}}, \dots, \xi_{n.\max(\min).\text{дон}}. \end{aligned}$$

Например, температура на поверхности теплообмена t в системах регазификации сжиженных углеводородных газов не должна повышаться до максимально допустимых значений, т.е. $t_1 < t_{\max.\text{дон}}$ в связи с опасностью полимеризации непредельных пропиленовых и бутиленовых углеводородов. Температура полимеризации $t_{\text{пол}}$ непредельных пропиленовых и бутиленовых углеводородов согласно анализу начинается при ее значениях свыше 70°C . Тогда $t_{\max.\text{дон}} = t_{\text{пол}} = 70^\circ\text{C}$.

8. Определение значения целевой функции на втором этапе ее движения к экстремальной величине (для прототипа).

$$P_o^{2\text{Эм}} = f_o(P_1^{2\text{Эм}}, P_2^{2\text{Эм}}, \dots, P_n^{2\text{Эм}}) \rightarrow P_{\max(\min)}^{2\text{Эм}}.$$

Определение значения целевой функции $P_o^{2\text{Эм}}$ осуществляется при максимально и минимально допустимых величинах параметров $\phi_{\max(\min).\text{дон}}, \tau_{\max(\min).\text{дон}}, u_{\max(\min).\text{дон}}, \dots, \xi_{\max(\min).\text{дон}}$. С учетом ограничений, рассматриваемых в пункте 7.

В этом случае целевая функция примет следующий вид:

$$P_o^{2\text{Эм}} = f_o(P_1^{2\text{Эм}}, P_2^{2\text{Эм}}, \dots, P_n^{2\text{Эм}}) \rightarrow P_{o.\max(\min)}^{2\text{Эм}}; \quad (12)$$

$$P_1^{2\text{Эм}} = f_1(\phi_{1.\max(\min).\text{дон}}, \tau_{1.\max(\min).\text{дон}}, u_{1.\max(\min).\text{дон}}, \dots, \xi_{1.\max(\min).\text{дон}}) \rightarrow P_{1.\max(\min)}^{2\text{Эм}}; \quad (13)$$

$$P_2^{2\text{Эм}} = f_2(\phi_{2.\max(\min).\text{дон}}, \tau_{2.\max(\min).\text{дон}}, u_{2.\max(\min).\text{дон}}, \dots, \xi_{2.\max(\min).\text{дон}}) \rightarrow P_{2.\max(\min)}^{2\text{Эм}}; \quad (14)$$

$$P_n^{2\text{Эм}} = f_n(\phi_{n.\max(\min).\text{дон}}, \tau_{n.\max(\min).\text{дон}}, u_{n.\max(\min).\text{дон}}, \dots, \xi_{n.\max(\min).\text{дон}}) \rightarrow P_{n.\max(\min)}^{2\text{Эм}}. \quad (15)$$

Например, применительно к энергопотребляющим установкам, в качестве целевой функции приняты коэффициенты теплопередачи и теплоотдачи $K_o^{2\text{Эм}}, \alpha_1^{2\text{Эм}}, \alpha_2^{2\text{Эм}}$, рассмотренные в пункте 5, достигаемые при максимально (минимально) допустимых значениях входящих в нее параметров, на втором этапе ее движения к экстремальной величине (для прототипа):

$$K_o^{2\text{Эм}} = f(\alpha_1^{2\text{Эм}}, \alpha_2^{2\text{Эм}}, (\lambda_c / \delta_c)_2^{2\text{Эм}}, (\lambda_3 / \delta_3)_2^{2\text{Эм}} \dots) \rightarrow K_{o.\max}^{2\text{Эм}}; \quad (16)$$

$$\alpha_1^{2\text{Эм}} = f_1(u_{1.\max.\text{дон}}, \rho_{1.\max.\text{дон}}, \mu_{1.\max.\text{дон}}, t_{1.\max.\text{дон}}, P_{1.\max.\text{дон}}, \beta_{1.\max.\text{дон}}, \Gamma_{1.\max.\text{дон}}) \rightarrow \alpha_{1.\max}^{2\text{Эм}}; \quad (17)$$

$$\alpha_2^{2\text{Эм}} = f_2(u_{2.\max.\text{дон}}, \rho_{2.\max.\text{дон}}, \mu_{2.\max.\text{дон}}, t_{2.\max.\text{дон}}, P_{2.\max.\text{дон}}, \beta_{2.\max.\text{дон}}, \Gamma_{2.\max.\text{дон}}) \rightarrow \alpha_{2.\max}^{2\text{Эм}}. \quad (18)$$

9. Разработка новых технических решений и предложений, при которых достигаются значения целевой функции $P_o^{2\text{Эм}}$, полученные на втором этапе ее движения к $P_{o.\max(\min)}^{2\text{Эм}}$.

Если конструкция прототипа не обеспечивает возможность получения значения целевой функции $P_o^{2\text{Эм}}$, осуществляются поиск, подбор и разработка новых технических решений, позволяющих реализовать значения $P_o^{2\text{Эм}}, P_1^{2\text{Эм}}, P_2^{2\text{Эм}}, P_n^{2\text{Эм}}$ при максимально (минимально) допустимых значениях входящих в нее параметров $\phi_{\max(\min).\text{дон}}, \tau_{\max(\min).\text{дон}}, u_{\max(\min).\text{дон}}, \dots, \xi_{\max(\min).\text{дон}}$, с учетом ограничений, рассматриваемых в пункте 7.

После разработки новых технических решений и предложений проверяется возможность реализации значения целевой функции на втором этапе $P_o^{2\text{Эм}}$ ее движения к $P_{o.\max(\min)}^{2\text{Эм}}$. Поскольку полученная конструкция имеет новые отличительные признаки по сравнению с прототипом и позволяет получить *новый технический результат, то ее следует считать новой.*

10. Выявление значений целевых функций для отдельных элементов ТЭУ, имеющих наименьший удельный вес в общей величине $P_o^{2\omega m}$.

Сравнивая между собой целевые функции $P_1^{2\omega m}, P_2^{2\omega m}, P_n^{2\omega m}$ в формулах (13)-(15) для отдельных элементов ТЭУ, отбираем те, которые имеют наименьший удельный вес в общей величине $P_o^{2\omega m}$. Например, наименьший удельный вес в общей величине $P_o^{2\omega m}$ имеют целевые функции $P_2^{2\omega m}$ и $P_n^{2\omega m}$. При этом $P_2^{2\omega m} \ll P_1^{2\omega m}$ и $P_n^{2\omega m} < P_1^{2\omega m}$.

Результаты сравнения показывают, что для дальнейшего движения $P_o^{2\omega m}$ к экстремальной величине $P_{o, \max(\min)}^{2\omega m}$ необходимо обеспечить, чтобы $P_2^{2\omega m} \rightarrow P_{2, \max(\min)}$ и $P_n^{2\omega m} \rightarrow P_{n, \max(\min)}$.

11. Отбор методов, технических решений, рекомендаций, при которых $P_2^{2\omega m} \rightarrow P_{2, \max(\min)}$ и $P_n^{2\omega m} \rightarrow P_{n, \max(\min)}$.

Так, если при движении $P_o^{3\omega m}$ к максимально возможной величине $P_{o, \max}$, для целевых функций отдельных элементов ТЭУ имеют место следующие соотношения: $P_2^{2\omega m} \ll P_1^{2\omega m}$ и $P_n^{2\omega m} < P_1^{2\omega m}$, то целесообразно выполнить анализ и отбор методов, конструктивных решений, рекомендаций, способствующих достижению максимально возможных величин целевых функций $P_{2, \max(\min)}$ и $P_{n, \max(\min)}$ отдельных элементов ТЭУ. При этом параметры, входящие в целевые функции $P_{2, \max(\min)}$ и $P_{n, \max(\min)}$, должны иметь значения соответственно: $\phi_{2, \max(\min), \text{дон}}$, $\tau_{2, \max(\min), \text{дон}}$, $u_{2, \max(\min), \text{дон}}$, ..., $\xi_{2, \max(\min), \text{дон}}$;

$$(\phi_{n, \max(\min), \text{дон}}, \tau_{n, \max(\min), \text{дон}}, u_{n, \max(\min), \text{дон}}, \dots, \xi_{n, \max(\min), \text{дон}}).$$

Для выявления и анализа методов, конструктивных элементов, рекомендаций, способствующих достижению максимально возможных величин целевых функций $P_{2, \max(\min)}$ и $P_{n, \max(\min)}$ отдельных элементов ТЭУ, используются все имеющиеся информационные источники по тематике, связанной с объектом и целью разработки: учебники, справочники, СНиПы, ГОСТы, патенты, статьи и т.п. на бумажном и электронном носителях. Для оперативно и эффективно выявления методов, конструктивных элементов, рекомендаций целесообразно использовать направленный поиск в библиотечных фондах основных отечественных и зарубежных библиотек, к которым имеется доступ через сеть Internet.

Например, если $K_o^{2\omega m} = f[\alpha_1^{2\omega m}, \alpha_2^{2\omega m}, (\lambda_c / \delta_c)_2^{2\omega m}, (\lambda_3 / \delta_3)_2^{2\omega m} \dots]$, а для целевых функций отдельных элементов ТЭУ имеет место следующее соотношение $\alpha_1^{2\omega m} > \alpha_2^{2\omega m}$ с целью достижения максимально возможного значения коэффициента теплоотдачи $\alpha_{2, \max}^{2\omega m}$, рекомендуется использовать оребрение, выступы, шероховатости, замену одной из теплообменивающихся сред, замену материала стенок теплообменника.

При этом параметры, влияющие на целевую функцию $\alpha_2^{2\omega m}$, должны сохранять свои максимально допустимые значения: $\phi_{2, \max, \text{дон}}$, $\tau_{2, \max, \text{дон}}$, $u_{2, \max, \text{дон}}$, ..., $\xi_{2, \max, \text{дон}}$.

12. Определение значения целевой функции на третьем этапе ее движения к экстремальной величине (для новых технических решений, полученных в пункте 11)

Определение значения целевой функции $P_o^{3\omega m}$ осуществляется при максимально (минимально) допустимых величинах параметров $\phi_{\max(\min), \text{дон}}$, $\tau_{\max(\min), \text{дон}}$, $u_{\max(\min), \text{дон}}$, ..., $\xi_{\max(\min), \text{дон}}$ с учетом ограничений, рассматриваемых в пункте 7.

В этом случае целевая функция примет следующий вид:

$$P_o^{3\omega m} = f_o(P_1^{2\omega m}, P_2^{2\omega m}, \dots, P_n^{2\omega m}) \rightarrow P_{o, \max(\min)}^{2\omega m}; \quad (19)$$

$$P_1^{2Эм} = f_1(\phi_{1.\max(\min).дон}, \tau_{1.\max(\min).дон}, u_{1.\max(\min).дон}, \dots, \xi_{1.\max(\min).дон}) \rightarrow P_{1.\max(\min)}^{3Эм}; \quad (20)$$

$$P_2^{3Эм} = f_2(\phi_{2.\max(\min).дон}, \tau_{2.\max(\min).дон}, u_{2.\max(\min).дон}, \dots, \xi_{2.\max(\min).дон}) \rightarrow P_{2.\max(\min)}^{3Эм}; \quad (21)$$

$$P_n^{3Эм} = f_n(\phi_{n.\max(\min).дон}, \tau_{n.\max(\min).дон}, u_{n.\max(\min).дон}, \dots, \xi_{n.\max(\min).дон}) \rightarrow P_{n.\max(\min)}^{3Эм}. \quad (22)$$

13. Дальнейший поиск резервов, при которых целевая функция движется к своему экстремальному значению.

В качестве таких резервов может иметь место:

А. Увеличение (уменьшение) значений отдельных параметров, например (ϕ и τ сверх величин $\phi_{\max(\min).дон}$, $\tau_{\max(\min).дон}$ за счет принятия специальных технических решений.

Б. Выявление других резервов.

14. Определение значения целевой функции для новых технических решений, полученных в пунктах 13.А и 13.Б, на четвертом и последующих k -х этапах ее движения к экстремальной величине

$$P_o^{4Эм} = f_o(P_1^{4Эм}, P_2^{4Эм}, \dots, P_n^{4Эм}) \rightarrow P_{\max(\min)};$$

$$\dots\dots\dots;$$

$$P_o^{kЭм} = f_o(P_1^{kЭм}, P_2^{kЭм}, \dots, P_n^{kЭм}) \rightarrow P_{\max(\min)}$$

при значениях параметров $\phi_{\max(\min).дон}$, $\tau_{\max(\min).дон}$, $u_{\max(\min).дон}$, ..., $\xi_{\max(\min).дон}$.

Примерный характер поэтапного движения целевой функции к экстремальной величине приведен на графике (рис. 4). Из графика видно, что на каждом последующем этапе целевая функция приближается к какому-то экстремальному значению.

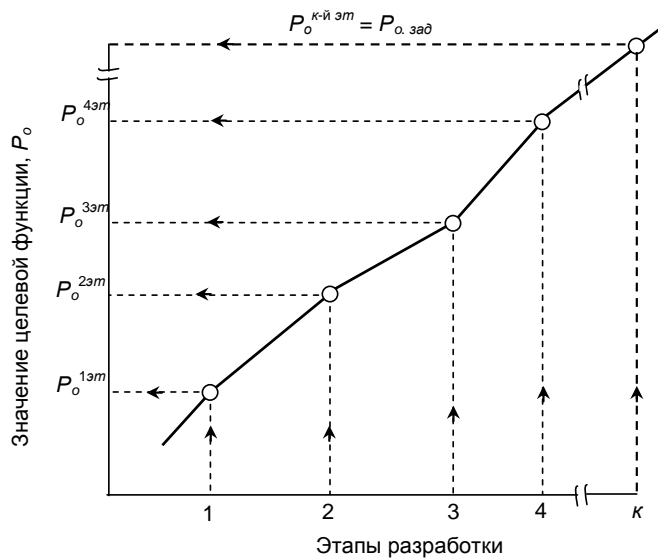


Рис. 4. Примерный характер изменения целевой функции при ее движении к экстремальной величине $P_{\max(\min)}$

15. Прекращение поиска резервов, при которых целевая функция движется к своему экстремальному значению $P_{o.\max(\min)}^{kЭм}$ на каком-то k -м этапе, когда достигается заданное значение.

Вероятно, абсолютного экстремального значения не существует, поскольку каждое последующее значение $P_o^{к.Эм}$ на k -м этапе обусловлено новым техническим предложением, которых может быть неопределенно много.

В связи с этим, разработчик должен обоснованно прекратить поиск резервов и принять к дальнейшей разработке и исследованиям значение целевой функции на каком-то k -м этапе, которое будет считаться заданным, т.е. $P_{о.зд}$.

16. Исследование, обоснование и оптимизация структуры и параметров предложенной на k -м этапе ТЭУ.

Следует иметь в виду, что в конечном итоге после разработки технической документации, изготовления экспериментального образца нового устройства, его испытаний и/или исследований, определения закономерности изменения основных конструктивных, геометрических и эксплуатационных параметров, должны быть проведены детальное обоснование и многоцелевая оптимизация структуры и параметров предлагаемого устройства. При этом, для ТЭУ, в качестве основного критерия оптимизации одной из целевых функций принимается минимум интегральных затрат.

В качестве дополнительного критерия оптимизации принимается рассмотренное выше максимальное (минимальное) значение целевой функции на k -м этапе.

Выводы

1. Предложен метод разработки новых энергетических установок на основе системного подхода, позволяющий реализовывать: наиболее полное, объективное и всестороннее рассмотрение поставленной задачи; выявление всей совокупности факторов и ограничений, позитивно и негативно влияющих на достижение поставленной цели; создание энергетических установок с максимально возможными показателями, полученными при решении поставленной задачи.

2. Применение предложенного метода позволяет в значительной степени уменьшить вероятность отрицательных результатов при разработке новых инвестиционных проектов с высоким уровнем рисков и тем самым повысить гарантированность вложений капитала при венчурном финансировании.

3. Разработана структурная схема, раскрывающая последовательность разработки новых теплоэнергетических установок на основе системного подхода.

4. Показано использование системного подхода применительно к разработке установок регазификации сжиженного углеводородного газа с высокой интенсивностью теплообмена.

5. Предложенный метод разработки новых энергетических установок на основе системного подхода может быть применен для любых других устройств с учетом особенностей их функционирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Правила составления, подачи и рассмотрения заявки на выдачу патента на изобретение // Патенты и лицензии. 1998. № 12. С. 2-32.
2. Системные исследования в энергетике в новых социально-экономических условиях / В.П. Булатов, Н.И. Воропай, А.З. Гамм и др. Новосибирск: Наука, 1995. 189 с.
3. Андрющенко А.И. Оптимизация режимов работы и параметров тепловых станций / А.И. Андрющенко, Р.З. Аминов. М.: Высшая школа, 1983. 225 с.
4. Попырин Л.С. Математическое моделирование и оптимизация теплоэнергетических установок / Л.С. Попырин. М.: Энергия, 1978. 416 с.
5. Усачев А.П. Структурирование и определение внешних связей сберегающих систем энергоснабжения малых потребителей / А.П. Усачев // Вопросы совершенствования региональных энергетических систем и комплексов: сб. науч. трудов. Саратов: СГТУ, 1999. С. 74-81.

6. Применение системного подхода к разработке установок регазификации сжиженного углеводородного газа с высокой интенсивностью теплообмена / А.П. Усачев, А.Ю. Фролов, А.В. Рулев // Научно-технические проблемы совершенствования и развития систем газоэнергоснабжения: сб. науч. трудов. Саратов: СГТУ, 2007. С. 90-107.

Усачев Александр Прокофьевич –

доктор технических наук, профессор кафедры «Теплогасоснабжение и вентиляция» Саратовского государственного технического университета

Шурайц Александр Лазеревич –

кандидат технических наук, профессор кафедры «Теплогасоснабжение и вентиляция» Саратовского государственного технического университета, генеральный директор ОАО «Гипрониигаз», г. Саратов

Феоктистов Александр Анатольевич –

начальник отдела распределения и использования газа Ростехнадзора РФ, г. Москва

Каргин Владимир Юрьевич –

начальник эксплуатационного центра ОАО «Гипрониигаз», г. Саратов

Фролов Алексей Юрьевич –

кандидат технических наук, ассистент кафедры «Теплогасоснабжение и вентиляция» Саратовского государственного технического университета

Рулев Александр Владимирович –

ассистент кафедры «Теплогасоснабжение и вентиляция» Саратовского государственного технического университета

Усачева Татьяна Александровна –

аспирант кафедры «Теплогасоснабжение и вентиляция» Саратовского государственного технического университета

Статья поступила в редакцию 06.09.07, принята к опубликованию 05.12.07

УДК 621.6.036

А.Л. Шурайц, А.П. Усачев, А.Ю. Фролов, А.В. Рулев, Т.А.Усачева

ПОВЫШЕНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРОМЫШЛЕННОГО РЕГАЗИФИКАТОРА СЖИЖЕННОГО УГЛЕВОДОРОДНОГО ГАЗА С ТВЕРДОТЕЛЬНЫМ ПРОМЕЖУТОЧНЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

Разработана математическая модель технико-экономического сравнения электрических промышленных регазификаторов (ЭПР) с твердотельным промежуточным теплоносителем (ТПТ), в зависимости от ряда управляющих параметров. Проведенное технико-экономическое сравнение показывает, что предлагаемая конструкция ЭПР с ТПТ из алюминиевой заливки с цилиндрической полостью в ее центральной части обеспечивает

экономический эффект в размере 32% по сравнению с существующим ЭИР с ТПТ из алюминиевой заливки без цилиндрической полости.

A.L. Shurajts, A.P. Usachev, A.Yu. Frolov, A.V. Rulev, T.A.Usacheva

ECONOMIC EFFICIENCY INCREASE OF ELECTRIC INDUSTRIAL EVAPORATOR OF LIQUID HYDROCARBONIC GAS SOLIDSTATE INTERMEDIATE HEATCARRIER

The mathematical model of technical and economic comparison of electric industrial evaporators (EIE) with solid state intermediate heat carrier (SIH) depending on some operating parameters is developed here. The lead technical and economic comparison offered design EIE with SIH from aluminum shows, that filling with cylindrical cavity in its central part, provides economic benefit at rate of 32 % in comparison with existing EIE with SIH from aluminum filling without cylindrical cavity.

С целью повышения интенсивности теплообмена и эффективности использования электрических промышленных регазификаторов сжиженного углеводородного газа (СУГ) в работах [1, 4] был предложен и обоснован твердотельный промежуточный теплоноситель из алюминия, а в работе [5] определены его отдельные геометрические параметры.

По сравнению с существующим жидким промежуточным теплоносителем на основе антифризов, т.е. водных растворов многоатомных спиртов, не замерзающих при температурах до -40°C , твердотельный промежуточный теплоноситель обладает рядом преимуществ.

1. Промышленные регазификаторы с ТПТ не требуют замены промежуточного теплоносителя в течение всего срока службы $T=25$ лет, в то время как жидкий промежуточный теплоноситель, например антифриз марки «Тосол-40 АМ» теряет полезные свойства через 7500-8000 часов непрерывной работы и подлежит замене не реже одного раза в год [2].

2. Значительно, в 2,5-3 раза увеличивается коэффициент теплопередачи между твердым теплоносителем из алюминия и кипящим СУГ, а следовательно, адекватно уменьшаются капиталовложения в испарительное устройство, промежуточный теплоноситель, корпус, тепловую изоляцию, защитный кожух. Средний коэффициент теплопередачи между заливкой из алюминия и кипящим СУГ составляет $950-1000 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ [1], в то время как между антифризом марки «Тосол-40АМ» и кипящим СУГ он составляет $350-380 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ [3].

3. Нагревательные и испарительные устройства, залитые в алюминий, в отличие от антифриза, не требуют периодической очистки наружных поверхностей от загрязнений [2], снижающих интенсивность теплообмена.

Результаты технико-экономического сравнения указанных вариантов промышленных регазификаторов с жидким и твердотельными промежуточными теплоносителями СУГ показали [4], что наиболее экономичным является применение электрического регазификатора СУГ с ТПТ.

С целью дальнейшего повышения экономической эффективности применения твердотельного промежуточного теплоносителя согласно поданной заявке на полезную модель предлагается *сократить* материало- и капиталоемкость твердотельного промежуточного теплоносителя путем:

1) исключения заливки алюминием его центральной цилиндрической части диаметром $D_{\text{ю}}$, так, как это показано на рисунке; при этом толщина слоя алюминиевой заливки в свету $\delta_{\text{ю}}$ между боковой поверхностью образовавшейся цилиндрической полости 9 и группой трубчатых электронагревателей 3 выбрана таким образом, чтобы не повысить температуру указанного слоя в радиальном направлении по сравнению с ТПТ из алюминиевой заливки без цилиндрической полости в ее центральной части;

2) переноса датчика температуры и термopедохранителя ТПТ из его центральной цилиндрической части в периферийную; при этом толщина слоя алюминиевой заливки в свету δ_{10} между боковой поверхностью термopедохранителя и образовавшейся цилиндрической полостью 9 выбрана таким образом, чтобы не понизить температуру указанного слоя в радиальном направлении по сравнению с ТПТ из алюминиевой заливки без цилиндрической полости в ее центральной части.

Технико-экономическое обоснование осуществляется путем сравнения капитальных вложений в ТПТ предлагаемого и базового вариантов:

1) вариант (базовый): электрический испаритель с ТПТ с алюминиевой заливкой всего внутреннего объема корпуса (без пустот);

2) вариант (предлагаемый): электрический испаритель с ТПТ из алюминиевой заливки с цилиндрической полостью, заполненной воздухом, в ее центральной части.

Расчетная схема сравниваемых вариантов электрических испарителей с твердотельным промежуточным теплоносителем приведена на рисунке. На расчетной схеме сравниваемые варианты приведены к единой структуре, т.е. к одинаковой форме и имеют одинаковое количество элементов P_i : 1) змеевиковое испарительное устройство ($P_i=1$); 2) промежуточный теплоноситель ($P_i=2$); 3) трубчатые электронагреватели ($P_i=3$); 4) корпус испарителя ($P_i=4$); 5) тепловая изоляция ($P_i=5$); 6) защитный футляр ($P_i=6$); 7) датчик температуры ($P_i=7$); 8) термopедохранитель ($P_i=8$); 9) цилиндрическая полость ($P_i=9$) в центральной части ТПТ.

На рисунке геометрические параметры сравниваемых вариантов: d_{i1} , $D_{i1} \div D_{i6}$, L_{i1} , S_{i2} , $h_{i1} \div h_{i6}$, $\delta_{i1} \div \delta_{i6}$, b_{i2} , c_{i2} , a_{i2} также приняты однотипными.

В первом, базовом варианте ЭПР внутренний объем корпуса 4, с расположенными внутри него змеевиковым испарительным устройством 1, пятью рабочими и пятью резервными U-образными трубчатыми электронагревателями 3, расположенными по окружности диаметром D_{13} , датчиком температуры 7 и термopедохранителем 8 в центральной части, полностью (без пустот) заливается расплавленным алюминием 2. При этом, следуя практическим рекомендациям и согласно результатам исследований геометрических параметров [5], приняты следующие размеры: $S_{12}=0,014$ м; $\delta_{12}=0,01$ м; $b_{12}=0,05$ м; $c_{12}=0,05$ м; $D_{11}=D_{13}+2 \delta_{13}=10 d_{11}$.

Во втором, предлагаемом варианте ЭПР внутренний объем корпуса 4, с расположенными внутри него змеевиковым испарительным устройством 1, пятью рабочими и пятью резервными U-образными трубчатыми электронагревателями 3, расположенными по окружности диаметром D_{23} , цилиндрической полостью 9 в центральной части ТПТ диаметром D_{20} , датчиком температуры 7 и термopедохранителем 8 по краям цилиндрической полости 9, заливается расплавленным алюминием 2 за исключением полости 9 в центральной части ТПТ.

Геометрические параметры, следуя практическим рекомендациям и согласно результатам исследований геометрических параметров [5], приняты равными: $S_{12}=0,014$ м; $\delta_{12}=0,01$ м; $b_{12}=0,05$ м; $c_{12}=0,05$ м; $D_{11}=D_{13}+2 \delta_{13}=10 d_{11}$.

Разность капитальных вложений в ТПТ базового (без цилиндрической полости в центральной части ТПТ) и предлагаемого (с цилиндрической полостью в центральной части ТПТ) вариантов:

$$\Delta K_{i2} = K_{12} - K_{22}. \quad (1)$$

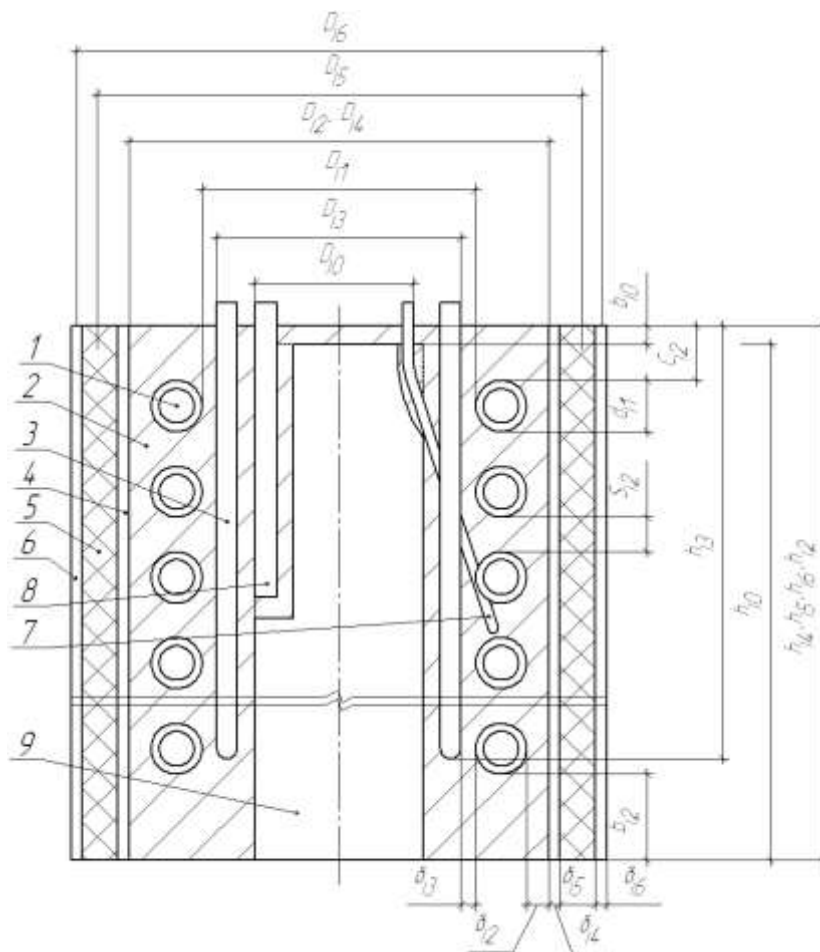
Величины L_{i1} , S_{i2} , δ_{i2} , δ_{i3} , δ_{i0} , b_{i2} , c_{i2} в формулах (2)-(14) являются управляющими параметрами для каждого элемента капвложений K_{ip} .

Выявим аналитическую зависимость капвложений в промежуточный теплоноситель i -го варианта электрического испарителя с промежуточным теплоносителем как функцию K_{ip} (L_{i1} , S_{i2} , δ_{i2} , δ_{i3} , δ_{i0} , b_{i2} , c_{i2}).

Капитальные вложения в промежуточный теплоноситель i -го варианта ЭПР определяются по формуле:

$$K_{i2}(L_{i1}, S_{i2}, \delta_{i2}, \delta_{i3}, \delta_{i0}, b_{i2}, c_{i2}) = \kappa_{i2} \cdot V_{i2} \cdot \rho_{i2}, \quad (2)$$

где L_{i1} – длина испарительного трубопровода СУГ, м; δ_{i0} – толщина слоя алюминиевой заливки в свету между боковой поверхностью образовавшейся цилиндрической полости 9 и группой трубчатых электронагревателей 3; δ_{i2} – толщина кольцевого зазора между корпусом и змеевиком ЭПР, м; S_{i2} – толщина зазора в свету между витками змеевика, м; δ_{i3} – расстояние между внутренней поверхностью испарительного змеевика в свету и осевой окружностью D_{i3} , по которой расположены электронагревательные элементы, C_{i2} , b_{i2} – соответственно высота заливки ТПТ над крайними витками i -го варианта ЭПР, м; κ_{i2} – удельные капвлочения в ТПТ i -го варианта ИЭ, долл/кг; V_{i2} – объем ТПТ i -го варианта ИЭ, м³; ρ_{i2} – плотность ТПТ i -го варианта ЭПР, кг/м³.



Расчетная схема i -го варианта электрического промышленного регазификатора с твердотельным промежуточным теплоносителем: 1 – испарительный змеевик; 2 – твердотельный промежуточный теплоноситель; 3 – трубчатый электронагреватель (ТЭН); 4 – корпус; 5 – тепловая изоляция; 6 – защитный кожух; 7 – датчик температуры; 8 – термомпредохранитель; 9 – цилиндрическая полость в центральной части ТПТ

Объем промежуточного теплоносителя определим по формуле:

$$V_{i2} = F_{i2} \cdot h_{i2} - V_{i3} - V_{i1} - V_{i0}, \tag{3}$$

где F_{i2} – площадь дна корпуса 4 (см. рисунок), в который залит ТПТ 2 для i -го варианта испарителя, m^2 ; h_{i2} – высота промежуточного теплоносителя в корпусе 4 для i -го варианта ЭПР, м; V_{i3} – объем трубчатых нагревателей 3 в i -м варианте ЭПР, m^3 ; V_{i1} – объем трубного змеевика 1 в i -м варианте ЭПР, m^3 ; V_{i0} – объем воздушной цилиндрической полости 9 в центральной части ТПТ, m^3 .

Объем трубчатых нагревателей 3 определяется по формуле:

$$V_{i3} = x_{i3} \cdot v_{i3}, \quad (4)$$

где x_{i3} – количество трубчатых нагревателей 3, устанавливаемых в i -м варианте ЭПР, шт.; v_{i3} – объем одного нагревателя, m^3 :

$$v_{i3} = \frac{\pi \cdot d_{i3}^2}{4} \cdot l_{i3}, \quad (5)$$

где d_{i3} – наружный диаметр трубки нагревательного элемента 3 в i -м варианте ЭПР, м; l_{i3} – длина одного нагревательного элемента в i -м варианте ЭПР, м.

Объем трубного змеевика 1 в i -м варианте ЭПР определяется как:

$$V_{i1} = \frac{\pi \cdot d_{i1}^2}{4} \cdot L_{i1}. \quad (6)$$

Поперечное сечение промежуточного теплоносителя 2 в формуле (3), численно равно площади дна корпуса 4, определяется по формуле:

$$F_{i2} = \frac{\pi \cdot D_{i2}^2}{4} = \frac{\pi}{4} (D_{i1} + 2d_{i1} + 2\delta_{i2})^2 = \frac{\pi}{4} (10 \cdot d_{i1} + 2 \cdot d_{i1} + 2\delta_{i2})^2 = \frac{\pi}{4} (12d_{i1} + 2\delta_{i2})^2, \quad (7)$$

где D_{i1} – внутренний диаметр испарительного змеевика 1, м; D_{i2} – диаметр поперечного сечения промежуточного теплоносителя 2, м; δ_{i2} – толщина кольцевого зазора в свету между корпусом 4 и змеевиком 1, м.

Высота заливки ТПТ в формуле (3) определяется по формуле:

$$h_{i2} = C_{i2} + d_{i1} + (d_{i1} + S_{i2}) \cdot n_{i2} + d_{i1} + b_{i2}, \quad (8)$$

где S_{i1} – толщина зазора между витками змеевика, м; n_{i2} – количество витков змеевика 1, определяется с учетом диаметра его гнущего $D_{i1} = 10 d_{i1}$ по формуле:

$$n_{i2} = \frac{L_{i1}}{\pi(D_{i1} + d_{i1})} = \frac{L_{i1}}{\pi \cdot 11 \cdot d_{i1}}. \quad (9)$$

Тогда формула (8) с учетом (9) примет вид:

$$h_{i2} = C_{i2} + 2d_{i1} + (d_{i1} + S_{i2}) \frac{L_{i1}}{\pi \cdot 11 \cdot d_{i1}} + b_{i2}. \quad (10)$$

Объем цилиндрической воздушной полости 9 в формуле (3) в центральной части ТПТ 2:

$$V_{i0} = F_{i0} h_{i0} - V_{m.n} = F_{i0} (h_{i2} - b_{i0}) - V_{m.n}, \quad (11)$$

где F_{i0} , h_{i0} – соответственно поперечное сечение и высота цилиндрической полости 9 в центральной части ТПТ 2, m^2 и м; $V_{m.n}$ – объем заливки вокруг термopедохранителя 8 и датчика температуры в пределах полости 9, m^3 ; b_{i0} – толщина заливки ТПТ в свету под цилиндрической полостью 9 в центральной части ТПТ, м.

Поперечное сечение цилиндрической полости в формуле (11) в центральной части ТПТ определяется как:

$$F_{i0} = \frac{\pi \cdot D_{i0}^2}{4} = \frac{\pi}{4} (D_{i1} - 2\delta_{i3} - 2d_{i3} - 2\delta_{i0})^2 = \frac{\pi}{4} (10 \cdot d_{i1} - 2\delta_{i3} - 2d_{i3} - 2\delta_{i0})^2, \quad (12)$$

где D_{i0} – диаметр цилиндрической полости 9 в центральной части ТПТ, м.

Высота цилиндрической полости 9 в центральной части ТПТ определяется по формуле:

$$h_{i0} = (h_{i2} - b_{i0}) = C_{i2} + d_{i1} + (d_{i1} + S_{i2}) \cdot n_{i2} + d_{i1} + b_{i2} - b_{i0}. \quad (13)$$

Подставляя (4)-(13) в (3), а (3) в (2), получим развернутое уравнение для капвложений в промежуточный теплоноситель 2 *i*-го варианта ЭПР:

$$K_{i2}(L_{i1}, S_{i2}, \delta_{i3}, \delta_{i2}, \delta_{i0}, b_{i2}, c_{i2}) = \kappa_{i2} \cdot \rho_{i2} \left[\frac{\pi(12d_{i1} + 2\delta_{i2})^2}{4} \right] \cdot \left[C_{i2} + 2d_{i1} + (d_{i1} + S_{i2}) \frac{L_{i1}}{11\pi d_{i1}} + b_{i2} \right] - \rho_{i2} \cdot \frac{\pi}{4} (d_{i1}^2 \cdot L_{i1} + \chi_{i3} \cdot d_{i3}^2 \cdot l_{i3}) - \rho_{i2} \cdot \left[\frac{\pi}{4} (10 \cdot d_{i1} - 2\delta_{i3} - 2d_{i3} - 2\delta_{i0})^2 \cdot (C_{i2} + d_{i1} + (d_{i1} + S_{i2}) \cdot n_{i2} + d_{i1} + b_{i2} - b_{i0}) \right]. \quad (14)$$

С целью количественной оценки результатов исследований были проведены соответствующие расчеты. Расчеты по формулам (1)-(14) проведены при следующих исходных данных.

1. Паропроизводительность сравниваемых вариантов ЭПР принята для двух типоразмеров: $G = 32$ кг/ч; 100 кг/ч.

2. Срок службы электрического испарителя и ТПТ для обоих вариантов $T = 25$ лет.

3. Количество одновременно работающих трубчатых электронагревателей 3 для обоих вариантов составляет 5 шт.

4. Длина испарительного змеевика согласно [6, 7]:

– при $G = 32$ кг/ч составляет $L_{11} = L_{21} = 1,84$ м;

– при $G = 100$ кг/ч составляет $L_{11} = L_{21} = 5,5$ м.

5. Наружный диаметр трубопровода испарительного змеевика СУГ, согласно [6, 7] принимается: $d_{11} = d_{21} = 0,022$ м.

6. Внутренний диаметр испарительного змеевика СУГ принимается с учетом компоновки пяти рабочих и пяти резервных U-образных ТЭН 3 по окружности диаметром D_{i3} равным $D_{i1} = D_{i3} + 2 \delta_{i3} = 10 d_{i1}$.

7. Толщина кольцевого зазора между испарительным змеевиком 1 и корпусом 4 испарителя в базовом и в предлагаемом вариантах $\delta_{12} = \delta_{22} = 0,01$ м.

8. Толщина зазора в свету между отдельными витками испарительного змеевика в базовом и предлагаемом вариантах $S_{i2} = S_{22} = 0,014$ м.

9. Расстояние в свету между внутренней поверхностью испарительного змеевика 1 и электронагревательными элементами 3 в базовом и в предлагаемом вариантах $\delta_{13} = \delta_{23} = 0,008$ м.

10. Толщина алюминиевой заливки C_{i2} в базовом и в предлагаемом вариантах составляет $C_{12} = C_{22} = 0,05$ м.

11. Толщина алюминиевой заливки b_{i2} в базовом и в предлагаемом вариантах составляет $b_{12} = b_{22} = 0,05$ м.

12. Толщина алюминиевой заливки b_{i0} для базового варианта составляет $b_{10} = 0,0$ м, для предлагаемого варианта составляет $b_{20} = 0,015$ м.

13. Диаметр цилиндрической полости 9 для базового варианта в формуле (14) равен нулю, т.е.:

$$D_{10} = \frac{\pi}{4} (10 \cdot d_{i1} - 2\delta_{i3} - 2d_{i3} - 2\delta_{i0})^2 = 0.$$

Результаты расчетов по формулам (1)-(14), согласно приведенным исходным данным, показывают, что снижение материалоемкости и капитальных вложений в твердотельный промежуточный теплоноситель в предлагаемом варианте ЭПР с воздушной цилиндрической полостью 9 по сравнению с базовым ЭПР составляет 35,6%.

Выводы

1. Разработана расчетная структурная схема ЭПР с ТПТ, показанная на рисунке и позволяющая установить обобщенную структуру сравниваемых вариантов и управляющие гео-

метрические параметры электрических испарителей с твердотельным промежуточным теплоносителем.

2. Разработаны аналитические зависимости (1)-(14) технико-экономического сравнения ЭПР с ТПТ из алюминиевой заливки с цилиндрической воздушной полостью в ее центральной части, в зависимости от управляющих параметров, в качестве которых выбраны длина L_{i1} испарительного устройства СУГ, толщина кольцевого зазора в свету между испарительным змеевиком 1 и корпусом 4 испарителя δ_{i2} , толщина зазора в свету между отдельными витками испарительного змеевика S_{i2} , расстояние в свету δ_{i3} между внутренней поверхностью испарительного змеевика и электронагревательными элементами 3, толщина слоя алюминиевой заливки в свету δ_{i0} между боковой поверхностью образовавшейся цилиндрической полости 9 и группой трубчатых электронагревателей 3, толщины алюминиевой заливки C_{i2} и b_{i2} .

3. Проведенное технико-экономическое обоснование по (1)-(14) показывает, что предлагаемая конструкция ЭПР с твердотельным промежуточным теплоносителем 2 из алюминиевой заливки с цилиндрической пустотелой полостью 9 в ее центральной части обеспечивает экономический эффект в размере 35,6% по сравнению с существующим ЭПР с твердотельным промежуточным теплоносителем из алюминиевой заливки без цилиндрической полости в ее центральной части. Экономический эффект достигается за счет исключения заливки алюминием цилиндрической полости диаметром D_{i0} в центральной части испарителя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Усачев А.П. К выбору типа промежуточного теплоносителя для электрических испарителей централизованных систем газоснабжения / А.П. Усачев, А.Ю. Фролов, А.В. Рулев // Научно-технические проблемы совершенствования и развития систем газоснабжения: сб. науч. трудов. Саратов: СГТУ, 2006. С. 115-123.

2. Стаскевич Н.Л. Справочник по сжиженным углеводородным газам / Н.Л. Стаскевич, Д.Я. Вигдорчик. Л.: Недра, 1986. 543 с.

3. Курицын Б.Н. Теплообмен в парогенераторах сжиженного углеводородного газа с промежуточным теплоносителем / Б.Н. Курицын, А.П. Усачев // Труды Саратовского центра жилищно-коммунальной академии РФ. Саратов: Надежда, 1997. Вып. 1. С. 53-61.

4. Технико-экономическое обоснование применения электрического испарителя сжиженного углеводородного газа с твердотельным промежуточным теплоносителем / А.П. Усачев, А.Ю. Фролов, А.В. Рулев, Т.А. Усачева // Научно-технические проблемы совершенствования и развития систем газоснабжения: сб. науч. трудов. Саратов: СГТУ, 2006. С. 150-161.

5. Электротепловая аналогия и ее применение к решению задачи теплообмена в змеевиковом испарителе сжиженного углеводородного газа с твердотельным промежуточным теплоносителем / А.П. Усачев, А.Ю. Фролов, А.В. Рулев, Т.А. Усачева // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2007. № 2(24). Вып. 1. С. 128-132.

6. Усачев А.П. Разработка модели теплового расчета проточных трубных испарителей сжиженного углеводородного газа из пропан-бутановых смесей / А.П. Усачев, А.Л. Шурайц, А.Ю. Фролов // Научно-технические проблемы совершенствования и развития систем газоснабжения: сб. науч. трудов. Саратов: СГТУ, 2004. С. 121-135.

7. Усачев А.П. Разработка и применение алгоритма расчета длины трубных испарителей сжиженного углеводородного газа с учетом гидродинамических режимов его течения / А.П. Усачев, Л.И. Высоцкий, А.Ю. Фролов // Научно-технические проблемы совершенствования и развития систем газоснабжения: сб. науч. трудов. Саратов: СГТУ, 2005. С. 148-160.

Шурайц Александр Лазеревич –

кандидат технических наук, профессор кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция» Саратовского государственного технического университета, генеральный директор ОАО «Гипрониигаз», г. Саратов

Усачев Александр Прокофьевич –

доктор технических наук, профессор кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция» Саратовского государственного технического университета

Фролов Алексей Юрьевич –

кандидат технических наук, ассистент кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция» Саратовского государственного технического университета

Рулев Александр Владимирович –

ассистент кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция» Саратовского государственного технического университета

Усачева Татьяна Александровна –

аспирант кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция» Саратовского государственного технического университета

Статья поступила в редакцию 06.09.07, принята к опубликованию 05.12.07

УДК 621.181.4:622.96

В.Ф. Симонов, М.А. Агеев

**ОПТИМИЗАЦИЯ РЕАКТОРА КАТАЛИТИЧЕСКОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ
ОКСИДОВ АЗОТА ДЛЯ СИСТЕМ ГЛУБОКОЙ ОЧИСТКИ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ
КОТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ**

Представлен критерий частной оптимизации реактора селективного каталитического восстановления оксидов азота дымовых газов. Проведена двухфакторная оптимизация по представленному критерию. Полученные результаты могут быть использованы в экономико-математической модели для комплексной оптимизации системы глубокой очистки дымовых газов энергетических котлов.

V.F. Simonov, M.A. Agejev

**CATALYTIC RECOVERY REACTOR OPTIMIZATION FOR SYSTEMS
OF DEEPER CLEANING OF SMOKE GASES FROM BOILER PLANT**

A criterion of catalytic recovery reactor optimization is presented in this article. Double factor optimization of presented optimization is studied. The received results may be used in economical and mathematical models for complex optimization of the systems of deeper cleaning of smoke gases of energy boilers.

На рис. 1 представлена схема глубокой очистки дымовых газов после котельного агрегата. Назначение отдельных элементов этой схемы следует из подрисночных подписей. В приведенном варианте схемы необходимый нагрев дымовых газов в подогревателе П перед подачей в реактор селективного каталитического восстановления оксидов азота (СКВ) осуществляется с помощью воздуха, подаваемого в систему пылеприготовления и на горение топлива. В связи с этим при модернизации пылеугольных энергетических котлов и оснащении их системами очистки требуется реконструкция конвективной шахты с увеличением площади поверхности воздухоподогревателя. Это обстоятельство потребует дополнительного расхода топлива для восстановления паропроизводительности котла.

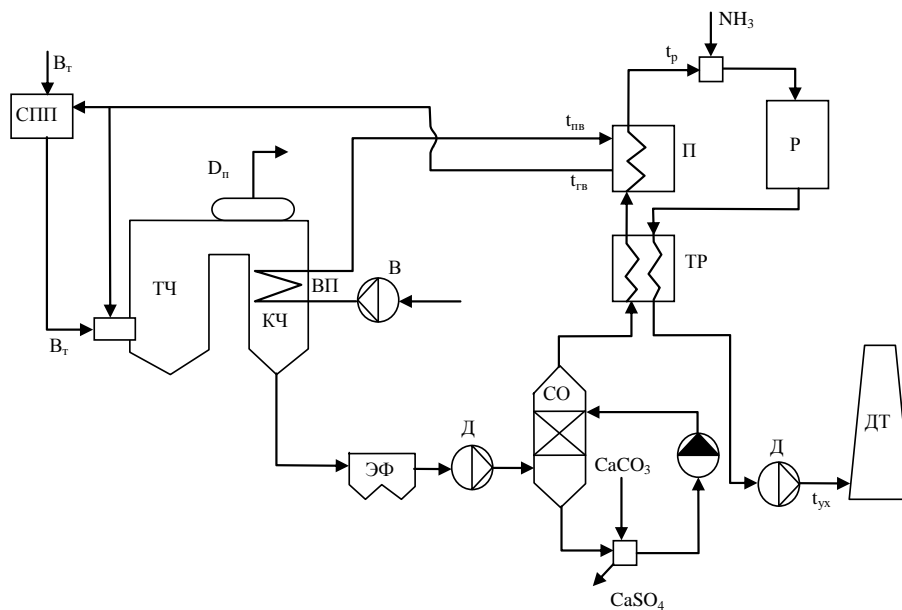


Рис. 1. Схема системы глубокой очистки дымовых газов пылеугольных энергетических котлов: СПП – система пылеприготовления; ТЧ, КЧ – топочная и конвективная части котла; ЭФ – электрофильтр; СО – сероочистка; ТР – теплообменник-регенератор тепла; П – подогреватель; Р – реактор СКВ; В – вентилятор; Д – дымосос; ДТ – дымовая труба; ВП – воздухоподогреватель

В качестве критерия оптимизации системы глубокой очистки дымовых газов в приведенном варианте может быть использована изменяющаяся часть годовых расчетных затрат ΔZ в виде [1]:

$$\Delta Z = \sum_1^n I_i \cdot (1 - \gamma_n) + [(p_a + p_o) \cdot (1 - \gamma_n) + p_{ин}] \cdot \Delta K, \quad (1)$$

где I_i – ежегодные издержки в систему очистки дымовых газов и дополнительные издержки для обеспечения постоянной паропроизводительности котла, руб./год; ΔK – капитальные затраты в систему очистки (включая затраты в реконструкцию конвективной шахты котла), руб.; γ_n – функция, учитывающая систему федеральных и региональных налогов; $p_{ин}$ – коэффициент эффективности инвестиций, характерный для данного региона и зависящий от

экономических условий периода внедрения, 1/год; p_a, p_o – коэффициенты, учитывающие затраты на амортизацию и обслуживание оборудования, 1/год.

Оптимизация системы очистки дымовых газов ($\Delta Z \rightarrow \min$) предполагает оптимизацию каждого элемента схемы на основе математического описания соответствующих процессов. Наиболее сложным для описания элементом является реактор СКВ оксидов азота (P , рис. 1).

Система уравнений, описывающих процесс восстановления оксида азота на поверхности катализатора, имеет вид [2]:

$$\begin{cases} k \cdot c^* = \beta \cdot (c - c^*); \\ k \cdot c^* \cdot q_{\text{энд}} = \alpha \cdot (T - T^*) \cdot s; \\ \frac{dc}{dl} = \frac{k \cdot c^*}{u}; \\ \frac{dT}{dl} = \frac{k \cdot c^* \cdot q_{\text{энд}}}{u \cdot c_p}, \end{cases} \quad (2)$$

где α, β – коэффициенты тепло- и массоотдачи между потоком газа и поверхностью катализатора, кВт/(м²·К), кмоль/(м²·с·кмоль/м³); c, c^* – концентрации NO в потоке и на поверхности катализатора, кмоль/м³; T, T^* – температура газового потока и катализатора, К; s – удельная наружная поверхность катализатора, м²/м³; u – условная скорость газового потока, м/с; c_p – удельная изобарная теплоемкость газового потока, кДж/(м³·К); $q_{\text{энд}}$ – тепловой эффект реакции, кДж/кмольNO; l – высота слоя катализатора, м.

Анализ уравнений, входящих в систему (2), показывает, что величиной, определяющей массогабаритные характеристики реактора, является скорость газового потока. Скорость оказывает влияние на коэффициенты тепло- и массоотдачи и определяет изменение концентрации оксида азота и температуры газового потока по высоте реактора. Исходя из места реактора в схеме (рис. 1), очевидно также влияние скорости на сопротивление по газовому тракту.

В качестве критерия частной оптимизации реактора используется изменяющаяся часть годовых расчетных затрат ΔZ в виде:

$$\Delta Z = [I_{\text{ээ}} + I_{\text{кат}}] \cdot (1 - \gamma_n) + [(p_a + p_o) \cdot (1 - \gamma_n) + p_{\text{ин}}] \cdot \Delta K, \quad (3)$$

где $I_{\text{ээ}}$ – ежегодные издержки на электроэнергию, руб./год; $I_{\text{кат}}$ – ежегодные издержки на катализатор, руб./год; ΔK – капитальные затраты на реактор СКВ, руб./год.

Издержки на электроэнергию представим в виде:

$$I_{\text{ээ}} = N \cdot \tau \cdot C_{\text{ээ}}, \quad (4)$$

где N – мощность, потребляемая перекачивающими устройствами на преодоление сопротивления реактора, кВт; τ – годовое число часов использования установленной мощности, ч/год; $C_{\text{ээ}}$ – стоимость электроэнергии, руб./кВт·ч.

В качестве катализатора используются нанесенные на керамическую основу оксид титана и оксид ванадия. Так как в дымовых газах сохраняется остаточное содержание серы (SO₂), под воздействием которой происходит отравление катализатора, его срок службы не превышает 3 лет [3]. Следовательно, ежегодно до трети катализатора подвергается замене. В результате издержки на катализатор $I_{\text{кат}}$ могут быть представлены в виде:

$$I_{\text{кат}} = V_p \cdot \rho_{\text{км}} \cdot \left[(1 - \varepsilon) + \frac{\varepsilon}{a_{\text{отн}}^{1,5}} \right] \cdot a_m \cdot \frac{1}{\tau_{\text{сл}}}, \quad (5)$$

где V_p – объем реактора, м³; $\rho_{\text{км}}$ – плотность катализатора, кг/м³; ε – порозность катализатора, м³/м³; $a_{\text{отн}}$ – относительный размер ячейки, м/м; a_m – удельная стоимость единицы массы катализатора, руб./кг; $\tau_{\text{сл}}$ – срок службы катализатора, год

$$a_{\text{отн}} = \frac{a}{a_{\text{мин}}}, \quad (6)$$

где a – текущий размер ячейки, м; a_{\min} – минимальный размер ячейки, м.

В состав капитальных затрат входят затраты на корпус реактора, поддерживающие катализатор решетки и другие элементы конструкции.

Разработан алгоритм решения системы уравнений (2), позволяющий выявить влияние скорости дымовых газов для катализаторных блоков с размерами ячеек 3, 5 и 7 мм. Укрупненная модель алгоритма представлена в [2].

Для решения задачи выбора реактора с оптимальными скоростью дымовых газов и размером ячейки проведена двухфакторная оптимизация известным методом покоординатного спуска при дискретных значениях размера ячейки.

На рис. 2 и 3 представлены результаты расчета для следующих интервалов исходных данных: расход дымовых газов после котла $69 \text{ м}^3/\text{с}$; температура дымовых газов перед реактором $250\text{-}350^\circ\text{C}$; толщина перегородки ячеек $0,002 \text{ м}$; стоимость электроэнергии $1,38 \text{ руб./кВт}\cdot\text{ч}$; начальная концентрация оксида азота $0,348 \text{ г/м}^3$, конечная $0,001 \text{ г/м}^3$. Начальное приближение – скорость 10 м/с , ячейка – $0,003 \text{ м}$.

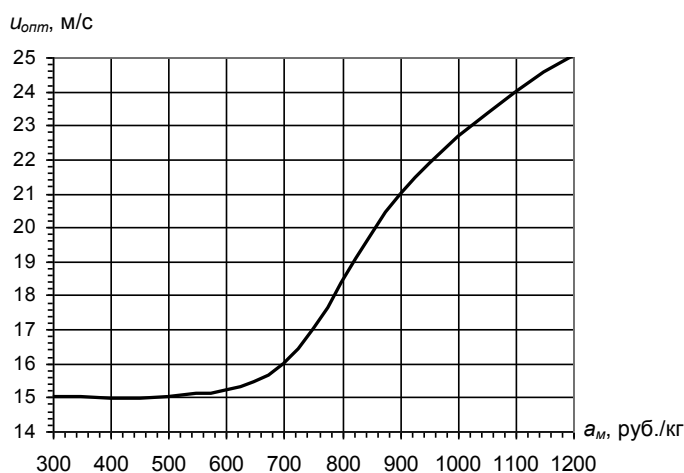


Рис. 2. Зависимость оптимальной скорости в каналах катализатора от стоимости единицы массы катализатора

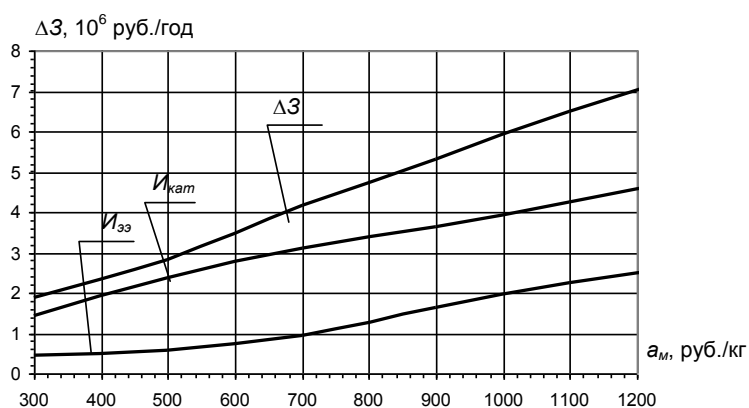


Рис. 3. Структура минимальных годовых расчетных затрат от стоимости единицы массы катализатора

При стоимости катализатора от 300 до 500 руб./кг, как видно на рис. 2, оптимальная скорость составляет 15 м/с. Издержки на электроэнергию в данном интервале изменяются незначительно по сравнению с издержками на катализатор (рис. 3). Увеличение стоимости катализатора до 1200 руб./кг приводит к возрастанию оптимальной скорости до 25 м/с.

Таким образом, представленная методика выбора массогабаритных характеристик реактора может быть использована для оптимизации всей системы глубокой очистки дымовых газов при модернизации котельных агрегатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Симонов В.Ф. Критерии сопоставления и оптимизации энергосберегающих решений в рыночных условиях / В.Ф. Симонов, А.И. Попов, Р.А. Попов // Материалы межвузовского научного семинара по проблемам теплоэнергетики. Саратов: СГТУ, 1996. С. 87-91.

2. Симонов В.Ф. Оптимизация систем глубокой очистки дымовых газов пылеугольных энергетических котлов / В.Ф. Симонов, Н.В. Пономарева, М.А. Агеев // Известия вузов. Проблемы энергетики. Казань: КГЭУ, 2006. № 9-10. С. 55-62.

3. Котлер В.Р. Оксиды азота в дымовых газах котлов / В.Р. Котлер. М.: Энергоатомиздат, 1987. 144 с.

Симонов Вениамин Федорович –

доктор технических наук, профессор кафедры «Промышленная теплотехника»
Саратовского государственного технического университета

Агеев Михаил Александрович –

ассистент кафедры «Промышленная теплотехника»
Саратовского государственного технического университета

Статья поступила в редакцию 30.07.07, принята к опубликованию 05.12.07

УДК 621.039

Л.В. Жаркина

ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОНТРОЛЛИНГА НА БАЛАКОВСКОЙ АЭС

Изложены концептуальные положения и основные направления работ по внедрению системы управления издержками на основе информационной системы управления комплексом мероприятий по техническому обслуживанию и ремонту оборудования энергоблоков Балаковской АЭС.

L.V. Zharkina

CONTROLLING INFORMATIONAL SYSTEM AT BALAKOVO NPP

Conceptual provision and direction of the works on implementation of expenses monitoring system and main provisions of informational creation equipment maintenance arrangement complex at Balakovo NPP are given here.

Важнейшей проблемой предприятий электроэнергетического сектора в условиях реформирования электроэнергетики является обеспечение конкурентоспособности выработки электрической энергии. Одной из наиболее современных и эффективных концепций управления предприятиями в электроэнергетике является контроллинг. Контроллинг включает в себя установление цели (целей) предприятия, текущий сбор и обработку информации для принятия управленческих решений, осуществление функций контроля отклонений фактических показателей производственной деятельности от плановых, а также, что наиболее важно, подготовку рекомендаций для принятия управленческих решений с последующим анализом их эффективности.

Исходя из этого общая концепция контроллинга предусматривает: создание системы менеджмента, предназначенного для осуществления поддержки процесса принятия решения; сбор и обработку информации о производственной и финансовой деятельности, предоставляемую лицам, принимающим решения; создание экономического инструментария для повышения прибыли предприятия; проведение оптимизации затрат на производство электроэнергии по критерию общей эффективности деятельности. Поэтому контроллинг становится базой для оценки эффективности принятых управленческих решений, в рамках которого сравниваются конкретные результаты деятельности в прошлых периодах с планируемыми и разработки новых. При их отклонениях осуществляется поиск причин с целью устранения в настоящем или нивелировании в будущих планах деятельности предприятия. Это сравнение нацеливает на улучшение процесса планирования в последующих периодах.

Основные задачи контроллинга могут быть представлены следующим образом: интеграция планирования на базе координации отдельных функциональных областей; проведение анализа отклонений для осуществления экономического контроля в области организации и проведении отдельных мероприятий, направленных на снижение издержек и повышение эффективности; создание базы для принятия решений. Почти для всех сфер принятия решений контроллинг предоставляет релевантную информацию.

Контроллинг создает определенные преимущества в управлении предприятием: высокий уровень прозрачности деятельности позволяет обнаружить проблемные места в управлении предприятием, реализуя функцию планирования; гарантирует управление предприятием, ориентированное в будущее, поиск решений становится более обоснованным и быстрым, совершенствуется коммуникация, что ведет к более ясному пониманию сотрудниками взаимосвязей в экономике предприятия, достигается улучшение управления персоналом.

Общая концепция контроллинга предусматривает оперативный и стратегический уровень контроллинга [1]. В оперативном контроллинге устанавливается плановый период до пяти лет, в то время как в стратегическом контроллинге исходят из сроков до десяти лет. В рамках оперативного контроллинга внимание фокусируется на создании кратко- и среднесрочных планов по обороту, затратам и финансам. Система контроллинга включает в себя не только аналитические показатели и выводы. Здесь важна организационная составляющая - должностные лица, которые реализуют контроллинговые функции, потоки и содержание информации между отдельными подразделениями и от подчиненных к руководителям. Отсюда следует, что внедрение контроллинга требует разработки основных положений информационного обеспечения, которое, кроме общих методических подходов, является индивидуальным для каждого предприятия, учитывающего специфические условия.

Таким образом, основной задачей разработки и внедрения общей концепции контроллинга является выработка рекомендаций для принятия управленческих решений на основе созданной на предприятии информационной системы сопровождения. Для того, чтобы сформировать такие рекомендации, необходимо, прежде всего, проанализировать сам процесс принятия решений, этапы этого процесса, определить содержание и потоки информации, выявить характерные ошибки в принятии решений, которые следует устранить, т.е. контроллинг выполняет функции сервисной службы.

В условиях реорганизации ФГУП концерн «Росэнергоатом» и в связи с необходимостью минимизации выделяемых финансовых средств по смете расходов на Балаковской АЭС, сложились условия для адаптации общей концепции контроллинга-управления расходами, направленной на: перспективное планирование мероприятий с учетом специфики предприятия сроком на пять лет с ежегодным уточнением; категорирование мероприятий по степени важности; создание системы ответственности за выполнение плановых мероприятий с назначением ответственных лиц (руководителей служб) с обеспечением контроля за расходованием выделенных лимитов; контроль сметы и бюджета по конкретному мероприятию с оптимизацией планирования затрат.

Основные направления работы по внедрению системы управления издержками следующие: управление расходами на техническое обслуживание и ремонт оборудования; оптимизация численности персонала; освобождение от непрофильных видов деятельности; управление расходами на социальные объекты; оптимизация коммерческой деятельности; оптимизация организационной структуры; контроль за исполнением сметы расходов и бюджета; принятие управленческих решений.

В рамках создания организационной структуры контроллинга необходимы: создание информационного обеспечения; организация структурного подразделения, обеспечивающего введение в практику работы системы контроллинга; назначение в службах-бюджетополучателях лиц, ответственных за внедрение контроллинга, а также контролеров-кураторов подразделений; обучение персонала методике контроллинга; корректировка НТД (положения, должностные инструкции и т.д.).

Разработанная на Балаковской АЭС система бюджетирования подразделений, контроля исполнения сметы и бюджета совершенствуется в следующих направлениях: участие служб-бюджетополучателей в формировании и защите сметы расходов; деятельность подсистемы сопровождения лимитов расходов по смете подразделениями АЭС, которая обеспечивает оперативный контроль исполнения сметы службами и подразделениями (доведенный лимит, заключенные договора, фактическое использование на текущий момент) и заключение договоров только в пределах сметы расходов; разработка показателей премирования руководителей подразделений, связанных с исполнением сметы расходов.

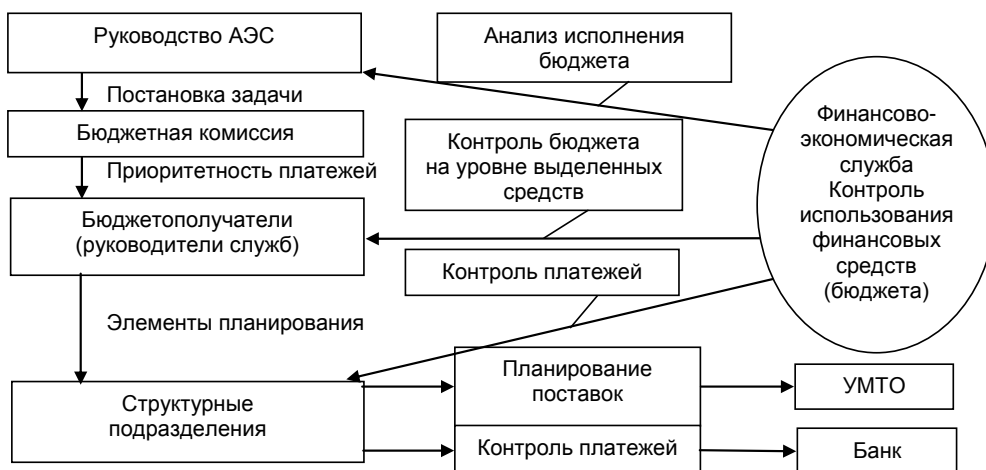


Рис. 1. Общая схема управления финансовыми ресурсами

Общая схема управления финансовыми средствами на Балаковской АЭС приведена на рис. 1, а структура расходов на приобретение материально-технических ресурсов – на рис. 2.

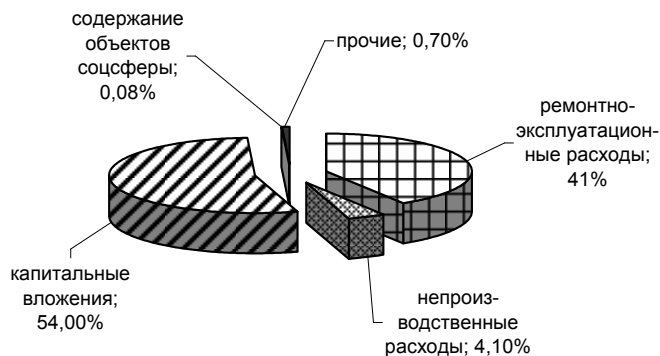


Рис. 2. Структура расходов на МТР

Для реализации системы контроллинга на станции, учитывая необходимость систематизации многоуровневых учетных операций с ежегодным движением более 30,0 тысяч наименований материально-технических ресурсов (МТР), осуществляемых при комплектации планируемых работ, и для возможности получения оперативных данных о состоянии комплектации, принято решение о создании информационной системы управления материально-техническим обеспечением (УМТО). Целью информационной подсистемы УМТО являются управление и информационная поддержка процессов МТО и управление затратами. Основные задачи информационной подсистемы состоят в следующем: обеспечить персонал станции необходимой и достаточной информацией для реализации планов материально-технического обеспечения, позволяющей существенно повысить оперативность и качество МТО; снизить издержки производства и оптимально использовать выделенные в бюджете АЭС финансовые средства на приобретение МТР.

Решение указанных задач требует автоматизации процессов учета материально-технического обеспечения посредством создания информационной системы управления материально-техническими ресурсами (определение потребностей в МТР на основе утвержденных планов работ, ведение заявочной работы в объеме доведенных лимитов, учет ведения договорной деятельности поставок МТР и покрытие заявленных потребностей, управление запасами на складах, учет проведения входного контроля МТР) и создания единой системы контроллинга поставок МТР. При создании информационной системы приняты следующие критерии: обеспечение проведения закупочной деятельности МТР в рамках выделенных средств; формирование потребностей подразделений станции в рамках утвержденных планов-мероприятий на соответствующий период; обеспечение сквозного учета поставляемых МТР с момента формирования потребности до выдачи в производство; повышение ответственности персонала, участвующего в определении потребностей и комплектации работ в рамках установленных объемов и сроков; обеспечение оперативной информационной поддержки состояния комплектации МТР, утвержденных к выполнению работ всего персонала станции.

Обеспечение безопасного и экономически эффективного производства электрической энергии и стабильного несения нагрузки АЭС в течение года, особенно в период осенне-зимнего максимума нагрузок, в соответствии с заданием, установленным Федеральной службой по тарифам (ФСТ) России, и балансами энергии и мощности, требует реализации сложного комплекса мероприятий по техническому обслуживанию и ремонту оборудования, что возможно только при наличии эффективной системы управления предприятием, подразумевающей согласованное принятие решений по управлению совокупностью производ-

ственных процессов, характеризующихся различными потребностями в ресурсах (финансы, оборудование и материалы, персонал и др.) в целях достижения указанной цели.

Достижение стратегических целей осуществляется путем постановки задач персоналу и контроля за их выполнением. Для управления работой подразделений, оценки успешности выполнения ими запланированных задач необходим инструмент, который позволил бы наполнить процесс принятия решения адекватной и достаточной информацией. Таким инструментом являются система ключевых показателей эффективности (КПЭ) и система сбалансированных показателей. Система показателей и методики их расчета составляют основу принятия решений, базируются на оценке эффективности деятельности предприятия и направлены на достижение стратегических целей организации.

Показатели эффективности позволяют определить, насколько управление организацией соответствует плану достижения стратегических целей. Однако следует понимать, что достижение стратегических целей АЭС имеет существенные отличия от других областей электроэнергетики. Эксплуатация атомной станции осуществляется с безусловным приоритетом обеспечения выполнения требований действующего в области атомной энергетики законодательства в части ядерной и радиационной безопасности. Атомная станция производит только один продукт – электроэнергию, периодически останавливая производство для перегрузки ядерного топлива, проведения плановых ревизий, освидетельствования, технического обслуживания и ремонта. Успешность проведения планово-предупредительного ремонта (ППР), занимающего по времени 10-20% календарного времени, определяет эффективность последующей эксплуатации энергоблока до следующего ППР.

Под показателем успешности понимается результат обработки информации, применяемой или порождаемой в ходе данного процесса, используемый для оценки степени достижения поставленных целей и оперирующий ограниченным количеством показателей успешности его выполнения. В оптимальном варианте для производственного процесса должен быть определен только один абсолютный показатель успешности. Он может быть определен через функцию частных показателей успешности выполнения отдельных задач и критериев приближения к поставленной цели.

Например, для процесса управления ремонтом энергоблока целью является выполнение запланированного объема ремонтных работ в сроки, предусмотренные планом. Абсолютным показателем успешности служит окончание ремонта в сроки, определенные графиком. Частными показателями являются окончание ремонта агрегатов, узлов систем в сроки, определенные графиком.

Для определенного эксплуатационного процесса выбор показателей успешности определяется выбором цели. Так, для управления ремонтом энергоблока в качестве цели можно выбрать минимизацию стоимостных затрат на выполнение ремонта. Тогда в качестве главного показателя успешности следует выбрать выполнение бюджета ремонта.

У административного персонала, ответственного за выполнение нескольких производственных процессов или функциональных областей, показатель успешности их деятельности должен быть интегрированным и определяться с учетом влияния успешности выполнения того или иного процесса на успешность реализации бизнес-процессов предприятия. Показатели успешности выполнения одного и того же производственного процесса могут и должны быть различными для персонала, участвующего в его реализации и занимающего различные места в управленческой схеме предприятия.

Определение интегрированных показателей успешности совокупности функциональных областей и всего процесса должно строиться на базе существующей на предприятии системы оценок влияния того или иного бизнес-процесса на успешность деятельности по алгоритмам, согласованным и понятным высшему административному руководителю. Для показателя успешности (главного или частного) можно определить уровни качества, например: норма, условия не нарушаются; критическая зона, условия не нарушаются, но выявлена тен-

денция к нарушению условия; нарушение нормы, нарушены условия успешности. Очевидно, что в полной мере реализация системы сбалансированных показателей и определение показателей успешности производственных процессов ТОиР могут быть реализованы только с использованием современных информационных технологий.

На Балаковской АЭС создана информационная система поддержки персонала при планировании и управлении ходом ремонтных работ, включающая: управление материально-техническим обеспечением; ведение основных данных по оборудованию, зданиям, сооружениям; разработку годовых планов ремонта; управление договорной деятельностью; управление ходом ППР.

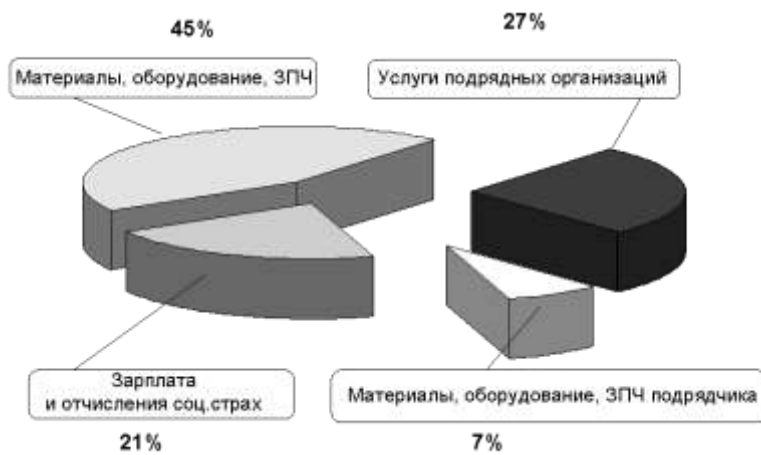


Рис. 3. Структура затрат по видам деятельности

Формирование плана затрат на ремонтные работы, структура которых приведена на рис. 3, производится на основании: годовых графиков ремонта оборудования и арматуры, трубопроводов и транспортных средств, зданий и сооружений; утвержденных мероприятий, направленных на повышение надежности и безопасности, обеспечение безаварийной работы станции; ведомостей объемов работ; расчетов и заявок подразделений-заказчиков; данных о нормативном фонде оплаты труда и нормативной численности ремонтного персонала; анализа фактических затрат.

Схема планирования затрат на ремонтное обслуживание включает основные этапы, приведенные на рис. 4.

Основным элементом при планировании и учете затрат на проведение ремонтного обслуживания является «Работа» – ремонтная, эксплуатационная или подготовительная операция, которая выполняется бригадой постоянного состава, на одном рабочем месте с соблюдением одинаковых условий безопасного производства работ, характеризуется определенной продолжительностью, ресурсами и затратами, необходимыми для ее выполнения, обосновывающими необходимость выполнения документами и является основным реквизитом при планировании ремонта. Использование понятия «Работа» объясняется необходимостью обеспечения возможности проведения всестороннего анализа затрат на ремонтное обслуживание оборудования, зданий и сооружений. На рис. 5 показана общая схема, иллюстрирующая существующие связи между различными производственными процессами.

Каждая из информационных систем реализует совокупность производственных процессов, связанных в той или иной мере с понятием «Работа». Производственные процессы

фактически представляют собой логически связанные по ресурсам, времени и месту исполнения проекты.



Рис. 4. Этапы планирования затрат



Рис. 5. Информационная схема анализа ремонтного обслуживания

Информационные системы ремонтного обслуживания разрабатывались в течение нескольких лет, в настоящее время они представляют собой набор разнородных про-

граммных комплексов и баз данных, которые хотя и содержат всю необходимую для проведения анализа затрат на ремонтное обслуживание информацию, но проведение их анализа затруднено и не может быть выполнено оперативно. Реализовать на существующих базах данных показатели успешности выполнения производственных процессов практически невозможно. Радикальным средством является переход на корпоративную информационную систему, что потребует значительного времени. Проблема формирования и использования показателей успешности производственных процессов также может решаться с использованием SAP BW. Для отработки технологии переноса данных и реализации показателей успешности на Балаковской АЭС реализована схема, приведенная на рис. 6.

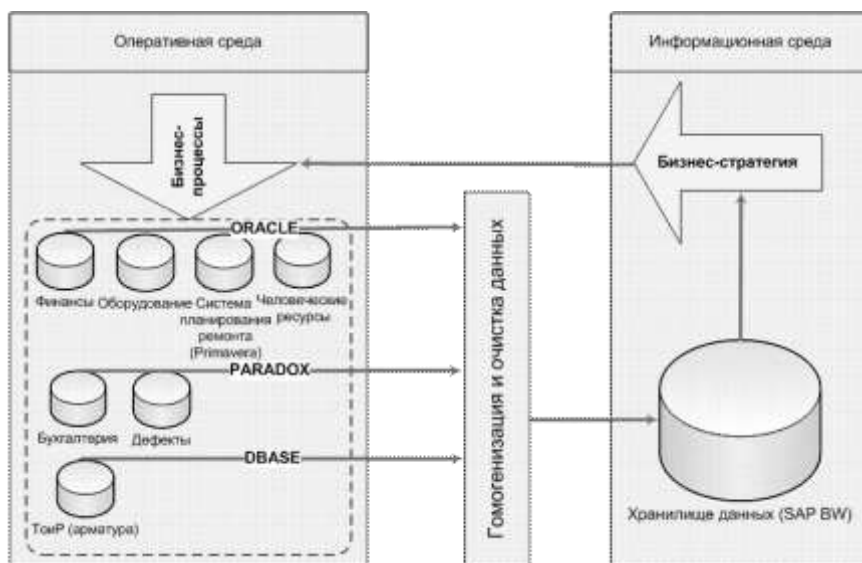


Рис. 6. Схема формирования успешности производственных процессов

В хранилище данных, реализованном на SAP BW, размещены данные из унаследованных информационных систем, определен порядок их пополнения и доступа к ним при построении системы показателей успешности. Проведенные работы показали, что перенос данных из разнородных систем в SAP BW требует больших затрат времени высококвалифицированных специалистов. Тем не менее, полученный опыт работы по интеграции унаследованных ИС с SAP будет востребован при создании корпоративной информационной системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жаркина Л.В. Концептуальные положения контроллинга и основные направления его создания на Балаковской АЭС / Л.В. Жаркина, Е.А. Ларин // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2006. № 4 (20). С. 147-152.

Жаркина Лариса Викторовна –
экономист филиала концерна ФГУП «Росэнергоатом» «Балаковская АЭС»

Статья поступила в редакцию 05.07.07, принята к опубликованию 05.12.07

Е.А. Ларин, С.В. Ялов

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
И СИСТЕМНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГТУ С ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ КОНТУРОМ
НА НИЗКОКИПЯЩЕМ РАБОЧЕМ ТЕЛЕ**

Изложены методические положения расчета энергетических характеристик газотурбинных установок с утилизационным контуром на низкокипящих веществах. Определены рациональные тепловые схемы утилизационного энергетического контура и их системная эффективность.

E.A. Larin, S.V. Yalov

**MATHEMATICAL MODELLING
OF ENERGY CHARACTERISTICS AND SYSTEM EFFICIENCY
GTU WITH LOW TEMPERATURE BOILING WORKING ENERGY PLANT**

Methodological bases of calculations of energy characteristics of gas and turbine units with utilization outlines on low boiling substances are presented. Rational heat schemes utilization energy outlines and their efficiency are determined here.

Современные системы транспорта природного газа характеризуются применением компрессорных станций с установленной мощностью более 500 МВт, оснащенных газоперекачивающими агрегатами (ГПА) единичной мощностью 10, 12, 16 и 25 МВт с газотурбинным приводом центробежных нагнетателей (ЦН). Особенностью газотурбинного привода ЦН являются относительно низкие значения эффективного КПД газотурбинного привода вследствие высокой температуры продуктов сгорания после газовой турбины, не превышающего в реальных условиях эксплуатации 35% для самых совершенных типов ГПА. Вследствие этого с выхлопными газами современных газотурбинных установок теряется до 70% теплоты, полученной в результате сгорания топлива. Проблема утилизации теплоты уходящих газов газотурбинных установок (ГТУ) становится все более актуальной на фоне растущих мировых цен на природный газ. Энергетический потенциал выхлопа установленных в системах транспорта природного газа ГТУ составляет около 500 млн. ГДж/год, что эквивалентно 13 млрд. м³ природного газа в год.

Применяемые в настоящее время системы утилизации теплоты уходящих газов газотурбинного привода ЦН для теплоснабжения промплощадок компрессорных станций (КС) не решают проблему повышения эффективности использования газа в камерах сгорания ГТУ. Это обусловлено относительно низким уровнем теплотребления промплощадок и социальной сферы систем транспорта газа, режимами теплотребления, конструктивными особенностями котлов-утилизаторов (КУ), перерасходом топлива (до 2,5%) в камерах сгорания ГТУ для компенсации дополнительных аэродинамических сопротивлений КУ.

Вместе с тем, одной из важнейших проблем систем транспорта природного газа является обеспечение надежного электроснабжения КС. Тенденция снижения надежности электроснабжения предприятий ОАО «Газпром» сохраняется. Так, общая продолжительность и количество аварийных и ремонтных отключений в системах внешнего электроснабжения за 2005 год, следствием которых явились остановки технологического оборудования на объектах ОАО «Газ-

пром», составили 45700 часов и 1099 случаев отключений. Особая актуальность этой проблемы характерна для удаленных районов, где электроснабжение КС осуществляется от линий электропередач с относительно низкой надежностью их работы, в то время как оптимальным расстоянием транспорта электроэнергии от генерирующего источника до потребителя по ВЛ-220 кВ считается расстояние около 130 км. В целях повышения надежности электроснабжения на КС используются электростанции собственных нужд для автономного, резервного или аварийного электроснабжения на базе газотурбинных установок. Эти электростанции имеют недопустимо низкий электрический КПД и низкие показатели эксплуатационной надежности. Все это приводит к необходимости применения двойного или тройного резервирования, что влечет за собой резкое удорожание производимой электроэнергии.

Для решения указанной задачи в ОАО «Газпром» разработана и реализуется отраслевая программа развития малой энергетики для энергообеспечения производственной и социальной инфраструктуры систем транспорта природного газа электрической и тепловой энергией на базе собственных источников. Одним из эффективных направлений энергообеспечения систем транспорта газа является создание утилизационных энергетических комплексов с использованием низкокипящих веществ (НКВ). Созданию таких энергетических установок должны предшествовать комплекс исследований по обоснованию схем и параметров, топливной и общей системной эффективности в реальных условиях их функционирования на основе математического моделирования термодинамических процессов в элементах утилизационного контура, выбор рабочих тел и определение конструктивных характеристик основного оборудования.

В основу разработки математической модели расчета энергетических характеристик утилизационного энергетического комплекса (УЭК) ГПА с использованием НКВ положен учет специфических факторов: режимы работы ГПА, зависящие от режимов работы магистрального газопровода (МГ), режимы потребления тепловой и электрической энергии, генерируемых в утилизационном контуре, климатические факторы, способы регулирования электрической и тепловой мощности комплекса.

На рис. 1 приведена принципиальная тепловая схема УЭК с использованием НКВ в качестве рабочего тела, а на рис. 2 – реализующий ее термодинамический цикл. На этапе проектирования в качестве показателей термодинамического совершенства комбинированных теплоэнергетических установок использованы электрический КПД и удельная выработка электроэнергии на тепловом потреблении. Для исследуемой установки определение этих показателей имеет свои особенности, заключающиеся в том, что, как следует из рис. 2, в термодинамическом цикле имеется определенная часть работы, которая вырабатывается по раздельной схеме производства электроэнергии с КПД, ниже среднесистемного.

Реальная системная топливная эффективность утилизационного энергетического комплекса определяется путем совместного учета изменений значений коэффициента использования теплоты топлива k_{um} , удельной выработки электроэнергии на тепловом потреблении y_m^3 и электрического КПД по сравнению с раздельной выработкой электрической и тепловой энергии с учетом системных факторов. Это особенно важно для утилизационных контуров ГПА, у которых величина раздельной выработки электроэнергии всегда больше нуля. В отопительных утилизационных контурах ГПА температура уходящих газов T_{yx} больше температуры наружного воздуха T_0 . Количество теплоты, полезно используемой в котле-утилизаторе (КУ), характеризуется коэффициентом использования теплоты уходящих газов

$$\varphi_{yx}^{zmy} = \varphi_{yx} + \psi_{yx} = (q_{ky}^{m\phi\phi} + q_{ky}^{nmy})/q_{pac}^{zmy} < 1, \quad (1)$$

где $q_{ky}^{m\phi\phi}$ – теплота выхлопных газов ГТУ, используемая для нагрева сетевой воды в теплофикационном экономайзере (ТФЭ); q_{ky}^{nmy} – теплота выхлопных газов ГТУ, используемая для генерации пара в парогенераторе; q_{pac}^{zmy} – располагаемая теплота продуктов сгорания (без уче-

та теплоты дополнительно сжигаемого в камерах дожигания топлива $\Delta q_{дож}$); ϕ_{yx} – доля теплоты уходящих газов ГТУ, используемая для выработки теплоты в ТФЭ $\phi_{yx} = q_{тфэ} / q_{рас}^{эму} < 1$ (в случае отсутствия ТФЭ $\phi_{yx} = 0$); ψ_{yx} – доля теплоты уходящих газов ГТУ, используемая для выработки электроэнергии в энергетическом контуре НКВ $\psi_{yx} = q_{нкв} / q_{рас}^{эму} < 1$ (в случае отсутствия контура с использованием НКВ $\psi_{yx} = 0$).

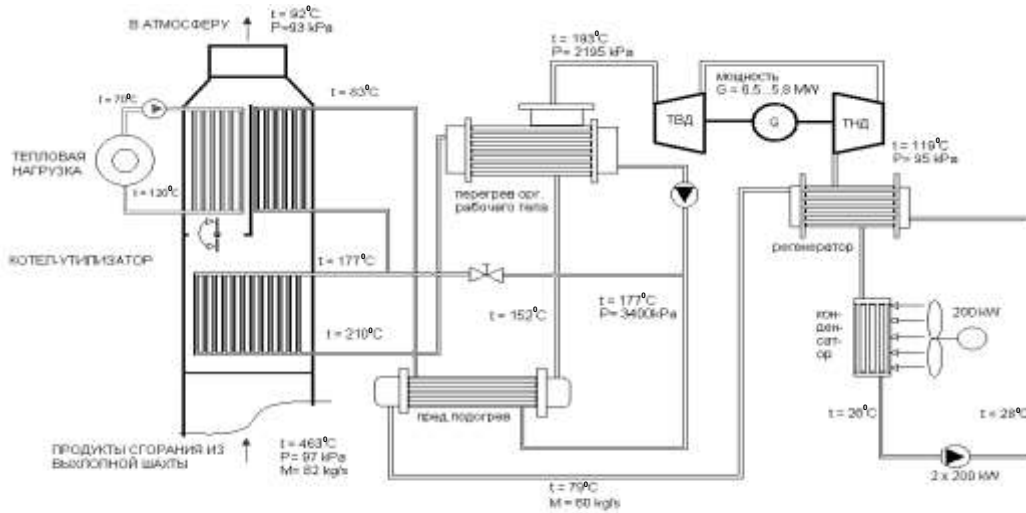


Рис. 1. Принципиальная схема УЭК

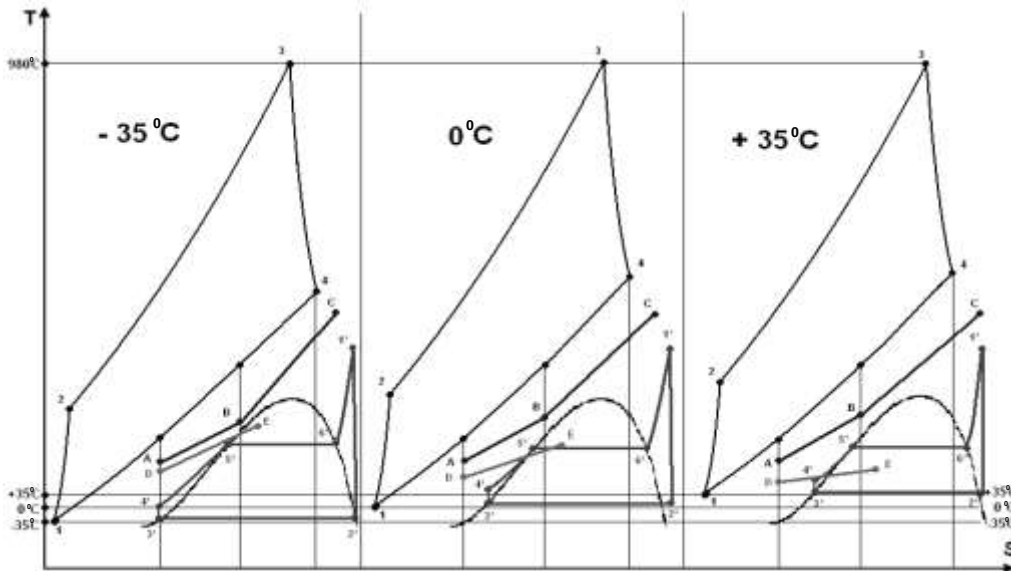


Рис. 2. Термодинамический цикл ГПА с утилизационным контуром бинарного типа при различных температурах наружного воздуха

Системная экономия топлива от комбинированной выработки электроэнергии и теплоты при заданном режиме работы ГПА определяется как разность суммарных расходов топлива на отпуск заданных количеств электроэнергии и теплоты при раздельном производстве электроэнергии на КЭС $B_{кэс}$ и теплоты на котельной $B_{кот}$ и комбинированном способе их производства на исследуемой установке $B_{сна}$, то есть

$$\Delta B_{эк} = (B_{кэс} + B_{кот}) - B_{сна}. \quad (2)$$

При этом необходимо соблюдение энергетических условий сопоставимости сравниваемых вариантов, а именно, покрытие заданных графиков электрических и тепловых нагрузок.

Величины $B_{кэс}$ и $B_{кот}$ определяются по формулам

$$B_{кэс} = \mathcal{E}_{выр} / \eta_{э}^{кэс} \cdot Q_n^p, \quad B_{кот} = Q_{выр} / \eta_{кот} \cdot Q_n^p, \quad (3)$$

где $\eta_{э}^{кэс}$, $\eta_{кот}$ – соответственно, электрический КПД КЭС и КПД котельной.

Суммарный расход топлива на комбинированную выработку электроэнергии $\mathcal{E}_{выр}$ и теплоты $Q_{выр}$ в УЭК определяется дополнительным расходом топлива в камере сгорания газотурбинного привода ГПА на компенсацию дополнительного сопротивления утилизационного тракта и может быть определен по формуле

$$B_{сна} = (1 + \delta) B_{кэс}, \quad (4)$$

где δ – коэффициент, учитывающий дополнительный расход топлива в камере сгорания за счет дополнительного сопротивления КУ и ТФЭ; $B_{кэс}$ – расход топлива в камере сгорания при заданной мощности ГПА и отсутствии сопротивления КУ и ТФЭ.

Действительная экономия топлива в системе всегда оказывается ниже расчетной, полученной по формуле (2). Это обусловлено потерями энергии в схемах ГПА с УЭК на привод сетевых насосов $\Delta \mathcal{E}_{сн}$, перекачивающих сетевую воду по прямому и обратному магистральным трубопроводам, а также наличием потерь теплоты $\Delta Q_{ном}$ при транспорте горячей воды.

Расчетный расход топлива, соответствующий выработке электроэнергии, расходуемой на перекачку горячей воды, рассчитывается как

$$\Delta B_{э}^{сч} = \Delta \mathcal{E}_{сн} / \eta_{э}^{кэс} \cdot Q_n^p, \quad (5)$$

где $\Delta \mathcal{E}_{сн} = \frac{\Delta P_{мп} \cdot G_{св}^n}{\eta_{лп} \cdot \rho_в}$ – электроэнергия, расходуемая на перекачку горячей воды.

Для компенсации потерь в тепловых сетях (за счет утечек теплоносителя и тепловых потерь) необходим соответствующий расход топлива $\Delta B_m^{ном}$, определяемый как

$$\Delta B_m^{ном} = \xi_Q \cdot Q_{\Sigma}^{ном} / \eta_{кот} \cdot Q_n^p, \quad (6)$$

где ξ_Q – коэффициент, учитывающий то обстоятельство, что часть теряемой теплоты производится на исследуемой установке комбинированным способом.

Таким образом, системная экономия топлива от комбинированной выработки электроэнергии и теплоты определится как разность

$$\Delta B_{эк}^{сч} = \Delta B_{эк} - \Delta B_{э}^{сч} - \Delta B_m^{ном} - \Delta B_{э}^{паз}, \quad (7)$$

в которой величина $\Delta B_{э}^{паз}$ представляет собой перерасход топлива за счет раздельной выработки электроэнергии.

Величина экономии топлива в системе за счет комбинированной выработки электроэнергии и теплоты в УЭК на НКВ зависит, главным образом, от удельной выработки электроэнергии на тепловом потреблении $y_э^m$, то есть от совершенства термодинамического цикла теплофикационной установки и ее термодинамических параметров, коэффициента ис-

пользования теплоты топлива теплофикационного потока K_{um}^{mf} , КПД замещающей КЭС $\eta_3^{кэс}$, доли отдельной выработки электроэнергии $v_3^{паз}$, доли пиковой тепловой мощности $v_Q^{пик}$, а также потерь энергии при транспорте горячей воды.

В условиях низких температур наружного воздуха северных районов использование воды и водяного пара в качестве рабочего тела УЭК крайне затруднительно. Кроме того, относительно низкие температуры уходящих газов ГПА обуславливают необходимость поиска новых рабочих тел УЭК. Кроме фреонов в качестве низкокипящих рабочих тел используются углеводороды алкановой группы (бутан, изобутан, пентан) и другие органические соединения. Использование углеводородов алкановой группы и органических соединений позволяет утилизировать средне- и низкпотенциальные потоки теплоты. Мировой опыт, в частности израильской фирмы «Ормат технолоджи», подтверждает возможность и эффективность использования в качестве рабочих тел данных веществ. Эта фирма разработала и установила на компрессорной станции в штате Альберта (Канада) утилизационный энергетический мощностью 5 МВт комплекс, в котором в качестве рабочего тела используется изобутан. Сумское НПО (Украина) сконструировало и поставило в опытно-промышленную эксплуатацию утилизационный комплекс, использующий в качестве рабочего тела Н-бутан.

Моделирование процессов УЭК базируется на расчете термодинамических и теплофизических свойств НКВ с использованием комплекса программ «ГазКондНефть» (Институт газа Академии наук Украины). Встроенные библиотечки программы позволяют выполнять многовариантные расчеты режимов, балансов и основных показателей качества смоделированных систем. Для расчета конструктивных характеристик всего теплообменного оборудования и турбоустановки были разработаны математические модели, которые использовались далее для определения экономической эффективности использования утилизационного контура.

В качестве критерия выбора рабочего тела УЭК приняты электрическая мощность контура и эквивалентная площадь теплообмена, определенная в результате конструкторского расчета схем с различными рабочими телами для различных типов ГПА для различных температур наружного воздуха. Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнительная характеристика УЭК на различных НКВ

Тип ГПА		Изобутан			Н-бутан			Н-пентан		
		-35	0	+35	-35	0	+35	-35	0	+35
НК -16-СТ	N, МВт	5,1	5,2	5,4	5,0	5,1	5,4	3,9	4,0	4,4
	S, м ²	2789			3175			4577		
ГПА-12	N, МВт	1,3	1,4	1,5	1,3	1,4	1,5	1,0	1,1	1,1
	S, м ²	819			855			2650		

Анализ приведенных данных позволяет сделать предварительный вывод, что использование Н-бутана и изобутана дает практически одинаковую мощность, незначительные отклонения можно отнести к погрешностям вычислений, тогда как использование Н-пентана ведет к снижению мощности на 25-20%. Также можно отметить, что наименьшая площадь теплообменных поверхностей и, как следствие, металлоемкость установки в целом получаются при использовании изобутана. В пользу изобутана также говорит и то, что у него самая высокая температура самовоспламенения 462°С по сравнению с 405 и 287°С у бутана и пентана соответственно. Степень токсичности у всех трех веществ одинакова.

Экономическая эффективность УЭК определена для варианта компрессорного цеха, включающего три ГПА-Ц-16, два из которых постоянно находятся в работе. Исходные данные для расчета экономической эффективности приведены в табл. 2.

Таблица 2

Исходные данные для расчета эффективности УЭК

Показатели	Значения
Капитальные затраты для одного цеха из трех агрегатов ГПА-Ц-16, млн. долл. США	4,2
Срок службы, лет	17
Электрическая мощность, МВт	10,4
Стоимость электроэнергии, руб./МВт.ч	1175
Стоимость изобутана, руб/т	4000
Количество изобутана:	
– для работы, т	50
– для резерва, т	150
Номинальный расход топлива (для одного агрегата), м ³ /ч	6180
Перерасход топливного газа (для одного агрегата), м ³ /ч	154,5
Стоимость природного газа, руб./1000 м ³	372,3
Численность из расчета на один цех всего, чел.	9
Коэффициент дисконтирования	0,15

При определении экономической эффективности УЭК рассматривалось три варианта реализации избыточной электроэнергии на региональном рынке электроэнергии и мощности. Результаты расчетов и сроки окупаемости приведены на рис. 3.

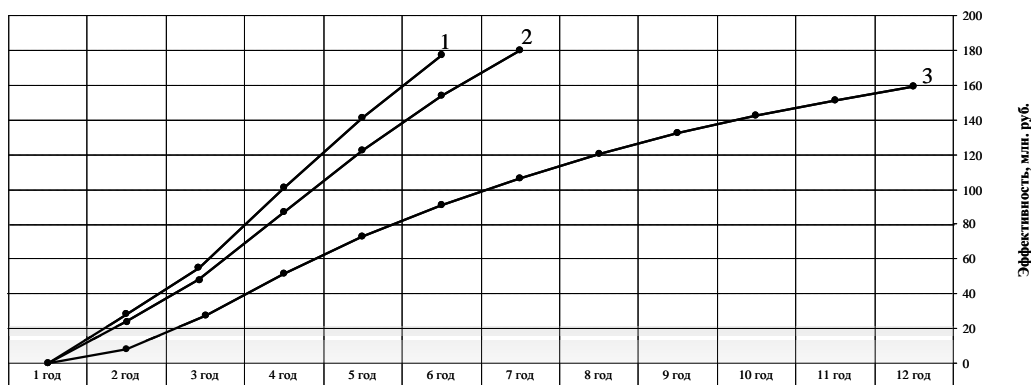


Рис. 3. Изменение величины чистого дисконтированного дохода УЭК:
1, 2, 3 – соответственно, 100%-й, 75%-й и 50%-й объем
реализации электроэнергии на региональном энергетическом рынке

Из приведенных данных следует, что создание утилизационного энергетического комплекса на базе ГПА позволяет решить ряд задач надежного и эффективного энергообеспечения производственной и социальной инфраструктуры предприятий ОАО «Газпром».

ЛИТЕРАТУРА

1. Андрющенко А.И. Системная эффективность бинарных ПГУ-ТЭЦ / А.И. Андрющенко // Теплоэнергетика. 2000. № 12. С. 11-15.

Ларин Евгений Александрович –
кандидат технических наук, профессор кафедры «Теплоэнергетика»
Саратовского государственного технического университета

Ялов Сергей Викторович –
директор Ново-Уренгойского техникума газовой промышленности

Статья поступила в редакцию 07.09.07, принята к опубликованию 05.12.07

А.И. Андриященко, Е.А. Ларин, А.А. Соколов, А.В. Чикалкин

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОФИКАЦИОННЫХ ПГУ**

Изложены методические положения расчета системной топливной эффективности и энергетических характеристик отопительных ПГУ с учетом реальных условий их функционирования в системах теплоэнергообеспечения.

A.I. Andriushenko, E.A. Larin, A.A. Sokolov, A.V. Chikalkin

**MATHEMATICAL MODELLING OF POWER CHARACTERISTICS
OF CENTRAL HEATING SGU**

Methodical positions of calculation of system fuel efficiency and power characteristics heating SGU are presented in view of real conditions of their functioning in heat power securing systems.

Под теплофикацией, как известно, понимается централизованное теплоснабжение при комбинированной выработке электроэнергии и теплоты. Ее массовое применение обеспечило определенную экономию топлива за счет ликвидации мелких котельных. В последующие годы, в связи с ростом КПД КЭС (от 20% в 30-е годы до 40% и выше) и ростом КПД отопительных котельных (до 90% и выше в связи с переводом их на природный газ), топливная и общая экономическая эффективность теплофикации значительно снизилась. Кроме того, свою отрицательную роль сыграла неправильная методика определения удельных расходов топлива на ТЭЦ – отнесение всей экономии топлива только на электроэнергию, неучет потенциала отпускаемой теплоты. Все это привело во многих случаях к экономической невыгодности получения теплоты от ТЭЦ для отопления и технологических нужд промпредприятий. Отрицательное влияние на применение централизованного теплоснабжения от ТЭЦ оказывает также низкая надежность магистральных тепловых сетей, вызываемая внешней и внутренней коррозией стальных труб. Негативно сказываются и большие потери, вызванные некачественной изоляцией труб и утечками сетевой воды.

Все это требует создания новых систем теплоснабжения, где осуществлялась бы комбинированная выработка тепловой и электрической энергии при минимальных потерях в сетях и максимальной величине удельной выработки электроэнергии на тепловом потреблении y_s^m . Необходима разработка новых объективных показателей эффективности и методов оптимизации теплофикационных систем, позволяющих учесть реальные потери эксергии как во всей системе в целом, так и в каждом ее элементе в отдельности.

Совершенствование теплофикационных систем связано с применением парогазовых установок (ПГУ) с комбинированной выработкой электрической и тепловой энергии, позволяющих в 1,5-2,0 раза увеличить удельную выработку электроэнергии на тепловом потреблении. Оптимизационные исследования по выбору схем и параметров теплофикационных ПГУ должны производиться на основе анализа их функционального назначения, достижения максимальной экономии топлива в системе и общей технико-экономической эффективности, что связано с учетом большого количества взаимосвязанных системных факторов и условий. Обязательным условием при этом является выполнение требований энергетической сопоставимости вариантов.

Как правило, ПГУ малой и средней мощности выполняются по бинарному или частично бинарному (с дожиганием топлива в среде уходящих газов) термодинамическим циклам одного или двух давлений. Большинство схем ПГУ, реализованных в Германии, выполнены в «бесконденсаторном» варианте, то есть пар после расширения в паровой турбине (ПТ) поступает в сетевой подогреватель (СП). Как правило, нагрев сетевой воды осуществляется отработавшим в турбине паром и параллельно или последовательно уходящими газами газотурбинной установки (ГТУ) в котле-утилизаторе (КУ). Одной из особенностей ПГУ является зависимость ее мощности и располагаемой утилизируемой теплоты уходящих газов ГТУ от способа регулирования мощности ГТУ и температуры наружного воздуха. Эффективным способом уменьшения зависимости тепловой и электрической мощности установки от температуры наружного воздуха является установка в КУ дополнительной камеры сгорания топлива в среде уходящих газов. За счет сжигания дополнительного топлива в камере дожигания (КД) котла-утилизатора возможно повышение температуры продуктов сгорания перед КУ, что позволяет стабилизировать параметры пара или увеличить тепловую и электрическую мощности паротурбинной установки. Кроме того, появляется возможность покрытия пиковых тепловых нагрузок и расширение диапазона регулирования тепловой мощности ПГУ. Хотя дожигание топлива в КД КУ приводит к снижению удельной выработки электроэнергии на тепловом потреблении, в некоторых случаях оно может привести к повышению тепловой экономичности установки.

Возможность сжигания и количество дополнительно сжигаемого в КД КУ топлива определяется кислородным балансом установки. Количество кислорода в уходящих газах ГТУ зависит от температуры газов перед турбиной. Сжигание дополнительного топлива в среде уходящих газов возможно до остаточного содержания кислорода в них около 14%. При снижении температуры наружного воздуха для некоторых типов ГТУ снижается температура перед газовой турбиной. При этом концентрация кислорода в уходящих газах ГТУ повышается, что позволяет сжигать дополнительное количество топлива в КУ для повышения температуры уходящих газов и обеспечить поддержание параметров пара в КУ. Таким образом, покрытие неравномерности тепловых нагрузок можно обеспечить изменением расхода топлива в дожигающее устройство и изменением расхода пара в сетевой подогреватель ПТ.

Определение эффективности использования ДУ в схемах теплофикационных ПГУ при определенной температуре наружного воздуха (например, расчетной для проектирования систем отопления или расчетной для определения характеристик проточной части ГТУ) может привести к неверным выводам вследствие существенной зависимости показателей эффективности газотурбинного цикла от этой температуры, увеличения тепловой нагрузки при понижении температуры наружного воздуха. Кроме того, в летний период, когда остается только нагрузка горячего водоснабжения (ГВС), а температура уходящих газов ГТУ возрастает, необходимость в использовании ДУ отпадает. Поэтому эффективность использования ДУ должна определяться с учетом реальных климатических и режимных факторов.

Одним из вопросов, требующих детальной проработки, является обоснование выбора типа паротурбинной части ПГУ (в том числе и с точки зрения эффективности использования дожигающего устройства). Все многообразие вариантов утилизационной (паротурбинной) части ПГУ можно сгруппировать по следующим признакам: количеству давлений пара в турбине (одного, двух и трех давлений); типу паротурбинной установки (ПТУ) (турбины типа К, Т, Р, ПТ); способу подключения сетевых подогревателей (последовательное, параллельное или смешанное соединение СП турбины и КУ ГТУ). Использование пара двух и трех давлений в установках малой и средней мощности (10-50 МВт) усложняет схему, заметно повышает ее стоимость. Использование циклов двух или трех давлений пара в теплофикационных установках мощностью 10-20 МВт не приводит к повышению эффективности ПГУ. Переход от одного контура к двум повышает КПД конденсационных ПГУ на 0,7%, а к трем еще на 0,16%. Использование в схемах ПГУ тех или иных типов турбин, при одинаковых

начальных параметрах пара обосновывается, как правило, тепловой нагрузкой. При использовании турбины типа К или Т отпуск теплоты возможен от сетевых подогревателей. Установка турбины типа Р позволяет всю теплоту отработанного пара ПТ передать сетевой воде. Возможны два варианта включения СП – параллельное и последовательное включение СП ПТ и СП КУ. Большинство современных схем используют параллельную схему включения СП. Недостатком этих схем является использование для подогрева сетевой воды в подогревателе ПТ пара более высоких параметров.

На рис. 1 приведена принципиальная тепловая схема теплофикационной ПГУ с последовательным и параллельным включением СП ПТ и СП КУ. Рассмотрено 5 схем отопительных ПГУ-ТЭЦ, состоящих из двух ГТУ с КУ и одной ПТУ и различающихся элементами утилизационных частей и способами их соединения:

- а) ПГУ с турбиной типа Т с последовательным включением СП ПТ и СП КУ;
- б) ПГУ с турбиной типа Т с параллельным включением СП ПТ и СП КУ;
- в) ПГУ с турбиной типа Р с параллельным включением СП ПТ и СП КУ;
- г) ПГУ с турбиной типа Р с последовательным включением СП ПТ и СП КУ;
- д) ПГУ с турбиной типа К и СП КУ.

Выбор наиболее эффективной схемы является достаточно сложной научно-технической задачей, решение которой должно производиться с учетом реальных факторов работы ПГУ в системах теплоэнергоснабжения на основе математического моделирования расчета параметров термодинамического цикла ПГУ, конструктивных характеристик основного оборудования с определением энергетических характеристик установок и показателей эффективности.

Одними из важнейших действий при анализе теплофикационных ПГУ являются выбор и обоснование показателей термодинамического совершенства циклов и показателей их системной топливной эффективности, определяемых из теплового и эксергетического балансов системы теплоэнергообеспечения [1, 2].

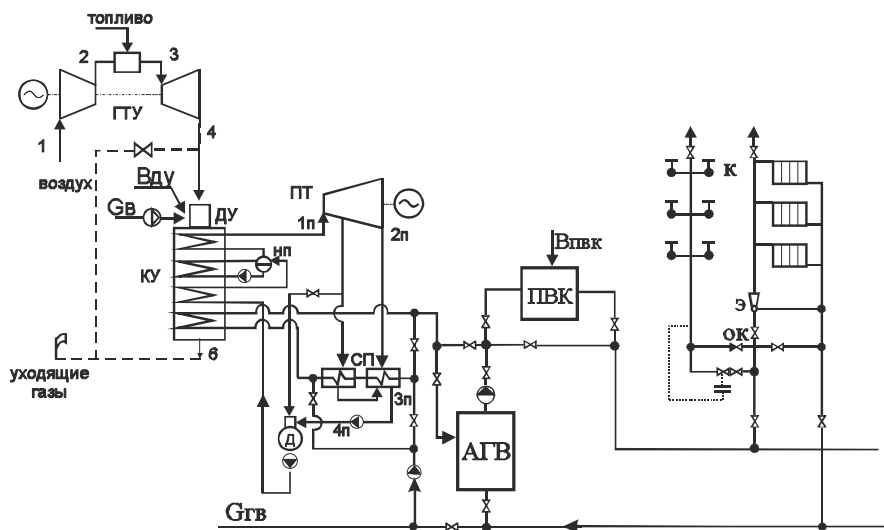


Рис. 1. Принципиальная тепловая схема отопительной ПГУ с последовательным или параллельным включением СП ПТ и СП КУ

Одним из таких показателей эффективности системы теплоснабжения, отражающим ее тепловой баланс, служит коэффициент использования теплоты топлива в системе

$$K_{um}^c = \frac{\sum \mathcal{E}_{uc}^c + \sum Q_{kc}^c}{B Q_n^p}, \quad (1)$$

где $\sum \mathcal{E}_{uc}^c$ – полученная всеми потребителями электроэнергия

$$\sum \mathcal{E}_{kc}^c = \sum \mathcal{E}_{выр}^c - \sum \Delta \mathcal{E}_{ном}^c; \quad (2)$$

$\sum Q_{uc}^c$ – полученная всеми потребителями теплота

$$\sum Q_{uc}^c = \sum Q_{выр}^c - \sum \Delta Q_{ном}^c; \quad (3)$$

$\sum \Delta \mathcal{E}_{ном}^c$ и $\sum \Delta Q_{ном}^c$ – потери электроэнергии и теплоты в системе, включая их расход на транспорт теплоносителей.

Другим показателем, отражающим эксергетический баланс этой же системы, является эксергетический КПД системы

$$\eta_{ex}^c = \frac{\sum \mathcal{E}_{uc}^c + \sum Ex^Q}{B Ex^{ном}}, \quad (4)$$

где $\sum Ex^Q$ – полученная всеми тепловыми потребителями эксергия, равная разности отпущенной от ТЭЦ и котельных эксергии ($\sum E_{выр}^Q$) и суммарных ее потерь ($\sum \Delta E_{ном}^Q$)

$$\sum Ex^Q = \sum E_{ном}^Q - \sum \Delta E_{ном}^Q. \quad (5)$$

Важно иметь в виду, что эти два показателя (K_{um}^c и η_{ex}^c) не исключают, а дополняют друг друга. В частности, первый показатель позволяет наиболее просто рассчитывать расход топлива в системе, поскольку $\sum \mathcal{E}_{uc}^c$ и $\sum Q_{uc}^c$ непосредственно измеряются счетчиками у потребителей, которые, как правило, являются заданными, по формуле

$$B_c = \frac{\sum \mathcal{E}_{uc}^c + \sum Q_{uc}^c}{K_{um}^c \cdot Q_n^p}. \quad (6)$$

Здесь в качестве Q_n^p принимают теплоту сгорания условного топлива (29,2 МДж/кг), что позволяет объединять различные виды топлив, сжигаемых в отдельных частях системы. Величину K_{um}^c можно предварительно рассчитать на основе показателей реального цикла установки и вероятных потерь во всех элементах системы.

Вместе с тем, экономия топлива от замены раздельной системы выработки электрической и тепловой энергии теплофикационной не может быть определена по величине расхода топлива только на ПГУ-ТЭЦ или по какому-либо ее КПД. Для этого необходимо сравнить расход топлива в исследуемой системе с его расходом в раздельной системе при одинаковых количествах отданных потребителям энергий. Однако, недопустимо по величине $K_{um}^{теп}$, рассчитанного только для ТЭЦ, судить о ее совершенстве, поскольку он не зависит от соотношения между электрической и тепловой выработками, а только от их суммы. Экономия же топлива по сравнению с раздельной системой очень сильно зависит от соотношения между этими выработками на ТЭЦ, т.е. от удельной выработки электроэнергии на тепловом потреблении y_3^m . Поэтому возможно, что экономия топлива от работы ТЭЦ увеличивается и в случае уменьшения $K_{um}^{теп}$, если только при этом увеличилась y_3^m . Также невозможно определить величину экономии топлива, достигаемой в теплофикационной системе от комбинированной выработки электрической и тепловой энергии на ТЭЦ, только по величине эксергетического КПД самой ТЭЦ. В ряде случаев бывает, что эксергетический КПД ТЭЦ оказывается более низким, чем аналогичной КЭС, а экономия топлива в системе достигается большая. В этом

случае определяет экономию топлива не прирост КПД ТЭЦ, а ликвидация отопительных котельных, эксергетический КПД которых намного ниже, чем ТЭЦ, даже и в том случае, когда тепловой КПД котельных будет больше $K_{ит}^{теп}$.

Экономия топлива от замены раздельной системы теплоснабжения теплофикационной составит

$$\Delta B_{эк}^c = B_{раз}^c - B_{тф}^c, \quad (7)$$

где расход топлива в раздельной системе ($B_{раз}^c$) и в теплофикационной ($B_{тф}^c$) определяется при одинаковой в каждой из них отдаче потребителям электрической и тепловой энергии.

В течение суток и года вырабатываемые количества энергии изменяются в соответствии с требованиями потребителей. По этой причине все системные балансы должны составляться по каждому виду энергии, отпускаемой за год, сутки и за час, а также по максимуму и минимуму ее отпуска в соответствии с заданными графиками. Основным исходным вариантом нагрузок системы обычно принимается так называемый расчетный период, соответствующий минимальной среднесуточной температуре наружного воздуха за самые холодные сутки зимнего периода. Например, для г. Москвы соответствующая этому периоду расчетная температура воздуха принята -30°C , для г. Саратова -25°C . В этот период теплофикационная система должна отдавать потребителям максимальное количество теплоты (Q_{max}). Годовой график отпуски теплоты по продолжительности на отопление, вентиляцию и горячее водоснабжение (суммарно) приведен на рис. 2.

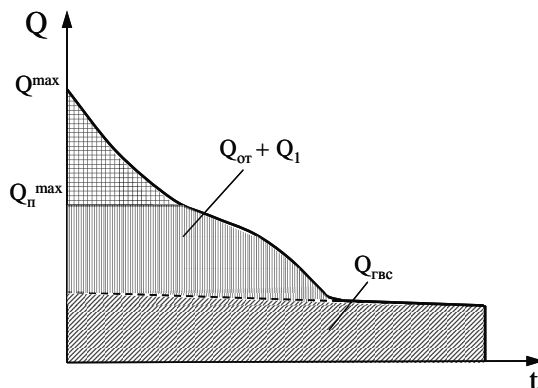


Рис. 2. Годовой график отпуски теплоты по продолжительности

Коэффициент теплофикации обычно составляет 0,6-0,7. Отношение $Q_{гвс}/Q_{max}$, как правило, не превышает 0,25. Вместе с тем, учитывая, что горячее водоснабжение осуществляется в течение всего года, а отопление только $n_{от}$ часов, отношение годового отпуски теплоты на горячее водоснабжение к общему отпуску теплоты в средней полосе России достигает 0,44.

Расчетная системная экономия топлива $\Delta B_{эк}^c$ представляет разницу между расходами топлива в раздельной и теплофикационной системах, где расход топлива в раздельной системе $B_{раз}^c$ представляет собой сумму расходов топлива на КЭС ($B_{кэс}$) и в отопительных котельных ($B_{кот}$). Каждый из этих расходов определяется по формулам

$$B_{кэс} = \frac{\mathcal{E}_{раз}^{кэс}}{\eta_3^{кэс} Q_H^p} = \frac{\mathcal{E}_{раз}^{кэс}}{\eta_{ex}^{кэс} Ex^{мон}}; \quad (8)$$

$$B_{\text{кот}} = \frac{Q_{\text{max}}^{\text{раз}}}{\eta_{\text{кот}} Q_{\text{н}}^{\text{р}}} = \frac{Ex_{\text{max}}^{\text{Q}}}{\eta_{\text{ex}}^{\text{кот}} - Ex^{\text{мон}}}, \quad (9)$$

где $\mathcal{E}_{\text{раз}}^{\text{кэс}}$ и $Q_{\text{max}}^{\text{раз}}$ – количества электроэнергии и теплоты, вырабатываемых в раздельной системе; $Ex_{\text{max}}^{\text{Q}}$ – эксергия этой теплоты; $\eta_{\text{э}}^{\text{кэс}}$ – электрический КПД нетто КЭС; $\eta_{\text{кот}}$ – КПД имеющихся в раздельной системе котельных, учитывающий также потери в распределительной тепловой сети; $\eta_{\text{ex}}^{\text{кот}}$ – эксергетический КПД котельной для тех же условий.

Расход топлива $B_{\text{мф}}^{\text{с}}$ в теплофикационной системе будет состоять из суммы его расходов на комбинированную выработку $B_{\text{ком}}^{\text{мэц}}$ электроэнергии и теплоты на ТЭЦ, раздельную выработку $\Delta B_{\text{раз}}^{\text{э}}$ недостающей части электроэнергии на замещаемой КЭС (или «конденсационными хвостами» теплофикационных турбин ПГУ-ТЭЦ), а также расхода $\Delta B_{\text{раз}}^{\text{Q}}$ в пиковых и замещающих котельных

$$B_{\text{мф}}^{\text{с}} = B_{\text{ком}}^{\text{мэц}} + \Delta B_{\text{раз}}^{\text{э}} + \Delta B_{\text{раз}}^{\text{Q}}. \quad (10)$$

Каждая из этих составляющих расхода топлива может быть рассчитана по формулам, вытекающим из теплового и эксергетического балансов системы.

Исходя из теплового баланса расход топлива на ТЭЦ на выработку электрической и тепловой энергии составит

$$B_{\text{ком}}^{\text{мэц}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{ком}}^{\text{мэц}} + Q_{\text{ком}}^{\text{мэц}}}{K_{\text{ит}}^{\text{мф}} Q_{\text{н}}^{\text{р}}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{ком}}^{\text{мэц}} + Ex_{\text{ком}}^{\text{Q}}}{\eta_{\text{ex}}^{\text{мф}} Ex^{\text{мон}}}, \quad (11)$$

где $Q_{\text{ком}}^{\text{мэц}}$ – всегда больше, чем получает этой теплоты потребитель на величину потерь в сетях.

Расход топлива на КЭС определится как

$$\Delta B_{\text{раз}}^{\text{э}} = \frac{\Delta \mathcal{E}_{\text{раз}}^{\text{с}}}{\eta_{\text{э}}^{\text{зам}} Q_{\text{н}}^{\text{р}}} = \frac{\Delta \mathcal{E}_{\text{раз}}^{\text{с}}}{\eta_{\text{ex}}^{\text{зам}} Ex^{\text{мон}}}. \quad (12)$$

Расход топлива пиковых котельных при их расположении в тепловых узлах составит

$$\Delta B_{\text{раз}}^{\text{Q}} = \frac{\Delta Q_{\text{раз}}^{\text{с}}}{\eta_{\text{кот}} Q_{\text{н}}^{\text{р}}} = \frac{\Delta Ex_{\text{раз}}^{\text{Q}}}{\eta_{\text{ex}}^{\text{кот}} Ex^{\text{мон}}}. \quad (13)$$

Исходя из требований равного энергетического эффекта, т.е. одинаковой отдачи потребителям каждого вида энергии, должны выполняться следующие балансовые уравнения связи

$$\mathcal{E}_{\text{выр}}^{\text{кэс}} = \mathcal{E}_{\text{ком}}^{\text{мэц}} + \Delta \mathcal{E}_{\text{раз}}^{\text{с}} - \Delta \mathcal{E}_{\text{сн}}^{\text{м.с}} + \delta \mathcal{E}_{\text{пот}}^{\text{э.с}}; \quad (14)$$

$$Q_{\text{выр}}^{\text{раз}} = Q_{\text{ком}}^{\text{мэц}} + \Delta Q_{\text{раз}}^{\text{с}} - \Delta Q_{\text{пот}}^{\text{м.с}}, \quad (15)$$

где $\Delta \mathcal{E}_{\text{сн}}^{\text{м.с}}$ – расход электроэнергии на привод сетевых насосов; $\delta \mathcal{E}_{\text{пот}}^{\text{э.с}}$ – уменьшение электрических потерь в системе, вызванное уменьшением расстояния от ТЭЦ до электропотребителей по сравнению с КЭС; $\Delta Q_{\text{пот}}^{\text{м.с}}$ – потери теплоты в тепловых сетях (в том числе с утечками воды).

С учетом приведенного, экономия топлива в системе от теплофикации составит

$$\Delta B_{\text{жк}}^{\text{с}} = \left(\frac{\mathcal{E}_{\text{выр}}^{\text{кэс}}}{\eta_{\text{э}}^{\text{кэс}} Q_{\text{н}}^{\text{р}}} + \frac{Q_{\text{от}}^{\text{с}}}{\eta_{\text{кот}} Q_{\text{н}}^{\text{р}}} \right) - \left(\frac{\mathcal{E}_{\text{ком}}^{\text{мэц}} + Q_{\text{ком}}^{\text{мэц}}}{K_{\text{ит}}^{\text{мф}} Q_{\text{н}}^{\text{р}}} + \frac{\Delta \mathcal{E}_{\text{раз}}^{\text{с}}}{\eta_{\text{э}}^{\text{зам}} Q_{\text{н}}^{\text{р}}} + \frac{\Delta Q_{\text{пик}}^{\text{с}}}{\eta_{\text{кот}} Q_{\text{н}}^{\text{р}}} \right). \quad (16)$$

Отсюда с учетом балансовых уравнений связи (14) и (15) получим по тепловому балансу

$$\Delta B_{\text{эк}}^c = \frac{Q_{\text{ком}}^{\text{мэц}}}{Q_n^p} \left(y_{\text{э}}^{\text{мф}} \left(\frac{1}{\eta_{\text{э}}^{\text{кэс}}} - \frac{1}{K_{\text{ит}}^{\text{мф}}} \right) + \left(\frac{1}{\eta_{\text{ком}}} - \frac{1}{K_{\text{ит}}^{\text{мф}}} \right) \right) - \frac{\Delta \mathcal{E}_{\text{раз}}^c}{Q_n^p} \left(\frac{1}{\eta_{\text{э}}^{\text{з.а.м}}} - \frac{1}{\eta_{\text{э}}^{\text{кэс}}} \right) - \frac{\Delta \mathcal{E}_{\text{сн}}^{\text{мэс}} - \delta \mathcal{E}_{\text{ном}}^{\text{э.с}}}{\eta_{\text{э}}^{\text{кэс}} Q_n^p} - \frac{\Delta Q_{\text{ном}}^{\text{м.с}}}{\eta_{\text{ком}} Q_n^p}, \quad (17)$$

где $y_{\text{э}}^{\text{мф}}$ и $K_{\text{ит}}^{\text{мф}}$ – определяются только для теплофикационного потока пара ТЭЦ.

Аналогично, на основании тех же зависимостей, но уже выраженных через эксергетические показатели, т.е. на основании эксергетического баланса, получим

$$\Delta B_{\text{эк}}^c = \left(\frac{\mathcal{E}_{\text{выр}}^{\text{кэс}}}{\eta_{\text{эк}}^{\text{кэс}} \cdot Ex} + \frac{Ex_{\text{ком}}^Q}{\eta_{\text{эк}}^{\text{ком}} \cdot Ex^{\text{мон}}} \right) - \left(\frac{\mathcal{E}_{\text{ком}}^{\text{мэц}} + Ex_{\text{ком}}^{\text{мэц}}}{\eta_{\text{эк}}^{\text{мф}} \cdot Ex^{\text{мон}}} + \frac{\Delta \mathcal{E}_{\text{раз}}^c}{\eta_{\text{эк}}^{\text{з.а.м}} \cdot Ex^{\text{мон}}} + \frac{\Delta Ex_{\text{пнк}}^Q}{\eta_{\text{эк}}^{\text{ком}}} \right). \quad (18)$$

С учетом того, что практически $\eta_{\text{э}}^{\text{кэс}} = \eta_{\text{эк}}^{\text{кэс}}$ и $\eta_{\text{э}}^{\text{з.а.м}} = \eta_{\text{эк}}^{\text{з.а.м}}$, уравнение (18) преобразуется к виду

$$\Delta B_{\text{эк}}^c = \frac{Ex_{\text{ком}}^Q}{Ex^{\text{мон}}} \left(y_{\text{эк}}^{\text{мф}} \left(\frac{1}{\eta_{\text{э}}^{\text{кэс}}} - \frac{1}{\eta_{\text{эк}}^{\text{мф}}} \right) + \left(\frac{1}{\eta_{\text{эк}}^{\text{ком}}} - \frac{1}{\eta_{\text{эк}}^{\text{мф}}} \right) \right) - \frac{\Delta \mathcal{E}_{\text{раз}}^c}{Ex^{\text{мон}}} \left(\frac{1}{\eta_{\text{э}}^{\text{з.а.м}}} - \frac{1}{\eta_{\text{э}}^{\text{кэс}}} \right) - \frac{\Delta \mathcal{E}_{\text{сн}}^{\text{мэс}} - \delta \mathcal{E}_{\text{ном}}^{\text{э.с}}}{\eta_{\text{э}}^{\text{кэс}} \cdot Ex^{\text{мон}}} - \frac{\Delta Ex_{\text{ном}}^Q}{\eta_{\text{эк}}^{\text{ком}} \cdot Ex^{\text{мон}}}, \quad (19)$$

где $Ex^{\text{мон}} \approx Q_n^p$, а коэффициент $y_{\text{эк}}^{\text{мф}}$ представляет собой электрическую выработку теплофикационного потока, приходящуюся на единицу эксергии, выработанной комбинированным способом теплоты, и определяется по формуле

$$y_{\text{эк}}^{\text{мэс}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{ком}}^{\text{мэц}}}{Ex_{\text{ком}}^Q}. \quad (20)$$

При анализе влияния каждого фактора, определяющего величину экономии топлива в системе ($\Delta B_{\text{эк}}^c$) по формулам (17) и (19), получены два различных вывода о термодинамической сущности теплофикации. Так, из формулы (17), с учетом практического равенства $\eta_{\text{ком}}$ и $K_{\text{ит}}^{\text{мф}}$ и их значений порядка 0,8-0,9, а также неравенства $\eta_{\text{э}}^{\text{кэс}}$ и $K_{\text{ит}}^{\text{мф}}$, вытекает, что главным фактором, определяющим экономию от теплофикации, является ликвидация или уменьшение на ТЭЦ тепловых выбросов в конденсаторах, имеющих на КЭС. Значительно снижают эту экономию ($\Delta B_{\text{эк}}^c$) отдельная выработка электроэнергии в замещающих КЭС или «конденсационными хвостами» теплофикационных турбин ТЭЦ, а также расход электроэнергии на привод сетевых насосов и потери теплоты и воды в тепловых сетях. По этим отрицательным факторам, снижающим достигаемую экономию топлива, никаких разночтений в оценке их влияний из сравнений формул (17) и (19) не вытекает. Однако по определению главного фактора достигаемой экономии, вывод из формулы (19) получается совершенно другим, чем из формулы (18). Дело в том, что эксергетический КПД теплофикационного потока ТЭЦ $\eta_{\text{эк}}^{\text{мф}}$ оказывается всегда очень близким к $\eta_{\text{эк}}^{\text{кэс}}$, а иногда даже меньше. Следовательно, с точки зрения эксергетического (термодинамического) совершенства происходящего преобразования теплоты топлива в полезную эксергию (которыми являются работа цикла и отданная в сеть эксергия теплоты) никакого улучшения на ТЭЦ по сравнению с КЭС не достигается. Практически экономия топлива от теплофикации в энергосистеме достигается главным образом за счет ликвидации выработки теплоты в районных и отопительных котельных, эксергетический КПД которых ($\eta_{\text{эк}}^{\text{ком}}$) очень низкий. Причем $\eta_{\text{эк}}^{\text{ком}}$ оказывается всегда тем меньшим, чем ниже температура сетевой воды, отдаваемой тепловым потребителям, а экономия от комбинированной выработки теплоты – тем больше. Если же в местах ее потребления теплота Q_n

будет каким-либо образом выработана с высоким эксергетическим КПД ($\eta_{ex}^{ком}$), то экономия топлива в системе может с учетом потерь и $\Delta \mathcal{E}_{сн}^{тс}$ стать отрицательной.

Величина удельной относительной системной экономии топлива β_m определяется как отношение

$$\beta_m = \frac{\Delta B_{эк}^{сис}}{B_m^{мэц}}, \quad (21)$$

где $B_m^{мэц}$ – полный расход топлива на ТЭЦ с учетом доли расхода топлива на комбинированную и раздельную выработку электроэнергии и теплоты, а также пиковую выработку теплоты.

Отличительной особенностью ПГУ-ТЭЦ является то, что часть конденсационной выработки электроэнергии на ней происходит по парогазовому циклу с более высоким электрическим КПД, чем на паротурбинных или газотурбинных электрических станциях

$$\eta_{э}^{пгу} = \eta_{ме} \cdot \eta_q \cdot \frac{\Delta \ell_{сгу}^{выр,к} + \Delta \ell_{пгу}^{выр,к}}{q_{сгу}^k + q_{ду}^k}, \quad (22)$$

где $\eta_{ме}$ – КПД механический электрического генератора; η_q – коэффициент использования располагаемой теплоты, рассчитываемый по формуле

$$\eta_q = \eta_{кс} - b_{ду} \cdot (\eta_{кс} - \eta_{оу}), \quad (23)$$

где $\eta_{кс}$ – КПД камеры сгорания ГТУ, $\eta_{кс}=0,98-0,99$; $\eta_{оу}$ – КПД дожигающего устройства; $b_{ду}$ – относительный расход топлива в ДУ, рассчитываемый по формуле $b_{ду} = \frac{B_{ду}}{B_{\Sigma}^{пгу}}$; $B_{ду}$, $B_{\Sigma}^{пгу}$ – соответственно, расход топлива в КД КУ и суммарный расход топлива в ПГУ.

Оценка системной экономии топлива при использовании ПГУ-ТЭЦ имеет свои особенности, связанные с тем, что имеется определенная доля раздельной выработки электроэнергии с относительно низким КПД, что приводит к системному перерасходу топлива. Другой особенностью ПГУ является возможность использования КД для повышения тепловой мощности КУ и поддержания номинального расхода пара в голову турбины, что приводит к дополнительному расходу топлива.

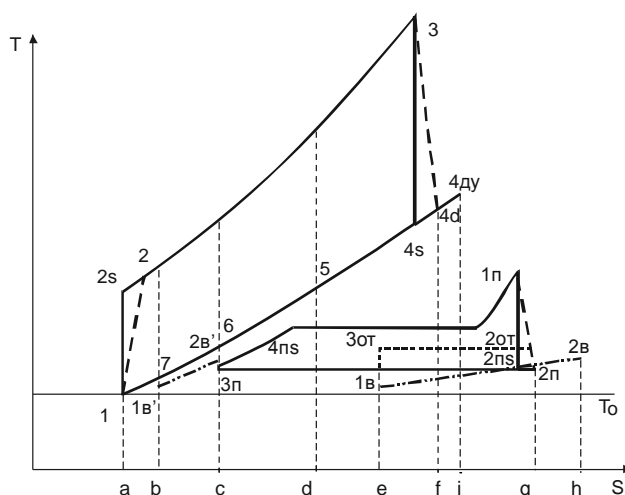


Рис. 3. Термодинамический цикл теплофикационной ПГУ бинарного типа с дожигом дополнительного топлива в КД

Термодинамический цикл теплофикационной ПГУ с дожиганием дополнительного топлива в КД показан на рис. 3. Площадь $f 4_d 4_{dy} i$ эквивалентна теплоте, полученной в КД, за счет сжигания дополнительного топлива в среде уходящих газов ГТУ. Следует отметить, что дожигание дополнительного топлива перед КУ приводит, при постоянных параметрах рабочего тела (пара), к увеличению работы парового цикла. Кроме того, в отличие от теплофикационных ГТУ, на базе теплоты сгорания дополнительного топлива в КД появляется дополнительная выработка электроэнергии на тепловом потреблении в паровой части ПГУ.

Количество теплоты, полезно используемой в КУ, характеризуется коэффициентом использования теплоты уходящих газов

$$\Phi_{yx}^{zmy} = \phi_{yx} + \psi_{yx} = (q_{ky}^{cny} + q_{ky}^{nmy}) / q_{pac}^{zmy} < 1, \quad (24)$$

где $q_{ky}^{cny}, q_{ky}^{nmy}$ – теплота выхлопных газов ГТУ, используемая для нагрева сетевой воды в СП КУ и для регенеративного подогрева питательной воды; q_{pac}^{zmy} – располагаемая теплота продуктов сгорания (без учета теплоты дополнительно сжигаемого в камерах дожигания топлива $\Delta q_{ож}$); ϕ_{yx} – доля теплоты уходящих газов ГТУ, используемая для выработки теплоты в СП КУ $\phi_{yx} = q_{ky}^{cny} / q_{pac}^{zmy} < 1$ (в случае отсутствия СП КУ $\phi_{yx} = 0$); ψ_{yx} – доля теплоты уходящих газов ГТУ, используемая для выработки электроэнергии в ПГУ $\psi_{yx} = q_{nmy} / q_{pac}^{zmy} < 1$ (в случае отсутствия паровой турбины $\psi_{yx} = 0$).

Доля комбинированной выработки электроэнергии в газовой турбине и теплоты, расходуемой на производство комбинированной выработки электроэнергии и теплоты в паровой турбине, определится как

$$\gamma_{nmy}^{mf} = \frac{\alpha_{nmy}^{mf} \cdot (h_1 - h_{омб})}{h_1 - h_2}, \quad (25)$$

где $\alpha_{пту}^{тф}$ – доля пара, идущего в отбор; h_1, h_2 и $h_{омб}$ – соответственно, энтальпии пара на входе в ПТ, на входе в конденсатор (сетевой подогреватель) и отборного пара.

Анализ показателей тепловой экономичности и системной топливной эффективности проведен применительно к ПГУ-ТЭЦ с газотурбинными установками типа НК-14Э и паротурбинной установки типа К-6-16У с учетом режимов работы, суточного, месячного и годового изменения температуры атмосферного воздуха, климатических условий места размещения станции. В расчетах использовались характеристики двигателя НК-14Э и ПТУ К-6-16У, приведенные в таблице. Для каждой из схем (кроме схемы с конденсационной паровой турбиной) принималось, что начальные параметры ПТУ одинаковы, а хвостовая часть и конечные параметры паровой турбины принимаются индивидуально для каждой схемы с учетом ее предполагаемого режима работы.

Характеристики ГТУ и ПТУ при $t_{нв} = +15^\circ\text{C}$

Характеристики ГТУ		НК-14Э
1. Температура газа перед турбиной $t_3, ^\circ\text{C}$		1023
2. Степень повышения давления в компрессоре π_k		9,5
3. КПД проточных частей компрессора и турбины		0,88 и 0,90
4. Электрическая мощность, МВт		9,5
Характеристики ПТУ		К-6-16У
1. Температура пара перед турбиной $T_1, ^\circ\text{C}$		320
2. Давление пара перед турбиной $P_1, \text{МПа}$		1,6
3. Внутренний относительный КПД проточной части турбины		0,8
4. Давление пара после турбины $P_2, \text{МПа}$		0,098
5. Электрическая мощность, МВт		6

На рис. 4 представлено изменение конфигурации термодинамического цикла ПГУ в зависимости от температуры наружного воздуха. Установлено, что с понижением $t_{нв}$ степень повышения давления в компрессоре растет, что ведет к росту полезной работы газового цикла. Вместе с тем, снижается температура газов после турбины, а расход газов на выходе ГТУ растет. Это приводит к изменению параметров парового цикла. С понижением расхода пара снижается электрическая мощность паровой турбины. Необходимость соблюдения минимальных температурных напоров в КУ приводит к тому, что при снижении расхода пара повышается температура газов перед СП КУ, позволяя утилизировать в нем большее количество теплоты.

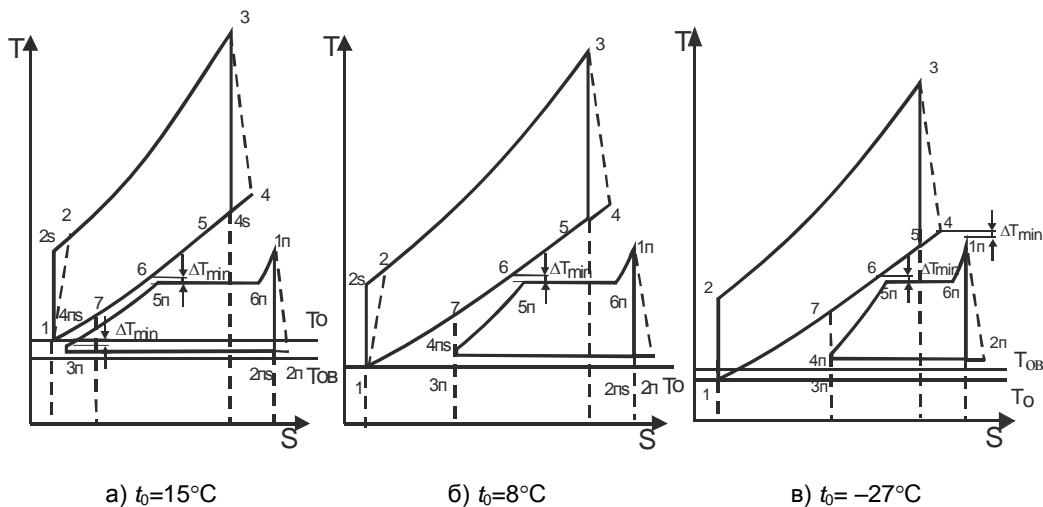


Рис. 4. Изменение термодинамического цикла ПГУ в зависимости от температуры наружного воздуха

Применение дожигающего устройства позволяет более выгодно использовать теплоту сжигаемого в нем топлива, чем в ПВК. Это происходит за счет того, что температура на выходе из ГТУ даже в самый холодный период выше, чем температура пара. Однако, как видно из рис. 4, с понижением температуры наружного воздуха цикл ПГУ за счет снижения расхода пара «сжимается» к точке 5п. Повышение температуры газов в КД приводит к увеличению теплоты, получаемой паровым циклом, превышающему дополнительное количество теплоты, отданное топливом в КД. Такой эффект «дополнительной утилизации» возможен до того момента, пока температурные напоры на горячем и холодном концах экономайзера не будут минимальны. Это соответствует максимальной утилизации тепла газовой турбины. Дальнейшее увеличение подачи топлива в камеру дожигания не будет использовано для работы в паровой турбине и выработки электроэнергии и теплоты комбинированным способом, а будет израсходовано только на нагрев сетевой воды в СП КУ и увеличит потери с уходящими газами. Кроме того, при низких температурах наружного воздуха тепловая нагрузка возрастает, что приводит к необходимости включать в работу пиковый котел. Это снижает долю энергии, вырабатываемую комбинированным способом.

На рис. 5 приведено изменение энергетических характеристик теплофикационной ПГУ в зависимости от температуры наружного воздуха.

Приведенные зависимости определяются программой регулирования, применяемой при эксплуатации ГТУ типа НК-14Э. При температуре наружного воздуха выше $+15^{\circ}\text{C}$ температура газов перед турбиной поддерживается постоянной, а при температуре наружного

воздуха ниже +15°C – постоянной поддерживается мощность ГТУ. Отметим общую для всех зависимостей особенность – наличие горизонтальной площадки в интервале температур от -5°C до +5°C. Такое поведение связано с наличием подогрева наружного воздуха перед осевым компрессором для предотвращения льдообразования.

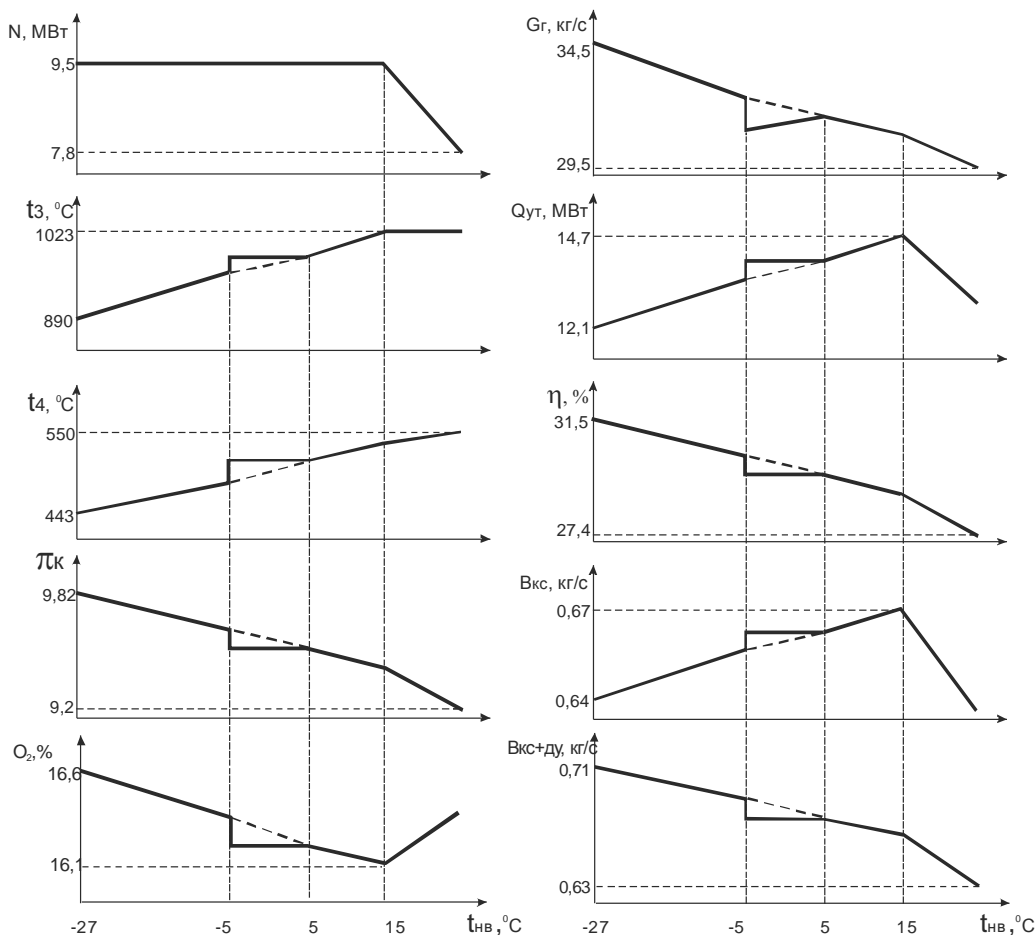
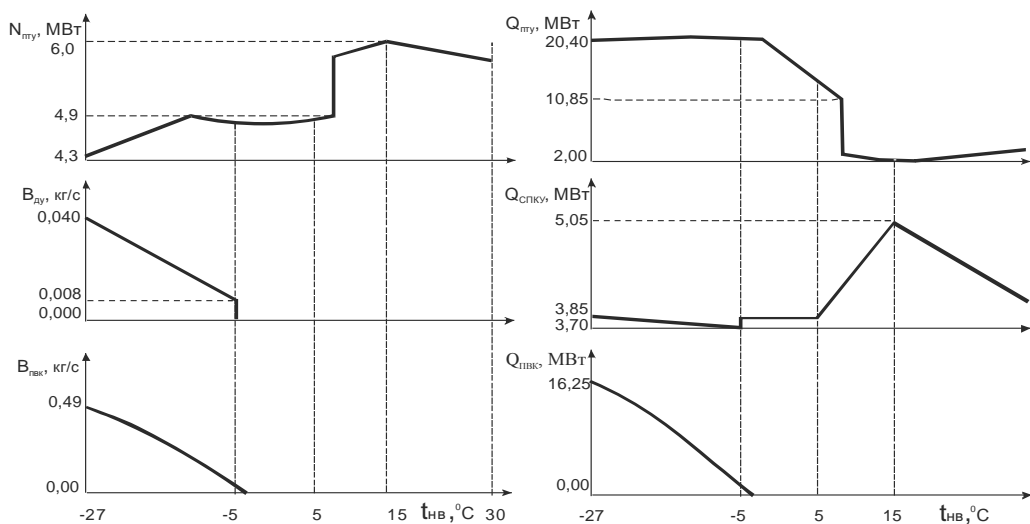


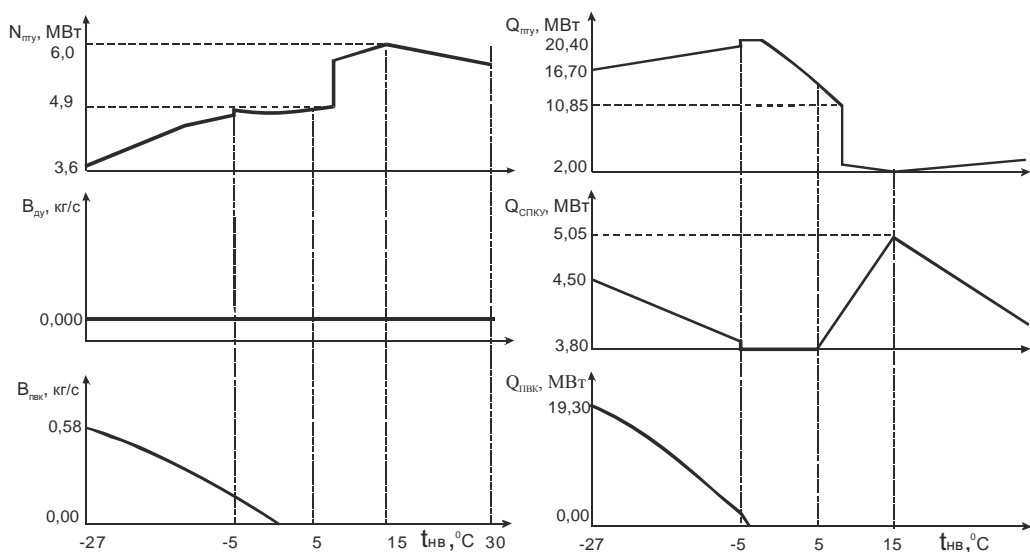
Рис. 5. Характеристики ПГУ в зависимости от температуры наружного воздуха:
 N – мощность ГТУ; t_3 – температура перед газовой турбиной;
 t_4 – температуры газов после газовой турбины; π_k – степень повышения давления;
 G_r – расход продуктов сгорания; $Q_{ут}$ – количество теплоты, которое возможно
 утилизировать после ГТУ; η – КПД ГТУ; $V_{кc}$ – расход топлива в камеру сгорания ГТУ;
 O_2 – содержание кислорода в уходящих газах после ГТУ;
 $V_{кc+дy}$ – суммарный расход топлива в КС и ДУ

Из рис. 6 видно, что при температуре -27°C , дожигая $0,04$ кг/с топлива (немногим более 6% дополнительного топлива от расхода топлива в КС ГТУ без учета топлива ПВК), можно поднять электрическую мощность паровой турбины на $0,7$ МВт (19,4%), а тепловую – на $3,7$ МВт (22%) и, кроме того, снизить количество теплоты, вырабатываемой в пиковых котлах, на 3 МВт (15%) и, соответственно, расход топлива в них $0,09$ кг/с (15%). Таким обра-

зом, применение дожигающего устройства приводит к увеличению доли комбинированной выработки электроэнергии и теплоты на ПГУ-ТЭЦ, что в свою очередь приводит к увеличению экономии топлива в системе.



а



б

Рис. 6. Энергетические характеристики теплофикационной ПГУ:
 а – с дожиганием топлива в КД; б – без дожигания топлива в КД;
 $N_{пгу}$ – электрическая мощность ПТУ; $V_{пвк}$ – расход топлива в дожигающее устройство;
 $V_{пвк}$ – расход топлива в пиковых водогрейных котлах; $Q_{пгу}$ – теплота, отпущенная сетевым подогревателем ПТУ; $Q_{спкк}$ – теплота, отпущенная сетевым подогревателем КУ;
 $Q_{пвк}$ – теплота, отпущенная пиковыми котлами

На рис. 7 приведены зависимости среднегодового значения β от величины присоединенной тепловой нагрузки Q_n . Из графиков видно, что вид утилизационной части и режимы работы ПГУ существенно влияют на оптимальное значение присоединенной тепловой нагрузки и среднегодовое значение удельной системной экономии топлива β . Наличие оптимума присоединенной тепловой нагрузки объясняется тем, что при снижении тепловой нагрузки снижается доля полезного использования теплоты и увеличивается раздельная выработка электроэнергии. При увеличении тепловой нагрузки увеличивается раздельная выработка теплоты за счет увеличения мощности и времени работы ПВК. Расчетно-теоретическими исследованиями установлено, что наибольшей среднегодовой эффективностью обладает схема с противодавленческой турбиной, СП которой последовательно соединен с СП КУ. Показатели термодинамического совершенства и системной топливной эффективности этой схемы теплофикационной ПГУ приведены на рис. 8. Из рис. 8 следует, что оптимальная присоединенная тепловая нагрузка составляет 41 МВт, при этом среднегодовая удельная относительная экономия топлива в системе составляет 0,338.

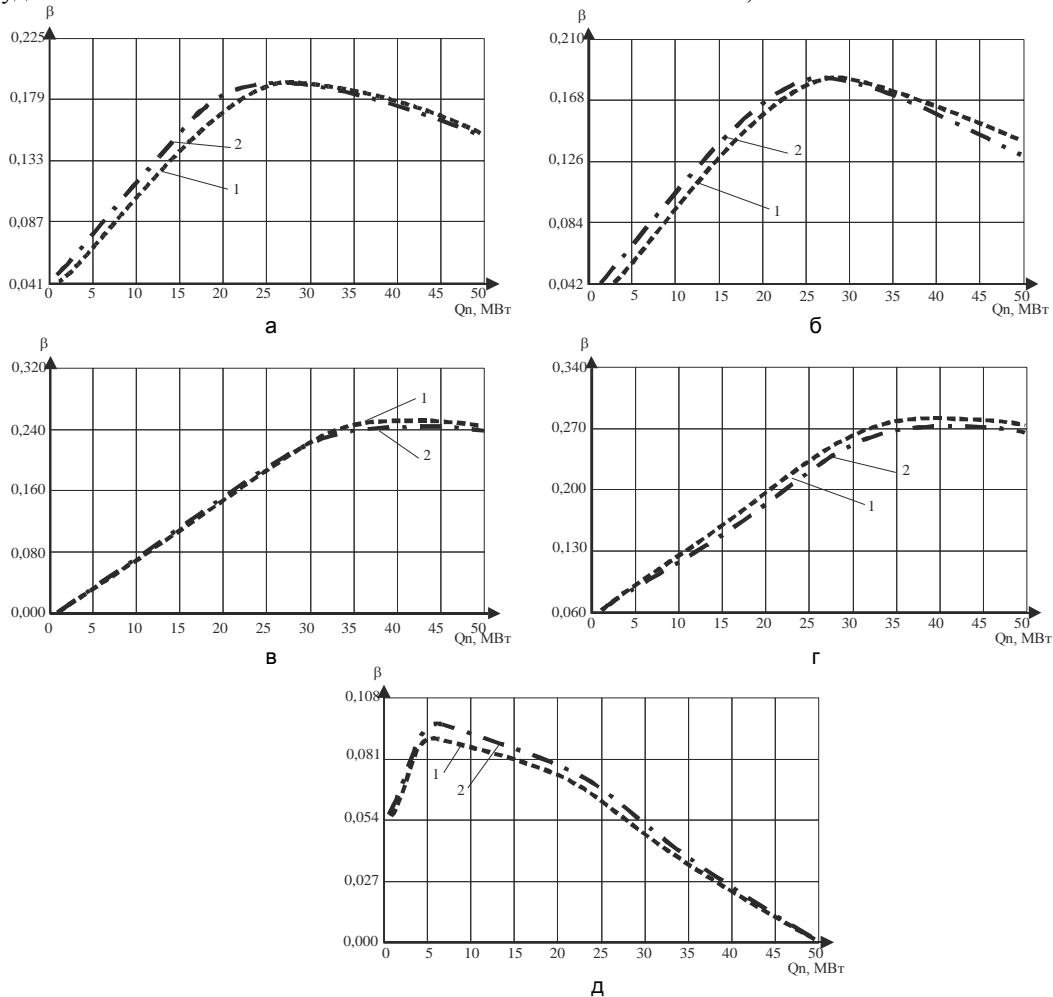


Рис. 7. Удельная системная экономия топлива в зависимости от величины присоединенной годовой тепловой нагрузки для схем с дожиганием: 1 – с дожиганием топлива; 2 – без дожигания топлива

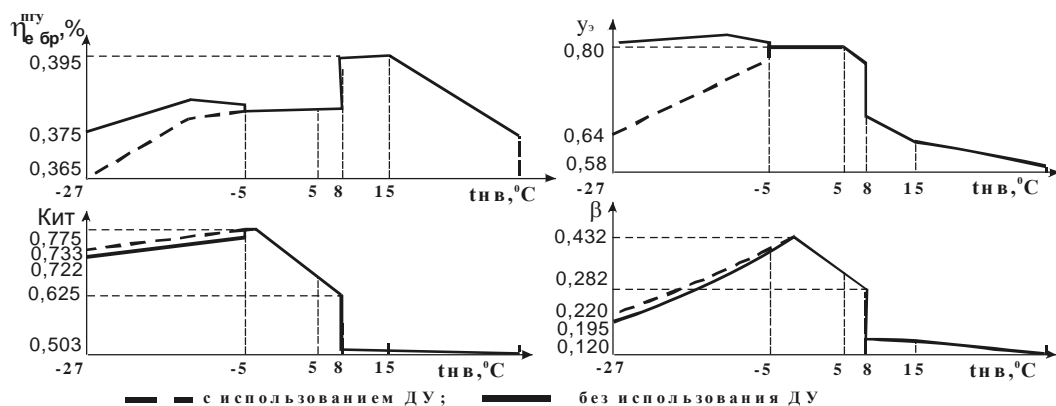


Рис. 8. Показатели совершенства и системной топливной эффективности ПГУ

Выводы

1. Разработаны методические положения расчета показателей совершенства термодинамического цикла теплофикационных ПГУ и системной топливной эффективности с использованием теплового и эксергетического балансов топлива в системе.
2. Определение термодинамической и топливной эффективности применения дожигания топлива в среде уходящих газов ГТУ должно проводиться с учетом режимов работы теплофикационных ПГУ в системах теплоэнергоснабжения.
3. Наибольшую топливную эффективность имеют схемы теплофикационных ПГУ с противодавленческими паровыми турбинами в утилизационном контуре.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андрущенко А.А. Системная эффективность бинарных ПГУ-ТЭЦ / А.А. Андрущенко // Теплоэнергетика. 2000. № 12. С. 11-15.
2. Соколов А.А. Системная топливная эффективность отопительных ПГУ в системах теплоэнергоснабжения / А.А. Соколов, Е.А. Ларин // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2004. № 3(4). С. 103-108.

Андрущенко Анатолий Иванович –

доктор технических наук, профессор кафедры «Теплоэнергетика»
Саратовского государственного технического университета

Ларин Евгений Александрович –

кандидат технических наук, профессор кафедры «Теплоэнергетика»
Саратовского государственного технического университета

Соколов Андрей Анатольевич –

кандидат технических наук, ассистент кафедры «Теплоэнергетика»
Саратовского государственного технического университета

Чикалкин Александр Валерьевич –

аспирант кафедры «Теплоэнергетика»
Саратовского государственного технического университета

Статья поступила в редакцию 06.09.07, принята к опубликованию 05.12.07

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.365.5

Ю.С. Архангельский, Е.М. Гришина

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ И РУПОРНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ СВЧ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИХ УСТАНОВОК С РАБОЧИМИ КАМЕРАМИ ЛУЧЕВОГО ТИПА

Рассчитана энергетическая эффективность различных типов линий передачи и рупорных излучателей, используемых для передачи энергии СВЧ электромагнитных колебаний от источника энергии СВЧ электрических установок и их работы камерам лучевого типа.

Yu.S. Archangelskiy, E.M. Grishina

TRANSMISSION FACILITIES ENERGY EFFICINCY AND HORN RADIATORS SHF ELECTROTHERMAL INSTALLATION WITH BEAM TYPE WORKERS CAMERA

Energy efficiency of the different type transmission facilities and horn radiators used for transmission of the energy SHF electromagnetic fluctuations from the source of the energy SHF electric installation and their work to the beam type cameras is calculated here.

Современное проектирование СВЧ электротермических установок (СВЧ ЭТУ) базируется на совместном решении задачи технико-экономической оптимизации структуры и параметров СВЧ ЭТУ, синтеза рабочей камеры установки и математического моделирования реализуемого в ней технологического процесса [1].

Технико-экономическая оптимизация сводится к определению количества установок, работающих параллельно и выпускающих заданный объем продукции, число СВЧ-генераторов, работающих на одну рабочую камеру каждой установки, мощности и частоты магнетронов СВЧ-генераторов, при которых достигается максимальный чистый дисконтированный доход (интегральный экономический эффект) от эксплуатации этого технологического оборудования на заданном интервале времени [1, 2].

Для решения задачи синтеза рабочей камеры приходится решать самосогласованную краевую задачу электродинамики и тепломассопереноса с соответствующими начальными и граничными условиями и с учетом требований к производительности установки и к качеству выпускаемой ею продукции [3, 4].

Наконец, математическое моделирование технологического процесса в рабочей камере также строится на совместном решении уравнений Максвелла и Лыкова и позволяет на всех стадиях проследить динамику процесса [5].

Важно подчеркнуть, что электротермические установки – весьма энергоемкое оборудование, однако на нем, как правило, реализуются такие технологические процессы, которые не могут быть осуществлены при ином способе энергоподвода, поэтому при определении целесообразности применения, например, СВЧ ЭТУ надо исходить не из величины потребленной электроэнергии, а из величины чистой прибыли на том или ином временном интервале. В то же время, разумеется, всегда следует стремиться к повышению энергетической эффективности элементной базы СВЧ ЭТУ [6].

Рассмотрим энергетическую эффективность и способы ее повышения линий передачи и рупорных излучателей СВЧ ЭТУ с рабочими камерами лучевого типа (КЛТ). Эти камеры сейчас в СВЧ-электротермии находятся в центре внимания, поскольку в СВЧ диэлектрическом нагреве определился интерес к термообработке диэлектриков с большими поверхностями [7, 8]. В этом случае в КЛТ применяют распределенный подвод к обрабатываемому объекту СВЧ-энергии, для чего используются отрезки волноводов (рис. 1, а), а также тройники (рис. 1, б) или направленные ответвители (рис. 1, в), в которых СВЧ-энергия делится поровну между двумя рупорными измерителями. Увеличивая количество линий передачи и рупоров, можно осуществить термообработку объектов по сколь угодно большим поверхностям.

В общем случае под эффективностью электротермической установки или ее элемента будем понимать величину

$$\mathcal{E} = \frac{A_{кр}}{A_{зр}}, \quad (1)$$

где $A_{кр}$ – конечный результат на выходе установки или ее элемента; $A_{зр}$ – затраты ресурса на входе.

Если в (1) величины $A_{кр}$ и $A_{зр}$ – энергетические характеристики, то соотношение (1) определяет энергетическую эффективность, то есть энергетический КПД $\eta_{эн}$. Для линий передачи с рупорными излучателями СВЧ ЭТУ (рис. 1) соотношение (1) можно записать в виде

$$\eta_{эн} = \frac{\sum_{i=1}^M P_{выхi}}{\sum_{i=1}^M P_{вxi}}, \quad (2)$$

где $P_{выхi}$ – мощность СВЧ на выходе i -го рупорного излучателя; $P_{вxi}$ – мощность на входе i -й линии передачи; M – количество линий передачи. Обычно волновод линии передачи имеет то же сечение, что и волновод вывода энергии СВЧ-генератора, а потому можно считать, что $P_{вxi} = P_i$ – мощность СВЧ-энергии. Тогда соотношение (2) можно переписать в виде:

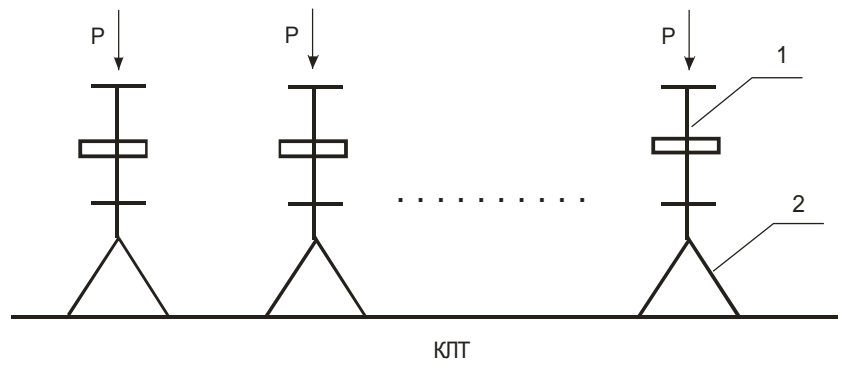
$$\eta_{эн} = \sum_{i=1}^M \eta_{эni} B_i, \quad (3)$$

$$B_i = \frac{P_{вxi}}{\sum_{i=1}^M P_i}, \quad (4)$$

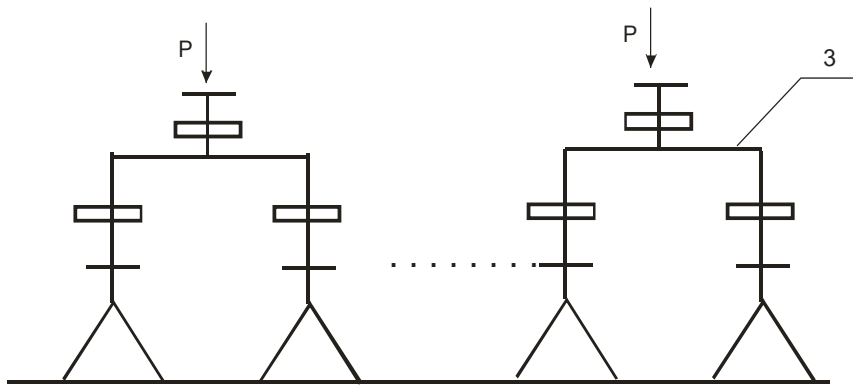
где $\eta_{эni}$ – энергетический КПД i -й линии передачи; B_i – доля мощности СВЧ, передаваемая по i -й линии передачи, от общей мощности СВЧ, передаваемой от СВЧ-генераторов к КЛТ.

СВЧ ЭТУ с КЛТ имеют разные по мощности СВЧ-источники энергии редко, разве что при методическом режиме работы, когда требуется зонная обработка садки. Обычно же все СВЧ-генераторы источников СВЧ-энергии имеют одну и ту же мощность P . Тогда, согласно (3), с учетом (2)

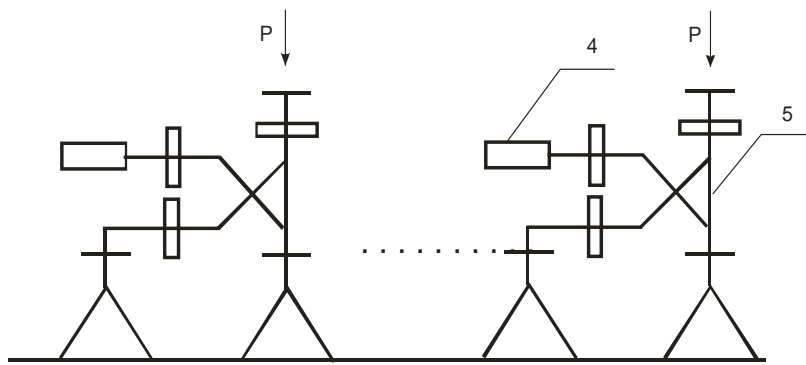
$$\eta_{эн} = \frac{P_{вых}}{P}, \quad (5)$$



а



б



в

Рис. 1. Линии передачи с рупорными излучателями СВЧ ЭТУ с рабочими камерами лучевого типа: а – отрезки на прямоугольных волноводах; б – тройники на прямоугольном волноводе; в – направленные ответвители на прямоугольном волноводе (1 – отрезок волновода, 2 – рупорный излучатель, 3 – тройник, 4 – балластная нагрузка, 5 – направленный ответвитель)

где

$$P_{\text{вых}} = P - P_{\text{отр л}} - P_{\text{отр р}} - P_{\text{отр к}} - P_{\text{пот}}. \quad (6)$$

Здесь $P_{\text{отр л}}$, $P_{\text{отр р}}$ – мощности, отраженные от линии передачи и рупорного излучателя при работе на идеально согласованную нагрузку; $P_{\text{отр к}}$ – мощность, отраженная от КЛТ; $P_{\text{пот}}$ – мощность потерь в линии передачи и в рупорном излучателе. В таком случае по соотношению (6) с учетом (5) имеем

$$\eta_{\text{эн}} = 1 - |\Gamma_{\text{отр л}}|^2 - |\Gamma_{\text{отр р}}|^2 - |\Gamma_{\text{отр к}}|^2 - \frac{P_{\text{ном}}}{P}, \quad (7)$$

где $\Gamma_{\text{отр л}}$, $\Gamma_{\text{отр р}}$ – коэффициенты отражения от линии передачи и рупорного излучателя при работе на идеально согласованную нагрузку; $\Gamma_{\text{отр к}}$ – коэффициент отражения от КЛТ.

Если линия передачи, как всегда, выполнена на прямоугольном волноводе с воздушным заполнением (рис. 1, а), то коэффициент стоячей волны по напряжению такого волновода $K_{\text{смУλ}} \approx 1,02$, так что $|\Gamma_{\text{отр}}|^2 \approx 0,0001$. Если линия выполнена на тройнике из прямоугольных волноводов (рис. 1, б), то $K_{\text{смУλ}} \approx 1,2$, а $|\Gamma_{\text{отр}}|^2 \approx 0,0081$, а если на направленном ответвителе (рис. 1, в), то $K_{\text{смУλ}} \approx 1,1$, а $|\Gamma_{\text{отр}}|^2 \approx 0,0022$. У рупорного излучателя $K_{\text{смУр}} \approx 1,1$, а $|\Gamma_{\text{отр}}|^2 \approx 0,22$.

Потери СВЧ-мощности на длине l волновода имеет место из-за скин-эффекта в металлических стенках волновода, причем относительные потери, если учесть, что $2\alpha l \ll 1$, равны

$$\frac{P_{\text{ном}}}{P} = 1 - e^{-2\alpha l} \approx 2\alpha l, \quad (8)$$

где коэффициент затухания α Н₁₀ волны, на которой работает линия передачи, можно рассчитать по соотношению [2]

$$\alpha = \frac{0,0894 \left[1 + \frac{2b}{a} \left(\frac{\lambda}{2a} \right)^2 \right]}{b \sqrt{(\lambda\sigma)} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a} \right)^2}}, \quad (9)$$

где α в Нп/м, если a , b – ширина широкой и узкой стенок волновода, м; λ – длина волны СВЧ-генератора, м; σ – электрическая проводимость стенок волновода, 1/(Ом×м).

Относительные потери за счет скин-эффекта у прямоугольных волноводов, применяемых на разрешенных для СВЧ ЭТУ частотах, невелики и составляют $\sim 0,0005$. В линиях передачи на тройнике или направленном ответвителе эти потери можно оценить величиной 0,001, а потери в рупорном излучателе – порядка 0,0005.

В линии передачи на направленном ответвителе имеются еще потери мощности СВЧ в балластной нагрузке. Если направленный ответвитель делит мощность СВЧ пополам, направленность ответвителя 20 дБ, то относительные потери в балластной нагрузке составляют 0,0049.

Что касается длины линии передачи l , то она, согласно (7) и (8), сильно влияет на энергетическую эффективность линии передачи, но в работе [9] определена предельная длина линии передачи $l_{\text{пр}}$, при которой соблюдается стабильная работа магнетрона СВЧ-генератора источника энергии СВЧ ЭТУ:

$$l_{\text{пр}} = \frac{45}{\Delta f (K^2 - 1)}, \quad (10)$$

где $l_{\text{пр}}$ в м, если затягивание частоты Δf магнетрона в МГц, а $K = K_{\text{смУк}}$ – коэффициент отражения по напряжению от КЛТ, так что если, например, $K_{\text{смУк}} = 3$, $\Delta f = 10$ МГц, то $l_{\text{пр}} \approx 0,6$ м. Если по условиям эксплуатации СВЧ ЭТУ требуется, например, $l = 10$ м при $\Delta f = 10$ МГц, то по (10) $K_{\text{смУк}} \leq 1,2$.

Таким образом, если линия передачи с рупорным излучателем выполнена на прямоугольном волноводе (рис. 1, а), то

$$\eta_{эн} = 0,9967 - |\Gamma_{отрк}|^2, \quad (11)$$

если линия передачи выполнена на тройнике, то

$$\eta_{эн} = 0,9855 - |\Gamma_{отрк}|^2, \quad (12)$$

а если на направленном ответвителе, то

$$\eta_{эн} = 0,9866 - |\Gamma_{отрк}|^2. \quad (13)$$

Таким образом, влияние скин-эффекта и собственных коэффициентов отражения линии передачи и рупорного излучателя на энергетическую эффективность $\eta_{эн}$ невелико и в практических расчетах им можно пренебречь. Тогда

$$\eta_{эн} = 1 - |\Gamma_{отрк}|^2. \quad (14)$$

Величина $\Gamma_{отрк}$ зависит от геометрии КЛТ, обрабатываемого объекта, его диэлектрических параметров ϵ'_δ и $\text{tg } \delta_\delta$ и размещения в рабочей камере. Традиционное взаимное расположение рупорного излучателя и обрабатываемого объекта в КЛТ показано на рис. 2, а.

Если, как обычно, считать, что от излучателя к обрабатываемому объекту распространяется плоская волна [7], то

$$\Gamma_{отрк} = \frac{Z_n - Z_{ов}}{Z_n + Z_{ов}}, \quad (15)$$

где $Z_{ов} = 377$ Ом – характеристическое сопротивление воздуха, а согласно [10]

$$Z_n = Z_{од} \frac{Z_{вхл} + Z_{од} \text{th} \gamma_\delta d}{Z_{од} + Z_{вхл} \text{th} \gamma_\delta d} = R_n + jX_n, \quad (16)$$

где

$$Z_{од} = \frac{377}{\sqrt{(\epsilon'_\delta(1 - j \text{tg} \sigma_\delta))}}, \quad (17)$$

$$Z_{вхл} = Z_{отрл} \frac{Z_{вхс} + j Z_{отрл} \text{tg} \beta_{трл} l_{трл}}{Z_{отрл} + j Z_{вхс} \text{tg} \beta_{трл} l_{трл}}, \quad (18)$$

$$Z_{отрл} = \frac{377}{\sqrt{\epsilon'_{трл}}}, \quad (19)$$

$$Z_{вхс} = j Z_{ов} \text{tg} \beta l, \quad (20)$$

ϵ'_δ , $\text{tg} \delta_{nl} = 0$ – диэлектрические параметры транспортной ленты; $\gamma_\delta = \alpha_\delta + j\beta_\delta$ – постоянная распространения в обрабатываемом объекте; α_δ – постоянная затухания; β_δ – фазовая постоянная, причем

$$\alpha_\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon'_\delta} \sqrt{\frac{1}{2} \left(\left(\sqrt{(1 + \text{tg}^2 \sigma_\delta)} \right) - 1 \right)}, \quad (21)$$

$$\beta_\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon'_\delta} \sqrt{\frac{1}{2} \left(\left(\sqrt{(1 + \text{tg}^2 \sigma_\delta)} \right) + 1 \right)}, \quad (22)$$

d – толщина слоя обрабатываемого объекта; $l_{трл}$ – толщина транспортной ленты; l – толщина слоя воздуха между транспортной лентой и металлическим корпусом КЛТ; λ – длина волны СВЧ генератора в воздухе, фазовая постоянная волны в воздухе.

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad (23)$$

а фазовая постоянная волны в транспортной ленте

$$\beta_{\text{трл}} = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\varepsilon'_{\text{трл}}}. \quad (24)$$

Чтобы $\eta_{\text{эл}} = 1$, согласно (14), нужно, чтобы $Z_{\text{н}} = Z_{\text{ов}}$, но обычно по (16) $X_{\text{н}} \neq 0$, $R_{\text{н}} \neq Z_{\text{ов}}$. В таком случае для увеличения энергетической эффективности рекомендуется использовать четвертьволновый согласующий трансформатор [10,11]. Так как, согласно (16), $Z_{\text{н}}$ имеет реактивную составляющую $X_{\text{н}}$, по [11] между обрабатываемыми объектами и рупорным излучателем необходим отрезок линии с воздушным заполнением 8 (рис. 2, б), на входе которого нагрузка для четвертьволнового трансформатора $Z_{\text{вх}}$ будет чисто активной, то есть требуется, чтобы

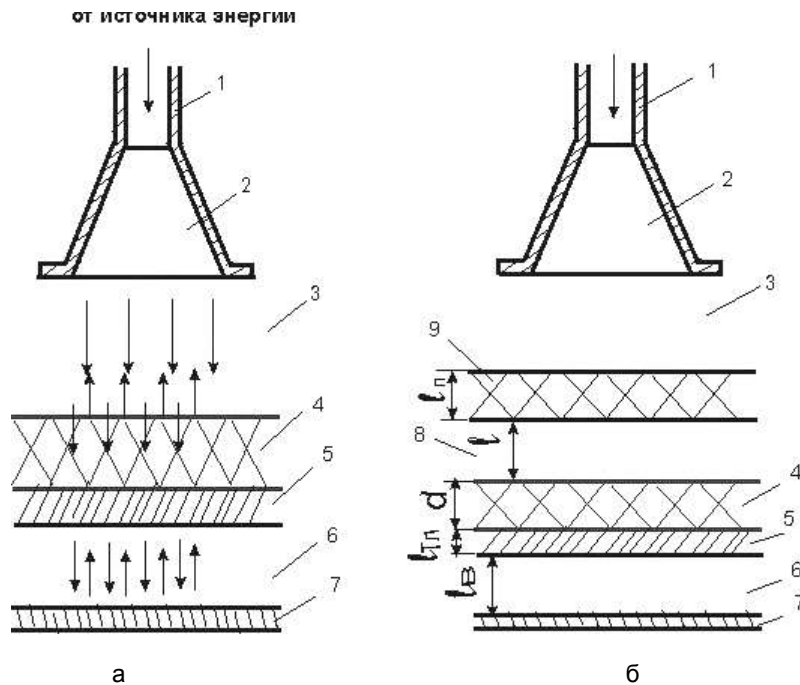


Рис. 2. Продольное сечение КЛТ: а – без четвертьволнового трансформатора; б – с четвертьволновым трансформатором (1 – волноводная линия передачи; 2 – рупорный излучатель; 4 – обрабатываемый диэлектрик; 5 – подложка (транспортная лента); 7 – металлическая пластинка; 3, 8, 6 – слои воздуха; 9 – слой диэлектрика без потерь, заполняющего четвертьволновый трансформатор; 10 – металлический корпус КЛТ)

$$Z_{\text{вх}} = Z_{\text{ов}} \frac{Z_{\text{н}} + jZ_{\text{ов}} \text{tg } \beta l}{Z_{\text{ов}} + jZ_{\text{н}} \text{tg } \beta l} = \text{Re } Z_{\text{вх}}, \quad (25)$$

где l – расстояние между слоем обрабатываемого объекта и выходом четвертьволнового трансформатора.

Как показано в [11], условие $I_m Z_{\text{вх}} = 0$ выполняется для значений $\text{tg } \beta l$, являющихся корнями уравнения

$$Z_{06} X_n \operatorname{tg}^2 \beta l + (R_n^2 + X_n^2 - Z_{06}^2) \operatorname{tg} \beta l - X_n Z_{06} = 0, \quad (26)$$

что дает возможность найти длину l воздушного слоя 8 (рис. 2, б).

Так как характеристическое сопротивление в четвертьволновом слое 9 (рис. 2, б) равно

$$Z_{0\lambda/4} = \sqrt{Z_{06} \operatorname{Re} Z_{\text{exx}}}, \quad (27)$$

а

$$Z_{0\lambda/4} = \frac{377}{\sqrt{\varepsilon'_{\lambda/4}}}, \quad (28)$$

то из (27) и (26)

$$\varepsilon'_{\lambda/4} = \sqrt{\frac{377}{\sqrt{\operatorname{Re} Z_{\text{exx}}}}}, \quad (29)$$

причем длина четвертьволнового трансформатора

$$l_n = \frac{\lambda}{4\sqrt{\varepsilon'_{\lambda/4}}}. \quad (30)$$

Оценим возможность применения четвертьволнового согласующего трансформатора в практически интересных случаях.

Так, подобный СВЧ-энергоподвод целесообразен для нетепловой модифицирующей СВЧ-обработки полимерных материалов (тканей, нитей, эпоксидных пленок и смол и т.д.).

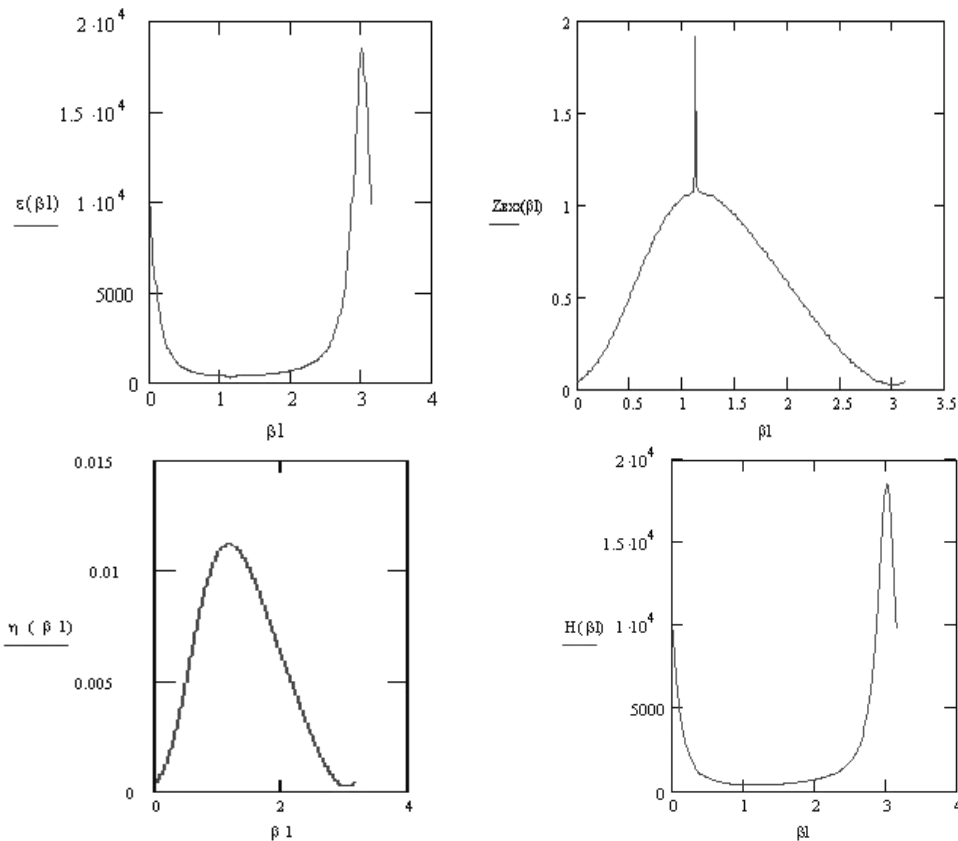


Рис. 3. Графики зависимости основных параметров задачи ($\eta_{\text{энт}}$, $K_{\text{смL}}(H)$, Z_{exx} , ε') от βl

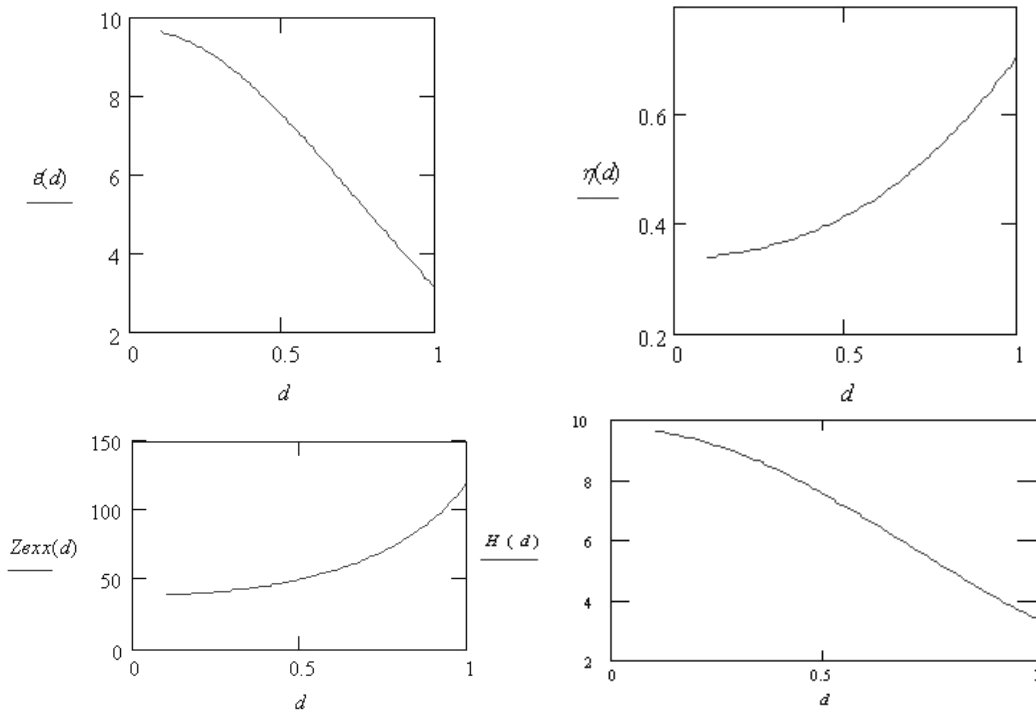


Рис. 4. Графики зависимости основных параметров задачи ($\eta_{эн}$, $K_{смU}(H)$, Z_{exx} , ϵ') от толщины обрабатываемого слоя d

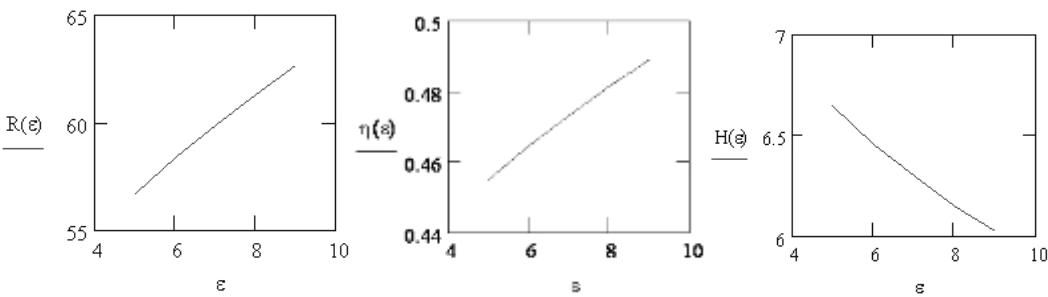


Рис. 5. Графики зависимости основных параметров задачи (активной части сопротивления нагрузки R , коэффициента энергетической эффективности η , коэффициента стоячей волны $H=K_{смU}$) от проницаемости обрабатываемого слоя ϵ

На рис. 3-5 приведена зависимость основных параметров задачи при варьировании β , l , d , ϵ'_n . Согласно рис. 3, при модификации тканей и нитей энергетическая эффективность $\eta_{эн} \sim 1\%$ из-за малой толщины обрабатываемого объекта d и малого тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta_d$. Для повышения энергетической эффективности СВЧ электротермической установки в этом случае следует отказаться от традиционной конструкции КЛТ с металлическим дном, предложив вместо него систему рупоров, принимающих прошедшую сквозь обрабатываемый объект СВЧ-мощность и направляющих её по дополнительной линии передачи во вторую половину рабочей камеры, где реализуется ти-

пично электротермический процесс с использованием энергии СВЧ электромагнитных колебаний. Такая рабочая камера, реализующая разные технологические процессы, может быть названа гибридной.

С увеличением толщины обрабатываемого объекта d , значений его диэлектрических характеристик ε'_o и $\operatorname{tg} \delta_o$ поглощающие способности обрабатываемого объекта увеличиваются и потому растет энергетическая эффективность $\eta_{эн}$, достигая 60-70% (рис. 4, 5). Но и в этом случае целесообразна реализация идеи гибридной КЛТ.

Выводы

1. Спин-эффект и собственные отражения электромагнитной волны в линиях передачи с рупорными излучателями уменьшают энергетическую эффективность линии и излучают до $\eta_{эн} \approx 0,99$. Наибольшее влияние на величину $\eta_{эн}$ оказывает коэффициент отражения электромагнитной волны от рабочей камеры лучевого типа.

2. Коэффициент отражения от рабочей камеры существенно зависит от геометрии камеры, обрабатываемого объекта, его диэлектрических параметров и расположения в камере лучевого типа.

3. При нетепловой модифицирующей обработке СВЧ электромагнитными колебаниями тонких полимерных материалов энергетическая эффективность составляет 1-2%.

4. Для повышения энергетической эффективности СВЧ электротермических установок следует применять систему приемных рупоров, передающих СВЧ-мощность, прошедшую сквозь обрабатываемый объект, в дополнительную часть рабочей камеры для осуществления электротермического процесса с другим обрабатываемым объектом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Колесников Е.В. Проектирование электротехнологических установок / Е.В. Колесников. Саратов: СГТУ, 2006. 282 с.
2. Толстов В.А. Эффективность электротехнологических установок / В.А. Толстов, Ю.С. Архангельский. Саратов: СГТУ, 2003. 213 с.
3. Архангельский Ю.С. Сверхвысокочастотные нагревательные установки для интенсификации технологических процессов / Ю.С. Архангельский, И.И. Девяткин. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1983. 140 с.
4. Архангельский Ю.С. СВЧ-электротермия / Ю.С. Архангельский. Саратов: СГТУ, 1998. 408 с.
5. Архангельский Ю.С. Компьютерное моделирование СВЧ электротермических процессов и установок / Ю.С. Архангельский, С.В. Тригорлый. Саратов: СГТУ, 2006. 211 с.
6. Архангельский Ю.С. Элементная база СВЧ электротермического оборудования / Ю.С. Архангельский, В.А. Воронкин. Саратов: СГТУ, 2003. 213 с.
7. Архангельский Ю.С. СВЧ электротермические установки лучевого типа / Ю.С. Архангельский, С.В. Тригорлый. Саратов: СГТУ, 2000. 122 с.
8. Огурцов К.Н. Разработка методов проектирования СВЧ-камер лучевого типа для нагрева диэлектриков больших объемов и площадей / К.Н. Огурцов // Электро- и теплотехнологические процессы и установки: межвуз. науч. сб. Саратов: СГТУ, 2003. С. 47-54.
9. Электронные сверхвысокочастотные приборы со скрещенными полями: в 2 т. / под ред. Н.И. Федорова. М.: Изд-во ИЛ, 1961. Т. 2. 471 с.
10. Архангельский Ю.С. Согласование обрабатываемого диэлектрика с рупорным излучателем камеры лучевого типа СВЧ электротермической установки / Ю.С. Архангельский, Е.М. Гришина // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2006. № 4(19). Вып. 4. С. 23-26.
11. Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ: в 2 т. / И.В. Лебедев. М.: Высшая школа, 1970. Т. 1. 435 с.

Архангельский Юрий Сергеевич –
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Автоматизированные электротехнологические установки и системы»
Саратовского государственного технического университета

Гришина Екатерина Михайловна –
ассистент кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы»
Саратовского государственного технического университета

Статья поступила в редакцию 10.09.07, принята к опубликованию 05.12.07

УДК 621.372.8

Т.Г. Пазухина, Б.К. Сивяков

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВОЛНОВОДНЫХ ФАЗОВРАЩАТЕЛЕЙ С P-I-N ДИОДАМИ И ПЛАНАРНЫМИ ПЕТЛЯМИ СВЯЗИ

Рассматриваются вопросы технического проектирования проходных и отражательных волноводных фазовращателей с p-i-n диодами и планарными петлями связи. Представлены эквивалентные схемы фазовращателей, даны расчетные формулы, проведено сравнение с экспериментальными данными.

T.G. Pazukhina, B.K. Sivjakov

OF WAVEGUIDE PHASE SHIFTERS DESIGNING WITH P-I-N DIODES AND PLANAR COUPLING LOOPS

The method of technical designing of passed and reflective waveguide phase shifters using p-i-n diodes and planar coupling loops is considered in this article. The equivalent networks of phase shifters and design equations are presented. The experimental performance of phase shifters was compared with predicted performance.

Введение

Волноводные фазовращатели с p-i-n диодами используются для дискретного изменения фазы СВЧ-сигнала в фазированных антенных решетках, а также в приемных и передающих трактах радиоэлектронной аппаратуры. Создание широкополосных быстродействующих волноводных фазовращателей с p-i-n диодами является одной из важных задач СВЧ-техники.

Различают фазовращатели проходного и отражательного типов [1]. В проходных фазовращателях СВЧ-сигнал проходит в волноводе через ряд коммутируемых реактивных элементов (модулей). Изменение фазы сигнала происходит вследствие дискретного изменения величины реактивных проводимостей этих элементов. Переключение реактивностей производится при помощи p-i-n диодов, которые являются быстродействующими ключами. Для

расширения полосы частот в коммутируемых реактивных элементах используют планарные петли связи [2].

Отражательные фазовращатели изменяют фазу СВЧ-сигнала, отраженного от плоскости закоротки. При этом вход устройства одновременно является выходом. Для отражательных фазовращателей наиболее широкополосной является схема с переключаемой реактивной нагрузкой, которая состоит из одного или нескольких коммутируемых реактивных элементов, расположенных на конце линии передачи. В волноводных отражательных фазовращателях коммутируемые элементы также реализуются с использованием планарных петель связи [3, 4].

В данной работе рассматриваются методы проектирования волноводных проходных и отражательных фазовращателей, основанных на использовании планарных петель связи.

1. Эквивалентные схемы

Фазовращатели с планарными петлями связи можно отнести к типу волноводно-планарных структур, в которых диэлектрическая подложка с выполненной на ней топологией и активными элементами расположена внутри волноводного тракта. Для разработки моделей фазовращателей применим метод декомпозиции [1], сущность которого заключается в расчленении сложного устройства на ряд базовых элементов, допускающих независимый анализ.

Рассмотрим конструкцию двухпозиционного отражательного фазовращателя, изображенную на рис. 1.

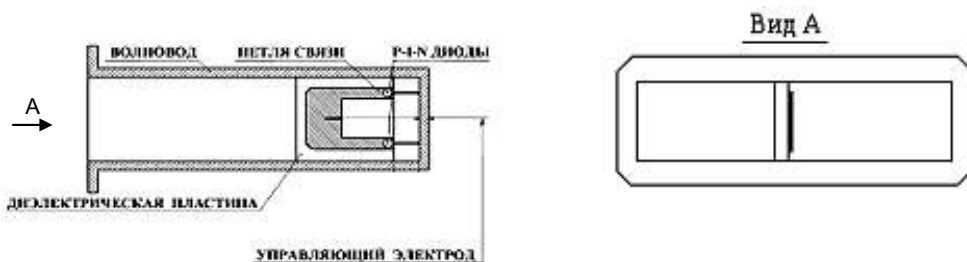
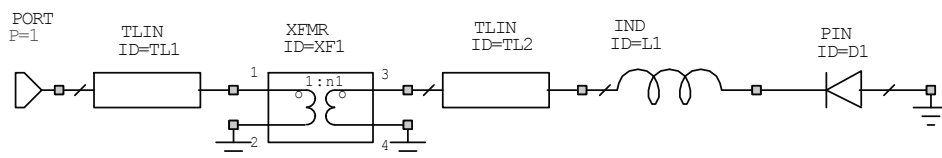


Рис. 1

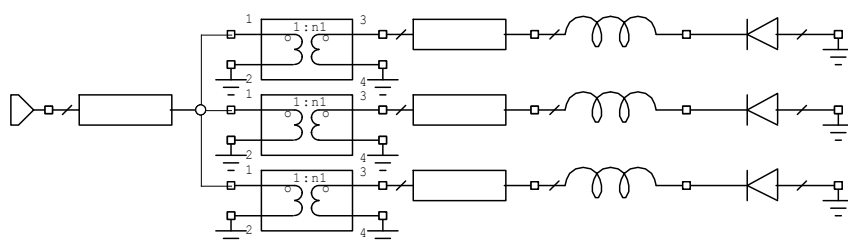
Фазовращатель представляет собой закороченный на конце прямоугольный волновод, вдоль которого в Е-плоскости расположена диэлектрическая пластина с нанесенной на ней методом планарной технологии симметричной П-образной петель связи. Два р-і-п диода, установленные на концах петли, соединены с закороткой. С помощью управляющего электрода подается напряжение смещения на диоды. Изменение фазы отраженной СВЧ-волны происходит при смене полярности приложенного к р-і-п диодам напряжения.

В представленной конструкции можно выделить следующие базовые элементы: 1) волновод с диэлектрической пластиной, 2) петля связи в волноводе, как трансформатор, 3) петля связи, как планарная линия передачи. Двойственность петли связи объясняется тем, что вдоль петли распространяются одновременно волноводная волна, структура которой сходна с волной H_{10} , и волна, близкая к ТЕМ типу. В соответствии с этим разделением электрическая эквивалентная схема фазовращателя (в графических символах программы Microwave Office [5]), с учетом симметричности конструкции относительно Н-плоскости, будет иметь вид, показанный на рис. 2, а, где Port P=1 – вход (выход) с импедансом, равным половине волнового сопротивления волноводного тракта, TL1 – отрезок прямоугольного волновода с диэлектрической пластиной, XF1 – трансформатор напряжения с коэффициентом трансформации, равным $n1$, TL2 – планарная линия передачи. Кроме того, в эквивалентную схему входят сосредоточенные элементы: индуктивность – L1 и р-і-п диод D1. Индуктивность L1 представляет собой обобщенный элемент, в который входит индуктивность вывода

диода, а также, при необходимости, дополнительная индуктивность, выполненная на диэлектрической пластине.



а



б

Рис. 2

Используя приведенную эквивалентную схему, можно проводить анализ и моделирование фазовращателя в моделирующей программе типа Microwave Office.

Двухпозиционный фазовращатель может использоваться как базовый элемент многопозиционного фазовращателя (рис. 2, б). Изменение фазы отраженного СВЧ-сигнала производится поочередным переключением р-і-п диодов.

В проходных фазовращателях используются несимметричные (рис. 3) и двойные симметричные петли связи (рис. 4).

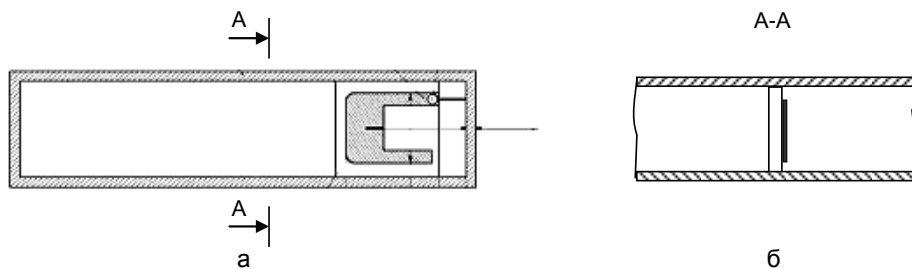


Рис. 3

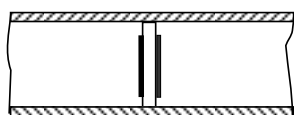
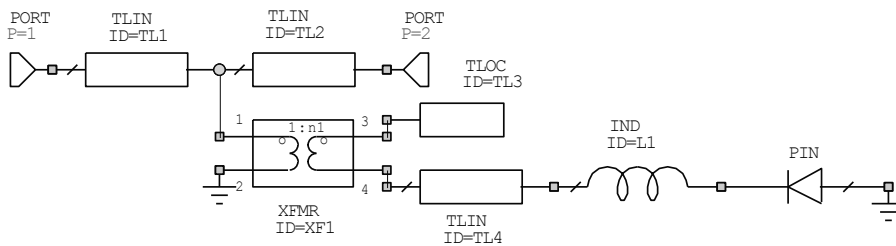


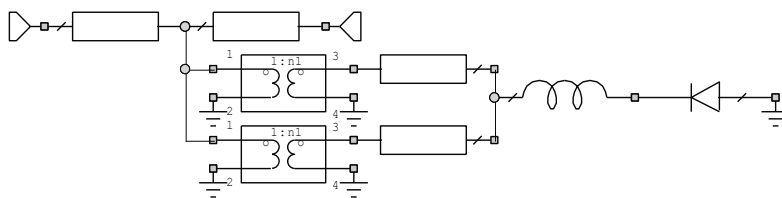
Рис. 4

Эквивалентная схема реактивного элемента с несимметричной петлей приведена на рис. 5, а, где волновые сопротивления портов P=1, P=2, а также отрезков линии передачи TL1 и TL2 равны волновому сопротивлению волновода. Отрезок линии TL3 представляет собой эквивалент ненагруженного плеча планарной петли связи, электрическая длина которого состав-

ляет 90 градусов. В отличие от отражательного фазовращателя, в проходном фазовращателе петля связи соединена с волноводом не последовательно, а параллельно, что отражено на эквивалентной схеме.



а



б

Рис. 5

Элементарная фазосдвигающая ячейка проходного фазовращателя содержит два реактивных коммутируемых элемента, расположенных в волноводе на определенном расстоянии друг от друга. Для создания многопозиционных фазовращателей проходного типа используют каскадное соединение элементарных ячеек, при котором последний модуль предыдущей ячейки и первый модуль последующей ячейки должны находиться в одной плоскости. Для упрощения конструкции эти два модуля заменяют одним с двойной симметричной петлей.

Двойная симметричная петля представляет собой две одинаковые симметричные петли связи, расположенные с двух сторон диэлектрической подложки и соединенные между собой при помощи металлических перемычек [6]. Фазовый сдвиг «двухстороннего» модуля примерно в два раза больше, чем модуля с одной петлей. Эквивалентная схема реактивного элемента с «двухсторонней» петлей, связи показана на рис. 5, б. Здесь, так же, как и в случае с обычной симметричной петлей, можно рассматривать только половину схемы.

2. Техника вычислений параметров базовых элементов

Перед проведением моделирования необходимо предварительно проделать электродинамические расчеты, определяющие связь номиналов элементов эквивалентной схемы с геометрическими размерами базовых элементов, длиной волны и параметрами диэлектрической пластины. При этом накладываются ограничения на геометрические размеры базовых элементов и на параметры элементов эквивалентной схемы. Например, в отражательном фазовращателе размер сечения частично заполненного волновода, если нет специальных требований, обычно равен размеру сечения подводящего волноводного тракта. Толщина пластины также обычно известна заранее – это стандартная толщина диэлектрической подложки. Пре-

делы изменения параметров р-і-п диодов определяются параметрами промышленных р-і-п диодов. Кроме того, совершенно очевидно, что коэффициент трансформации петли связи не может быть больше 1.

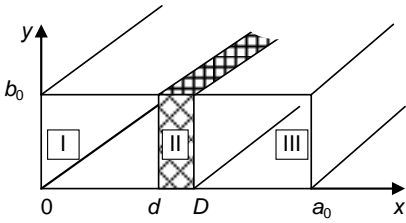


Рис. 6

2.1. Расчет постоянной распространения и волнового сопротивления волновода с продольной диэлектрической пластиной (частично заполненный волновод)

Задача о прямоугольном волноводе с продольно расположенной диэлектрической пластиной (рис. 6) имеет точное электродинамическое решение [7].

Дисперсионное уравнение для такого волновода имеет вид:

$$\frac{\frac{\alpha}{\beta} \operatorname{tg} \beta d - \operatorname{tg} \alpha d}{1 + \frac{\alpha}{\beta} \operatorname{tg} \beta d \cdot \operatorname{tg} \alpha d} + \frac{\frac{\alpha}{\beta} \operatorname{tg} [\beta(a_0 - D)] + \operatorname{tg} \alpha D}{1 - \frac{\alpha}{\beta} \operatorname{tg} [\beta(a_0 - D)] \cdot \operatorname{tg} \alpha D} = 0, \quad (1)$$

где

$$\beta^2 = k^2 - K^2; \quad (2)$$

$$\alpha^2 = k^2 \epsilon \mu - K^2; \quad (3)$$

$k = 2\pi/\lambda_0$ и $K = 2\pi/\lambda_B$, λ_0 и λ_B – длина волны в свободном пространстве и в волноводе; ϵ и μ – относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости диэлектрической пластины; a_0 и b_0 – размеры широкой и узкой стенок волновода.

Подставив (2) и (3) в (1), получаем уравнение относительно постоянной распространения K , определив которую, находим λ_B .

Волновое сопротивление волновода рассчитывается по известной формуле:

$$Z_0 = (b_0 E_{y \max})^2 / 2P, \quad (4)$$

где P – мощность, передаваемая по волноводу, которая определяется из выражения:

$$P = \frac{b_0 K}{120\pi \cdot k} \left(\int_0^d (\sin \beta x)^2 dx + \int_d^D (A \cos \alpha x + B \sin \alpha x)^2 dx + C^2 \int_D^{a_0} [\sin(a_0 - \beta x)]^2 dx \right), \quad (5)$$

$E_{y \max}$ – максимальное значение напряженности электрического поля в волноводе, которое для пластины, расположенной в центре волновода, равно:

$$E_{y \max} = A \cos(\alpha \cdot a_0 / 2) + B \sin(\alpha \cdot a_0 / 2). \quad (6)$$

Коэффициенты A , B и C рассчитываются следующим образом:

$$A = \sin \beta d \cdot \cos \alpha d - (\beta/\alpha) \cos \beta d \cdot \sin \alpha d, \quad B = \sin \beta d \cdot \sin \alpha d + (\beta/\alpha) \cos \beta d \cdot \cos \alpha d,$$

$$C = (A \cos \alpha D + B \sin \alpha D) / \sin \beta(a_0 - D).$$

При несимметричном расположении пластины предварительно определяют координату точки с $E_{y \max}$ [8]. Для этого решаются уравнения для областей I, II и III, соответственно:

$$\cos \beta x = 0; \quad (7)$$

$$A \sin \alpha x - B \cos \alpha x = 0; \quad (8)$$

$$\cos \beta(a_0 - x) = 0. \quad (9)$$

Истинным будет то значение x , которое лежит в своей области.

$E_{y \max}$ будет определяться из одного из следующих выражений для выбранной области I, II или III, соответственно:

$$E_{y \max I} = \sin \beta x; \quad (10)$$

$$E_{y \max II} = (A \cos \alpha x + B \sin \alpha x); \quad (11)$$

$$E_{y \max III} = C \sin \beta(a_0 - x), \quad (12)$$

где x находится из уравнений (7)-(9).

2.2. Расчет коэффициента трансформации петли связи

Для отражательного фазовращателя коэффициент трансформации петли связи, находящейся в области I (рис. 3), определяется по формуле [9]:

$$n1 = \frac{h}{b_0} \sin \beta d \cdot \sin(2\pi \ell / \lambda_B). \quad (13)$$

Для петли, находящейся в области III:

$$n1 = \frac{h}{b_0} \sin \beta(a_0 - D) \cdot \sin(2\pi \ell / \lambda_B), \quad (14)$$

где h и ℓ – соответственно, ширина и длина петли (габаритные размеры). Накладываемые ограничения на высоту петли обусловлены минимально допустимым зазором между петлями и широкой стенкой волновода. На длину петли таких жестких ограничений нет.

Для проходного фазовращателя коэффициент трансформации одиночной петли рассчитывается по формуле:

$$n1 = \frac{h}{b_0} \cdot \sin[(\alpha + \pi/a_0)\ell/2]. \quad (15)$$

2.3. Расчет волнового сопротивления и электрической длины планарной петли связи

При размерах петли связи, сравнимых с длиной волны, она представляет собой СВЧ-линию передачи. На рис. 7 представлена картина распределения силовых линий электрического поля в промежутке между петлями и широкой стенкой волновода, отображенная зеркально относительно стенки волновода. Нетрудно заметить, что полученная система проводников представляет собой не что иное, как копланарную полосковую линию с той же фазовой скоростью, что и у волны, распространяющейся в петле связи, но с удвоенным волновым сопротивлением. Электрические параметры копланарной полосковой линии – волновое сопротивление и длина волны наиболее просто рассчитываются квазистатическим методом [10].

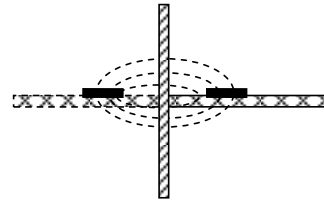


Рис. 7

Формула для расчета волнового сопротивления петли связи имеет вид:

$$W = 120\pi \cdot a / b \sqrt{\epsilon_{эфф}}, \quad (16)$$

где $\epsilon'_{эфф}$ находится из соотношения:

$$\epsilon_{эфф} = 1 + (\epsilon - 1)ad / 2cb. \quad (17)$$

Коэффициенты a , b , c и d определяются в результате решения эллиптических интегралов:

$$a + ib = \int_0^1 (x^2 - 1)^{-0.5} (b_1^2 x^2 / a_1^2 - 1)^{-0.5} dx; \quad (18)$$

$$c + id = 2 \int_0^1 (x^2 - 1)^{-0.5} (x^2/k^2 - 1)^{-0.5} dx, \quad (19)$$

где $k = \sqrt{1 - \sin^2(\pi a_1/2h_1)/\sin^2(\pi b_1/2h_1)}$, a_1 и b_1 – соответственно, расстояния от наружной и внутренней границ петли до широкой стенки (рис. 7); h_1 – толщина диэлектрической подложки.

Длина волны рассчитывается по известной формуле: $\lambda_{\text{КПЛ}} = \lambda_0 / \sqrt{\epsilon_{\text{эфф}}}$.

2.4. Сосредоточенные элементы: индуктивность L1 и p-i-n диод

Оптимальная величина индуктивности L1 подбирается при моделировании. Конструктивно индуктивность можно оценить, представив отрезком копланарной линии с диэлектрическим или воздушным заполнением.

Эквивалентная схема p-i-n диода хорошо известна и, как правило, имеется в библиотеке компьютерных моделирующих программ.

Необходимо отметить, что предлагаемые эквивалентные схемы фазовращателей не учитывают дисперсию волноводной волны, поэтому для получения большей точности при моделировании в полосе частот, превышающей 10%, необходимо перейти на последнем этапе от диапазонных характеристик к точечным, и в каждой точке откорректировать значения волновых сопротивлений порта P1 и частично заполненного волновода TL1, электрическую длину волновода TL1 и коэффициент трансформации петли связи n1.

3. Экспериментальные результаты

На рис. 8 приведены рассчитанные и измеренные фазочастотные характеристики двухпозиционного отражательного фазовращателя S-диапазона в канале 90×10 мм с диодами 2A517A. Фазовращатель обеспечивает фазовый сдвиг 180±10 градусов в полосе частот порядка 17%.

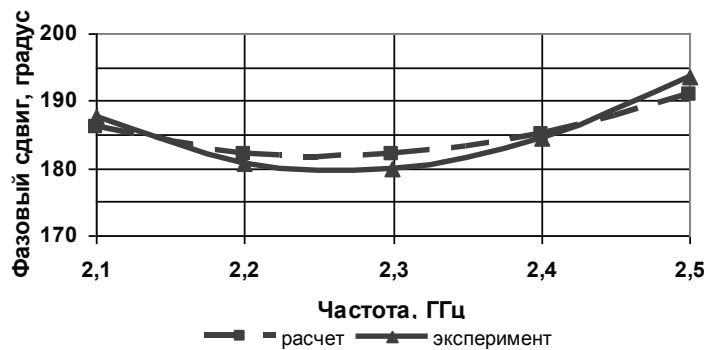


Рис. 8

Рассчитанные и экспериментальные фазочастотные характеристики элементарной ячейки проходного типа, с фазовым сдвигом 45 градусов и состоящей из двух реактивных элементов с несимметричными петлями связи, расположенных в волноводе на расстоянии порядка $0,2 \lambda_B$ друг от друга, показаны на рис. 9 [2]. В 5%-й полосе частот элементарная ячейка имеет точность установки фазы не хуже ±1 градус.

Сравнение расчетных и экспериментальных фазочастотных характеристик позволяет сделать вывод об адекватности эквивалентных схем фазовращателей.

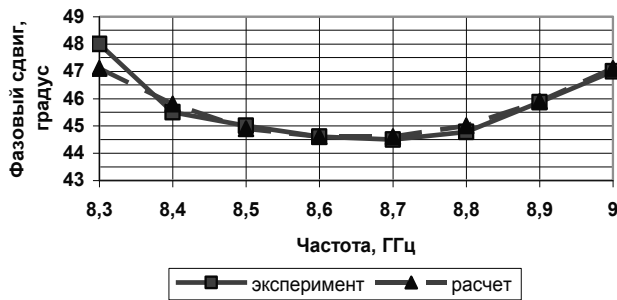


Рис. 9

4. Проектирование многопозиционных фазовращателей

Как отмечалось, базовым элементом многопозиционных отражательных фазовращателей является двухпозиционный фазовращатель, поэтому проектирование их ведется по той же методике. Отличие заключается в том, что необходимо решить дисперсионное уравнение для волновода с несколькими диэлектрическими пластинами. Для проведения таких расчетов лучше воспользоваться специальными прикладными программами. На рис. 10 показаны экспериментальные (сплошные линии) и теоретические (пунктирные линии) фазочастотные характеристики четырехпозиционного фазовращателя С-диапазона в канале 35×5 мм с диодами типа 2A517A. Как видим, результаты моделирования хорошо коррелируются с экспериментальными данными. Схематичное изображение способа расположения петель связи в волноводе показано на рис. 11.

Базовыми элементами многопозиционных проходных фазовращателей являются реактивные коммутирующие элементы с несимметричной и двойной симметричной петлями связи. На рис. 12 приведены экспериментальные фазочастотные и амплитудно-частотные характеристики четырехпозиционного проходного фазовращателя Х-диапазона с фазовым дискретом 90 градусов. Фазовращатель выполнен в прямоугольном волноводе сечением 35×5 мм и состоит из трех одинаковых секций. Каждая секция содержит два модуля с несимметричными петлями связи и один модуль с двойной симметричной петлей связи.

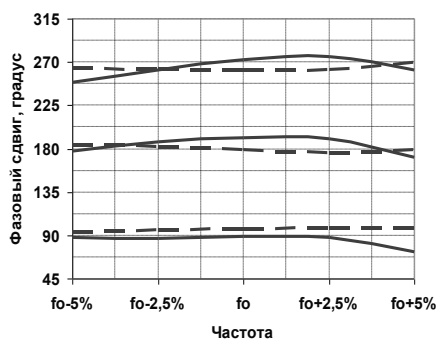


Рис. 10

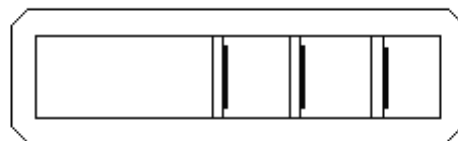


Рис. 11

Так же, как и во всех представленных фазовращателях, здесь используются диоды 2A517A. В 5%-й полосе частот фазовращатель обеспечивает точность установки фаз не хуже ± 10 градусов, максимальные вносимые потери 1,4 дБ, средние потери порядка 1,1 дБ.

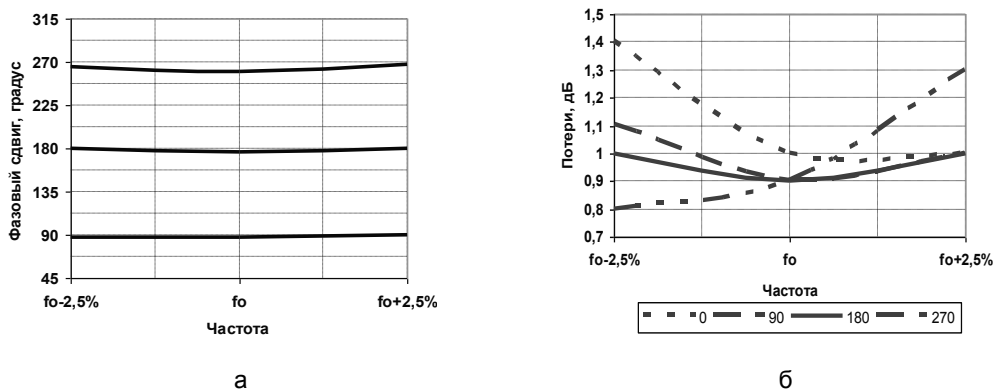


Рис. 12

Заключение

Рассмотренные дискретные волноводные фазовращатели с р-і-п диодами, как проходные, так и отражательные, основаны на использовании планарных петель связи. Это позволяет использовать одну методику проектирования, единый технологический цикл изготовления, одни и те же р-і-п диоды. Можно говорить о классе унифицированных СВЧ-устройств – волноводных фазовращателей с планарными петлями связи.

Предложенный метод решает задачу технического проектирования данного класса устройств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сазонов Д.М. Устройства СВЧ: учеб. пособие / Д.М. Сазонов, А.Н. Гридин, Б.А. Мишустин; под ред. Д.М. Сазонова. М.: Высшая школа, 1981. 295 с.
2. Апалина Е.В. Использование петли связи в проходных волноводных фазовращателях и фазовых модуляторах на р-і-п диодах / Е.В. Апалина, Т.Г. Пазухина // Системы и функциональные устройства низких и сверхвысоких частот: межвуз. науч. сб. Саратов: СГТУ, 2005. С. 43-47.
3. А.с. № 230421 СССР.МКИ Н01Р1/18. Дискретный отражательный фазовращатель / В.Т. Зилов, О.Т. Киселева, Т.Г. Пазухина.
4. Апалина Е.В. Волноводный 180-градусный отражательный фазовращатель с р-і-п диодами и планарной петлей связи / Е.В. Апалина, Т.Г. Пазухина // Системы и функциональные устройства низких и сверхвысоких частот: межвуз. науч. сб. Саратов: СГТУ, 2005. С. 48-51.
5. Разевиг В.Д. Проектирование СВЧ-устройств с помощью программы Microwave Office / В.Д. Разевиг, Ю.В. Потапов, А.А. Курушин. Сер. Системы проектирования. М.: Солон-Пресс, 2003. 496 с.
6. А.с. № 331719 СССР. МКИ Н01Р1/18. Дискретный отражательный фазовращатель / Т.Г. Пазухина, В.Т. Зилов, О.Т. Киселева.
7. Левин Л. Современная теория волноводов / Л. Левин. М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1954. 216 с.
8. Пазухина Т.Г. Расчет волнового сопротивления прямоугольного волновода с диэлектрической пластиной / Т.Г. Пазухина // Техническая электродинамика и электроника: сб. науч. тр. Саратов: СГТУ, 2006. С. 7-10.
9. Пазухина Т.Г. Расчет коэффициента трансформации планарной петли связи волноводного отражательного фазовращателя / Т.Г. Пазухина // Актуальные проблемы электронного приборостроения: Междунар. науч.-техн. конф. Саратов: СГТУ, 2006. С. 259-266.

10. Gevorgian S. Line capacitance and impedance of coplanar-strip waveguides on substrates with multiple dielectric layers / S. Gevorgian, H. Berg // Gallium Arsenide applications symposium. GAAS 2001. 24-28 september 2001. London. <http://amsacta.cib.unibo.it/archive/00000393/>.

Пазухина Татьяна Гавриловна –
ведущий инженер ЗАО «НПЦ «Алмаз-Фазотрон», г. Саратов

Сивяков Борис Константинович –
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Электротехника и электроника»
Саратовского государственного технического университета

Статья поступила в редакцию 09.07.07, принята к опубликованию 05.12.07

УДК 621.375.026

Д.М. Горбачев, М.А. Фурсаев

ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ СВЧ-ГЕНЕРАТОРА НА БИПОЛЯРНОМ ТРАНЗИСТОРЕ, РАБОТАЮЩЕМ В РЕЖИМЕ С ОТСЕЧКОЙ ТОКА

Обсуждены вопросы обеспечения устойчивости работы СВЧ-генератора с внутренней обратной связью на биполярном транзисторе, работающем в режиме с отсечкой тока. Показано, что устойчивость работы генератора достигается подбором напряжения источника и сопротивления резистора смещения, вводимых в эмиттерную цепь постоянного тока.

D.M. Gorbachev, M.A. Fursaev

STABILITY MAINTENANCE OF THE TRANSISTOR GENERATOR MICROWAVE ON THE BIPOLAR TRANSISTOR WORKING IN A MODE WITH CURRENT CUTOFF

Input and stability maintenance of a microwave stationary mode of the generator with an internal feedback on the bipolar transistor working in a mode with current cutoff questions are considered. It is shown, that work stability such generator is reached by a choice of voltage sizes of a displacement and resistance of the resistance of the resistor source, included in emitter circuit of a direct current.

При проектировании СВЧ-генераторов на базе биполярного транзистора, работающего в режиме с отсечкой тока, должны решаться вопросы ввода этих устройств в стационарный режим и достижения его устойчивости. Как правило, эти вопросы решаются введением в состав входной цепи постоянного тока генератора источника напряжения смещения и резистора смещения. В настоящей работе проводится анализ влияния значений параметров этих элементов на условия обеспечения ввода в стационарный режим и устойчивости генератора с внутренней обратной связью, в котором биполярный транзистор, работающий в режиме с отсечкой тока, включен по схеме с общей базой (ОБ). Такая схема включения транзистора обычно используется в устройствах СВЧ-диапазона. Необходимость такого анализа обуславливается еще

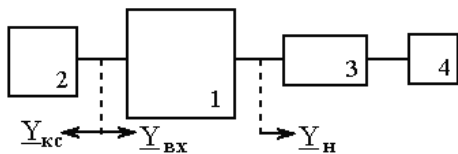


Рис. 1. Схема СВЧ транзисторного генератора с внутренней обратной связью: 1 – транзистор; 2 – колебательная система; 3 – выходной трансформатор связи; 4 – внешняя нагрузка

и тем, что промышленностью выпускается ряд типов транзистора, предназначенных для работы только в режиме класса С.

Анализ работы СВЧ транзисторных генераторов с внутренней обратной связью обычно проводится на основе эквивалентной схемы, представляющей собой параллельное соединение активного и пассивного двухполюсников [1-3]. При таком представлении условием устойчивости стационарного режима генератора является отрицательное значение производной абсолютной величины действительной компоненты про-

водимости активного двухполюсника от амплитуды напряжения, действующего на этом двухполюснике [4]. Сама же величина действительной компоненты проводимости активного двухполюсника согласно условию обеспечения стационарного режима работы генератора должна быть отрицательной [4].

Физически обоснованной представляется такая эквивалентная схема СВЧ транзисторного генератора, в которой пассивным двухполюсником является колебательная система, подключаемая к входу транзистора, а активным – сам транзистор с цепями, подключаемыми к его выходу [3], что показано на рис. 1. В этом случае проводимостью активного двухполюсника эквивалентной схемы является входная проводимость транзистора.

Расчет входной проводимости биполярного транзистора, работающего в недонапряженном режиме с отсечкой тока, может быть проведен с использованием кусочно-квазилинейной модели, в которой параметром электрического режима работы является амплитуда ВЧ-напряжения на открытом эмиттерном переходе. Величина этой амплитуды монотонно изменяется с амплитудой напряжения на входе транзистора. Поэтому условием устойчивости работы генератора можно считать отрицательное значение производной абсолютной величины действительной (активной) компоненты входной проводимости транзистора от амплитуды напряжения на его открытом эмиттерном переходе.

На рис. 2 и 3 приведены результаты расчета зависимости активной компоненты входной проводимости транзистора типа КТ919А в составе генератора с внутренней обратной связью от амплитуды ВЧ-напряжения на открытом эмиттерном переходе U_{nm} при работе прибора в режимах классов АВ и С и частоты 1 ГГц. Эти режимы обеспечиваются включением во входную цепь постоянного тока генератора источников напряжения различной полярности. Значения параметров, при которых проводился расчет и достигалась отрицательная величина активной компоненты входной проводимости транзистора, приведены в таблице.

Расчет проведен для двух случаев: при предположении постоянства величины барьерной емкости коллекторного перехода и при учете ее изменения в связи с изменением электрического режима (при неизменной величине напряжения источника коллекторного питания). Точки пересечения кривых зависимостей на этих рисунках соответствуют амплитуде напряжения открытого эмиттерного перехода в фиксированном режиме работы транзистора, в котором приведенные в таблице значения барьерной емкости коллекторного перехода и напряжения источника коллекторного питания соответствуют друг другу. В этом режиме входная проводимость транзистора и проводимость колебательной системы должны удовлетворять условию стационарного режима генератора [4]. Левые крайние точки кривых зависимостей на рис. 3 соответствуют переходу транзистора в линейный режим, что свидетельствует о «мягком» возбуждении генератора при работе транзистора в режиме класса АВ. Из данных рис. 2 следует «жесткое» возбуждение генератора, если транзистор работает в режиме класса С.

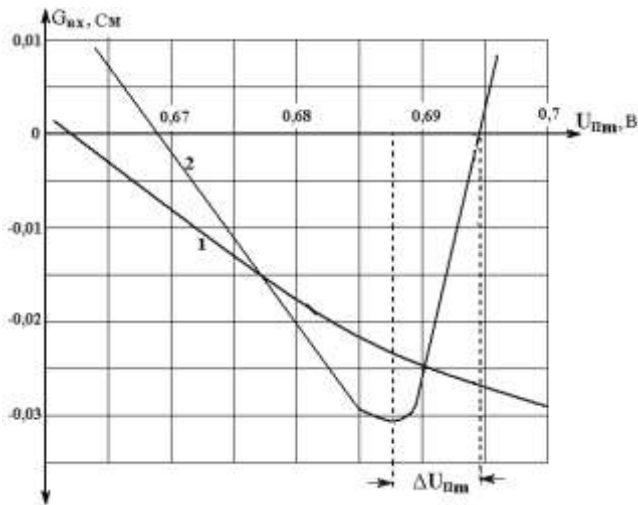


Рис. 2. Расчетные зависимости активной компоненты входной проводимости транзистора, работающего в режиме класса С в составе генератора с внутренней обратной связью, от амплитуды напряжения на открытом эмиттерном переходе:
 1 – при неизменной величине барьерной емкости коллекторного перехода;
 2 – при неизменной величине напряжения источника коллекторного питания

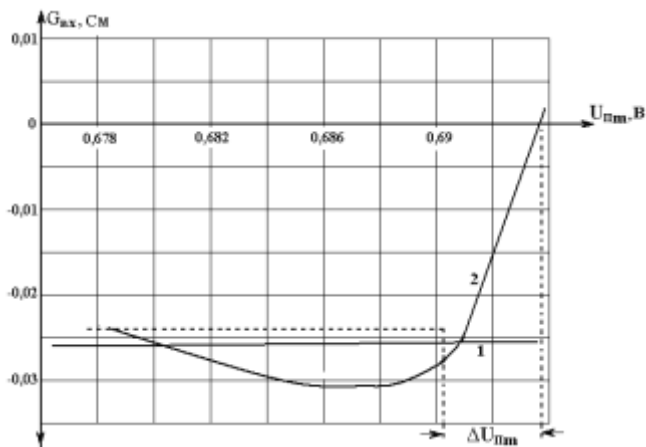


Рис. 3. Расчетные зависимости активной компоненты входной проводимости транзистора, работающего в режиме класса АВ в составе генератора с внутренней обратной связью, от амплитуды напряжения на открытом эмиттерном переходе:
 1 – при неизменной величине барьерной емкости коллекторного перехода;
 2 – при неизменной величине напряжения источника коллекторного питания

Наименование и обозначение параметра	Режим А - В	Режим С
Напряжение источника во входной цепи постоянного тока, $U_{ЭБ}$, В	0,525	-0,525
Проводимость цепи на выходе транзистора, Y_{H} , См	$0,02 - j 0,07$	$0,015 - j 0,082$
Барьерная емкость коллекторного перехода, C_K , Ф	$0,1 \cdot 10^{-10}$	$0,09 \cdot 10^{-10}$
Напряжение источника коллекторного питания, E_K , В	32,9	24,5

Проведенный расчет показал, что учет зависимости барьерной емкости коллекторного перехода транзистора от режима его работы существенно влияет на характер зависимости $G_{вх}(U_{nm})$, особенно в области больших значений напряжения на открытом эмиттерном переходе прибора. Как видно из рис. 2, в режиме класса С учет зависимости барьерной емкости коллекторного перехода, генератора выявляет возможность обеспечения устойчивости работы генератора при соответствующем выборе величины активной проводимости колебательной системы, хотя не устраняет «жесткость» его возбуждения. На рис. 2 указан интервал значений амплитуд напряжения U_{nm} , в котором устойчивая работа генератора может быть реализована. Аналогичный эффект дает учет зависимости барьерной емкости коллекторного перехода и в случае работы транзистора в режиме АВ (см. рис. 3). Но при этом ввод генератора в рабочий режим в определенном интервале значений амплитуды напряжения на открытом коллекторном переходе будет «мягким». Данный интервал, в котором величина активной компоненты входной проводимости транзистора по абсолютному значению меньше аналогичной величины проводимости при амплитуде напряжения U_{nm} , соответствующей работе прибора в линейном режиме, отмечен на рис. 3.

Очевидно, анализ зависимостей, подобных 2 на рис. 2 и 3, позволяет осуществить выбор рабочего значения амплитуды напряжения на открытом эмиттерном переходе, а также значений компонент проводимости цепи на выходе транзистора и напряжения источников постоянного питания, при которых прибор будет работать в составе генератора с внутренней обратной связью.

При учете влияния величин напряжения источника и сопротивления резистора смещения во входной цепи постоянного тока генератора можно использовать соотношения

$$U_{ЭБ} = U_{СМ} - R_{СМ} I_{Э0},$$

где $U_{ЭБ}$ – напряжение источника в цепи постоянного тока в отсутствии резистора смещения; $I_{Э0}$ – постоянный эмиттерный ток транзистора в выбранном режиме.

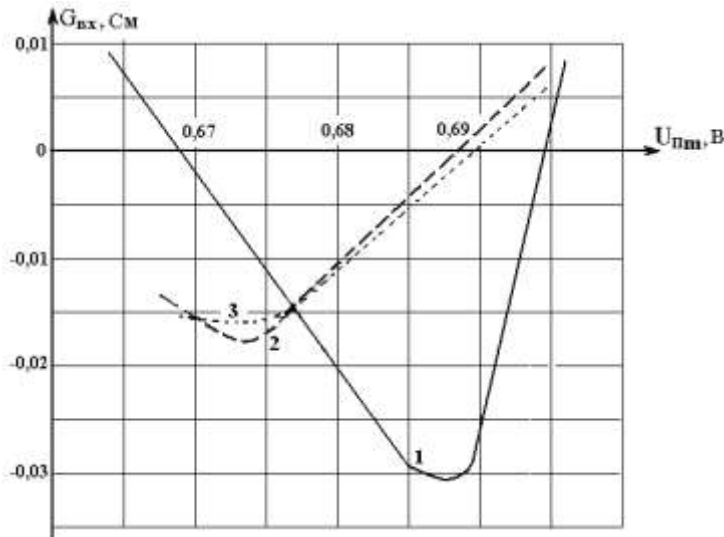


Рис. 4. Влияние величин параметров элементов входной цепи постоянного тока генератора на ход зависимостей активной компоненты входной проводимости транзистора, работающего в режиме класса С от амплитуды напряжения на открытом эмиттерном переходе: 1 – $E_{СМ} = -0,525$ В, $R_{СМ} = 0$; 2 – $E_{СМ} = 9,075$ В, $R_{СМ} = 10$ Ом; 3 – $E_{СМ} = 18,675$ В, $R_{СМ} = 20$ Ом

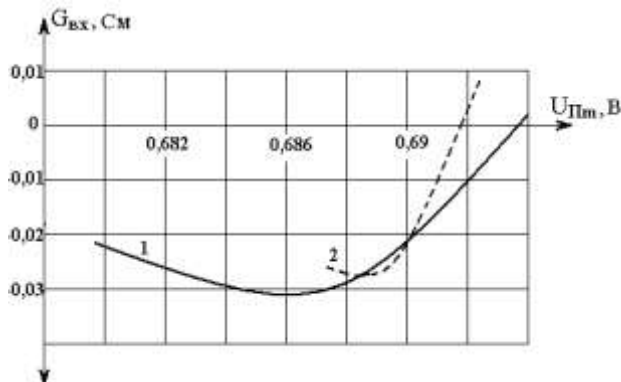


Рис. 5. Влияние величин параметров элементов входной цепи постоянного тока генератора на ход зависимостей активной компоненты входной проводимости транзистора, работающего в режиме класса АВ от амплитуды напряжения на открытом эмиттерном переходе: 1 – $E_{CM} = -0,525$ В $R_{CM} = 0$; 2 – $E_{CM} = 2,415$ В $R_{CM} = 1$ Ом

На рис. 4 и 5 приведены данные расчета, иллюстрирующие влияние параметров элементов входной цепи постоянного тока генератора на условия его возбуждения и устойчивости стационарного режима. Эти данные получены при учете зависимости емкости коллекторного перехода транзистора от режима его работы. Левые крайние точки зависимостей на рис. 4 при отрицательных величинах активной компоненты входной проводимости транзистора являются границами перехода линейного режима в нелинейный. Видно, что и при работе транзистора в режиме класса С может обеспечиваться «мягкий» ввод генератора в стационарный режим.

Увеличение сопротивления резистора смещения ограничено не только из-за увеличения потерь во входной цепи постоянного тока. Как следует из данных рис. 4 и 5, при этом сокращается разница между величинами амплитуд напряжения на открытом эмиттерном переходе в выбранном режиме работы транзистора и соответствующей его переходу из линейного режима в нелинейный. Очевидно, при малом различии этих амплитуд не обеспечивается устойчивость работы генератора при действии дестабилизирующих факторов условий эксплуатации, в частности, при уходах напряжения источника смещения и разбросе величины сопротивления резистора смещения. Это необходимо учитывать при выборе рабочего режима транзистора, особенно в случае его работы в режиме АВ.

Таким образом, при решении вопросов ввода в стационарный режим и обеспечения устойчивости работы СВЧ-генератора с внутренней обратной связью на биполярном транзисторе, работающем в недонапряженном режиме с отсечкой тока, можно использовать кусочно-квазилинейную модель. При этом необходимо учитывать зависимость величины барьерной емкости коллекторного перехода от режима работы прибора. Одновременно такой подход позволяет провести оценку времени пребывания прибора в линейном режиме при вводе генератора в стационарный режим, а также величины постоянного эмиттерного тока и выходной мощности в момент перехода транзистора из линейного режима в нелинейный. Эти данные важны для определения возможности построения генераторов, в которых применяются типы транзисторов, предназначенных для работы только в режиме класса С.

ЛИТЕРАТУРА

1. Odyniec M. Oscillator Stability Analyses / M. Odyniec // Microwave Journal. 1999. Vol. 42. № 6. P. 66-76.

2. Sun Jwo-Shinn. Design and Analyses of Microwave Varactor-tuned Oscillators / Jwo-Shinn Sun // Microwave Journal. 1999. Vol. 42. № 5. P. 302-310.

3. Фартушнов С.А. Обеспечение устойчивости стационарного режима СВЧ-генератора на биполярном транзисторе / С.А. Фартушнов, М.А. Фурсаев // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-электроника. 2001. Вып. 1. С. 9-13.

4. Лебедев В.В. Техника и приборы СВЧ: в 2 т. / В.В. Лебедев. М.: Высшая школа, 1972. Т. 2. 616 с.

Горбачев Денис Михайлович –

аспирант кафедры «Электротехника и электроника»
Саратовского государственного технического университета

Фурсаев Михаил Александрович –

доктор технических наук, профессор кафедры «Электротехника и электроника»
Саратовского государственного технического университета

Статья поступила в редакцию 06.07.07, принята к опубликованию 05.12.07

УДК 621.365.5

Е.М. Гришина

ТЕОРИЯ РАСЧЕТА МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

Рассмотрены идея и расчет многофункциональной электротехнологической установки, реализующей нетепловое воздействие на полимерные материалы и диэлектрический нагрев диэлектриков.

E.M. Grishina

THEORY OF ELEKTROTECHNOLOGICAL INSTALLATION MULTIFUNCTIONAL CALCULATION

The idea and calculation of multifunctional electro technological installations are studied here, realizing no thermal influence on polymeric material and heating dielectrics.

В настоящее время установлена возможность нетепловой обработки диэлектриков в СВЧ электромагнитном поле, в частности полимеров, при которой происходит модификация их свойств [1, 2]. Так, например, СВЧ-пастеризация молока, в отличие от традиционных режимов, может быть проведена при более низкой температуре и без выдержки молока в этом режиме. В работе [3] экспериментально показано наличие специфического действия СВЧ электромагнитных колебаний на полимеры, такие как синтетические волокна и ткани на их основе, эпоксидные смолы, смазочно-охлаждающие жидкости и смазки. Пребывание таких полимерных материалов в СВЧ электромагнитном поле, не приводящее к заметному повышению температуры объекта, придает полимерным материалам новые, технологически при-

влекательные свойства. Такое специфическое воздействие на полимеры в работе [4] предложено называть нетепловым.

СВЧ электротехнологические установки нетеплового действия – новый класс технологических установок, в которых используются СВЧ электромагнитные колебания.

В последнее время среди рабочих камер СВЧ электротехнологических установок особое внимание уделяют камерам лучевого типа (КЛТ), т.к. эти камеры дают возможность обрабатывать объекты с большими поверхностями. Такие рабочие камеры позволяют достичь большей производительности, чем камеры с бегущей и со стоячей волной, а в ряде случаев, например при обработке тканей, эти рабочие камеры не имеют альтернативы среди СВЧ рабочих камер других типов.

Нередко, как и ткань, полимерные материалы являются тонкими, так что в них поглощается лишь небольшая доля энергии пришедшей на их поверхность электромагнитной волны. Прошедшая через слой полимерного материала мощность равна

$$P_{\text{прош}} = P - P_{\text{отр}} - P_{\text{погл}} = P \left(1 - |\Gamma|^2 - \frac{P_{\text{погл}}}{P} \right) \approx P(1 - |\Gamma|^2), \quad (1)$$

где $P_{\text{отр}}$ – мощность, отраженная от поверхности обрабатываемого материала; $P_{\text{погл}}$ – мощность, поглощенная в материале; Γ – коэффициент отражения от поверхности обрабатываемого материала.

Таким образом, для обеспечения энергоэффективности установки требуются уменьшение коэффициента отражения Γ и максимально полезное использование прошедшей мощности $P_{\text{прош}}$.

СВЧ электротехнологическая установка с полезным использованием прошедшей через полимерный материал мощности может быть названа многофункциональной, потому что в ней одновременно реализуются два разных технологических процесса: нетепловое воздействие СВЧ электромагнитных колебаний на полимерный материал, приводящее к модификации его свойств, и диэлектрический нагрев иного диэлектрика, приводящий к его термообработке. Вопрос о создании таких гибридных установок, возможные варианты их компоновки ранее не ставились, методы их расчета отсутствуют.

Рассмотрим КЛТ многофункциональной установки, использующей в качестве излучателя рупорную антенну (рис. 1).

Как обычно, при расчете КЛТ будем считать, что на полимерный материал из рупора падает плоская волна.

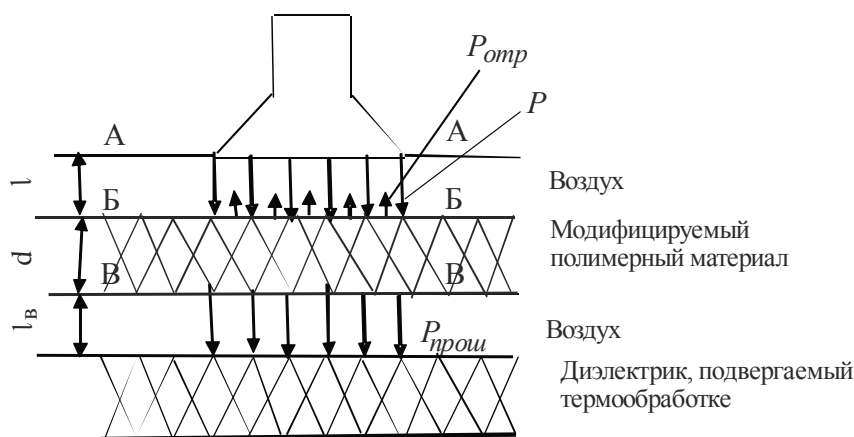


Рис. 1. Схема КЛТ многофункциональной установки

Рассчитаем коэффициент отражения плоской электромагнитной волны для указанной на рис. 1 слоистой системы. Если электромагнитная волна, прошедшая в диэлектрик, подвергается термообработке, затухает в нем без отражений, то входное сопротивление линии, состоящей из воздуха и диэлектрика (сечение В – В), равно

$$Z_{\text{exB-B}} = Z_0 \frac{Z_n + j Z_0 \operatorname{tg} \beta l}{Z_0 + j Z_n \operatorname{tg} \beta}, \quad (2)$$

где $Z_0=377377$ Ом – характеристическое сопротивление воздуха; $Z_n = \frac{377}{\sqrt{\epsilon'_o(1-j \operatorname{tg} \delta_o)}}$ – характеристическое сопротивление диэлектрика; ϵ'_o , $\operatorname{tg} \delta_o$ – относительная диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь диэлектрика; $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$ – фазовая постоянная; λ – длина волны в воздухе.

По аналогии входное сопротивление в сечении Б – Б можно записать в виде

$$Z_{\text{exB-B}} = Z_{on} \frac{Z_{\text{exB-B}} + Z_{on} \operatorname{th}(\alpha_n + j\beta_n) d}{Z_{on} + Z_{\text{exB-B}} \operatorname{th}(\alpha_n + j\beta_n) d}, \quad (3)$$

где $Z_{on} = \frac{377}{\sqrt{\epsilon'_n(1-j \operatorname{tg} \delta_n)}}$ – характеристическое сопротивление полимерного материала; ϵ'_n , $\operatorname{tg} \delta_n$ – относительная диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь полимерного материала.

Наконец, входное сопротивление в сечении А-А равно

$$Z_{\text{exA-A}} = Z_0 \frac{Z_{\text{exB-B}} + j Z_0 \operatorname{tg} \beta l}{Z_0 + j Z_{\text{exB-B}} \operatorname{tg} \beta l}. \quad (4)$$

Если рупорная антенна согласована с воздушным пространством, то энергетический КПД может быть рассчитан по соотношению

$$\eta = 1 - |\Gamma|^2, \quad (5)$$

где

$$\Gamma = \frac{Z_{\text{exA-A}} - Z_0}{Z_{\text{exA-A}} + Z_0}. \quad (6)$$

Отметим, что если пренебречь потерями в полимерном материале, то в соотношении (3) $\operatorname{th}(\alpha_n + j\beta_n) d \approx j \operatorname{tg} \beta_n d$, $Z_{on} \approx \frac{377}{\sqrt{\epsilon'_n}}$.

Для увеличения энергетического КПД, т.е. для обеспечения энергоэффективности гибридных СВЧ электротехнологических установок, необходимо уменьшить отражение падающей волны от поверхностей полимерного материала и диэлектрика. Наиболее существенное влияние на энергетический КПД оказывает отражение от поверхности термообрабатываемого диэлектрика, т.к. обычно $\sqrt{\epsilon'_o} \sqrt{(1-j \operatorname{tg} \delta_o)} \gg \sqrt{\epsilon'_n} \sqrt{(1-j \operatorname{tg} \delta_n)}$.

Наиболее просто эту задачу можно решить, если в сечении В-В вместо диэлектрика, подвергнутого термообработке, разместить согласованную с воздухом рупорную антенну, принимающую приходящую на нее СВЧ-мощность. В таком случае совокупность рупоров в плоскость в-в примет всю мощность, прошедшую через слой модифицированного полимера, и эта мощность может быть использована в надлежащим образом сконструированном устройстве для термообработки диэлектриков.

Что касается процесса термообработки диэлектрика, то он может быть реализован по схеме, показанной на рис. 2.

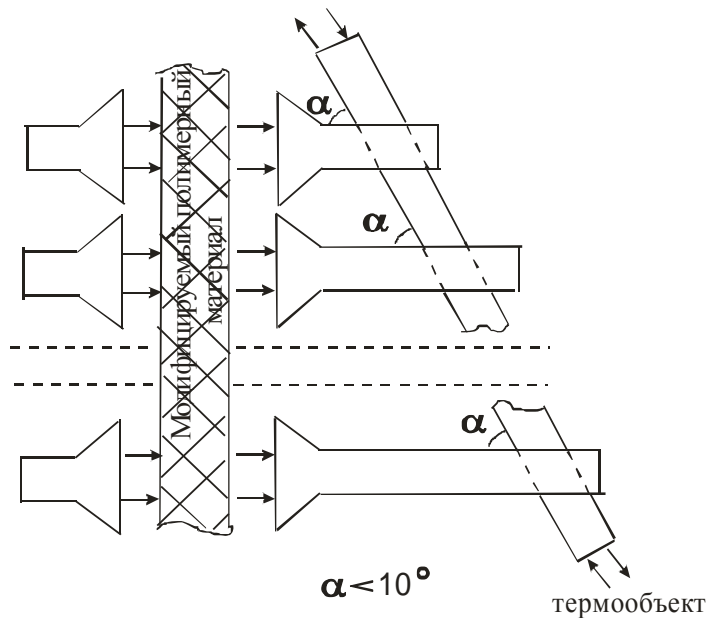


Рис. 2. Схема многофункциональной электротехнологической установки

Поступившая в приемные рупоры мощность СВЧ проходит в расположенные друг под другом короткозамкнутые волноводы стандартного сечения, пронизываемые под углом α к осям волноводов круглой радиопрозрачной диэлектрической трубой, по которой перемещается обрабатываемый диэлектрик (жидкость, сыпучий материал). В этом случае каждый из волноводов с наклонной трубкой, заполненной нагреваемым диэлектриком, представляет собой согласованную нагрузку, которая, как известно, имеет коэффициент стоячей волны по напряжению $K_{cmU} < 1,05$. Так что энергетический КПД каждой волноводной нагрузки $\eta = 0,9994$.

Возьмем в качестве обрабатываемого материала ткань с полимерной нитью. Ткань транспортируется между рупорными излучателями, причем полимерная нить находится в пучности волны типа H_{10} , так что вектор напряженности E совпадает с направлением полимерной нити в ткани. В качестве СВЧ-генератора может быть использован магнетрон, генерирующий СВЧ электромагнитные колебания с регулируемой мощностью на частоте 2450 МГц.

Энергия СВЧ подводится по прямоугольному волноводу сечением $a \times b$ с волной типа H_{10} , заканчивающемуся рупорным излучателем с апертурой $c \times e$. На рис. 3 представлено расположение рупорных излучателей по длине и ширине обрабатываемой ткани.

Учитывая направление полимерной нити в ткани, в качестве рупорного излучателя рекомендуется секториальный-Н рупор.

В случае с тканью наличие транспортной ленты не обязательно, так как ткань перематывается с бабины на бабины, но в других технологических процессах, связанных с обработкой сыпучего и твердого материала транспортная лента необходима.

Рассмотрим метод расчета многофункциональной установки (рис. 4).

При наличии приемного рупора входное сопротивление транспортной ленты (рис. 4), если, как обычно, подложка без потерь, равно

$$Z_{\text{встрл}} = Z_{\text{отрл}} \frac{Z_{\text{ов}} + Z_{\text{отрл}} \operatorname{tg} \beta_{\text{трл}} l_{\text{трл}}}{Z_{\text{отрл}} + Z_{\text{ов}} \operatorname{tg} \beta_{\text{трл}} l_{\text{трл}}}, \quad (7)$$

где $Z_{\text{ов}}$ – входное сопротивление воздуха = 377 Ом; $Z_{\text{отрл}} = \frac{377}{\sqrt{\epsilon'_{\text{трл}}}}$, $\epsilon'_{\text{трл}}$ – относительная диэлектрическая проницаемость; $\beta_{\text{трл}} = \frac{2\pi\sqrt{\epsilon'_{\text{трл}}}}{\lambda}$ – фазовая постоянная коэффициента распространения в транспортной ленте; $l_{\text{трл}}$ – толщина транспортной ленты.

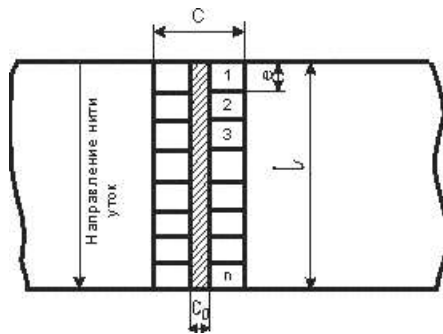


Рис. 3. Расположение рупорных излучателей на ткани:
 с, е – большая и малая стороны апертуры излучателя; l – ширина ткани;
 C_0 – обработанная поверхность с максимальной напряженностью; 1, 2, 3, ..., n – рупоры

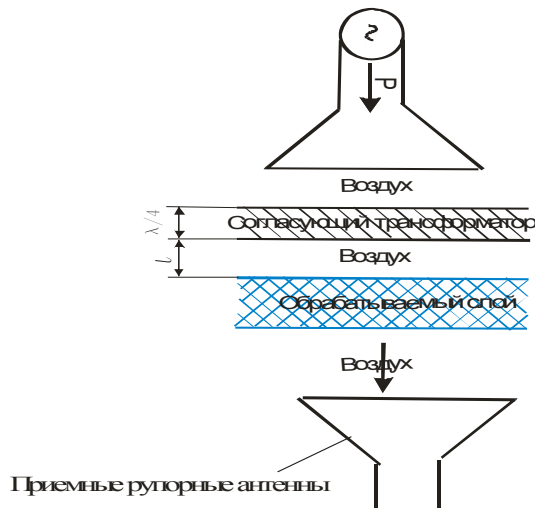


Рис. 4. Компоновка рабочей камеры

В свою очередь, $Z_{\text{оос}}$ является нагрузкой отрезка длинной линии, представляющей собой обрабатываемый диэлектрик. На входе этого слоя

$$Z_{\text{н}} = Z_{\text{оос}} \frac{Z_{\text{ов}} + Z_{\text{оос}} \operatorname{th}(\alpha_{\text{ос}} + j\beta_{\text{ос}})d}{Z_{\text{оос}} + Z_{\text{ов}} \operatorname{th}(\alpha_{\text{ос}} + j\beta_{\text{ос}})d} = R_{\text{н}} + jX_{\text{н}}, \quad (8)$$

где

$$Z_{оoc} = \frac{377}{\sqrt{\epsilon'_{oc}(1 - j \operatorname{tg} \delta_{oc})}}, \quad (9)$$

ϵ'_{oc} – относительная диэлектрическая проницаемость; $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь материала обрабатываемого слоя; $\gamma = \alpha + j \beta$ – постоянная распространения в обрабатываемом диэлектрике; α – постоянная затухания;

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon'_{oc}} \sqrt{\left(\frac{1}{2}(\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta_{oc}} - 1)\right)}; \quad (10)$$

β – фазовая постоянная

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon'_{oc}} \sqrt{\left(\frac{1}{2}(\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta_{oc}} + 1)\right)}; \quad (11)$$

d – толщина слоя обрабатываемого диэлектрика (рис. 4, а); $Z_{ex \text{ трл}}$ определяется по формуле (1), где R_n и X_n – активная и реактивная составляющие Z_n .

Так как, согласно (2), Z_n имеет реактивную составляющую X_n , по [5] между обрабатываемыми объектами и рупорным излучателем необходим отрезок линии с воздушным заполнением, на входе которого нагрузка для четвертьволнового трансформатора Z_{exx} будет чисто активной, то есть требуется, чтобы

$$Z_{exx} = Z_{ox} \frac{R_n + j X_n + j Z_{ox} \operatorname{tg} \beta l}{Z_{ox} + j(R_n + j X_n) \operatorname{tg} \beta l}, \quad (12)$$

где l – расстояние между слоем обрабатываемого объекта и выходом четвертьволнового трансформатора.

Как показано в [5], условие $I_m Z_{exx} = 0$ выполняется для значений $\operatorname{tg} \beta l$, являющихся корнями уравнения

$$Z_{об} X_n \operatorname{tg}^2 \beta l + (R_n^2 + X_n^2 - Z_{об}^2) \operatorname{tg} \beta l - X_n Z_{об} = 0, \quad (13)$$

что дает возможность найти длину l воздушного слоя.

Так как характеристическое сопротивление в четвертьволновом слое равно

$$Z_{0\lambda/4} = \sqrt{Z_{об} \operatorname{Re} Z_{exx}}, \quad (14)$$

а

$$Z_{0\lambda/4} = \frac{377}{\sqrt{\epsilon'_{\lambda/4}}}, \quad (15)$$

то из (7) и (8)

$$\epsilon'_{\lambda/4} = \sqrt{\frac{377}{\operatorname{Re} Z_{exx}}}, \quad (16)$$

причем длина четвертьволнового трансформатора

$$l_n = \frac{\lambda}{4 \sqrt{\epsilon'_{\lambda/4}}}. \quad (17)$$

Если плоская волна падает на плоскую границу раздела воздуха и полупространства, заполненного обрабатываемым объектом, то

$$\Gamma = \left| \frac{Z_{оoc} - Z_0}{Z_{оoc} + Z_0} \right|. \quad (18)$$

Коэффициент полезного действия установки определяется по формуле

$$\eta = 1 - |\Gamma|^2. \quad (19)$$

Коэффициент стоячей волны:

$$K_{cmU} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \leq 3. \quad (20)$$

В ходе расчета были получены следующие результаты: $Z_n = 315,554 - 118,08i$ Ом; $\text{tg } \beta l = 0,729$; $Z_{вх} = 256,897$ Ом; $\Gamma = 0,382$; $K_{cmU} = 2,236$; $\varepsilon'_{\lambda/4} = 1,202$; $\eta = 85\%$ при $\lambda = 12,24$; $d = 0,1$; $l_e = 1$; $l_{mрл} = 0,2$; $\varepsilon'_{mрл} = 2$; $\varepsilon'_{oc} = 5$; $\text{tg } \delta_{mрл} = 0$; $\text{tg } \delta_{oc} = 0,01$.

Таким образом, был предложен расчет многофункциональной электротехнологической установки, позволяющей использовать источники СВЧ-энергии как в одном технологическом процессе для нетепловой модификации, например, тканей на основе синтетических нитей, так и для нагрева сыпучего или твердого материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Архангельский Ю.С. СВЧ электротермия / Ю.С. Архангельский. Саратов: СГТУ, 1998. 408 с.
2. Архангельский Ю.С. СВЧ нагревательные установки для интенсификации технологических процессов / Ю.С. Архангельский, Н.Н. Девяткин. Саратов: СГТУ, 1983. 140 с.
3. Калганова С.Г. Влияние СВЧ электромагнитного поля на процесс отверждения эпоксидных смол / С.Г. Калганова, В.А. Лаврентьев // Современные проблемы радиотехники: сб. науч. тр. Красноярск: Краснояр. гос. техн. ун-т, 2002. С. 139-140.
4. Калганова С.Г. Нетепловое действие СВЧ электромагнитных колебаний / С.Г. Калганова // Электро- и теплотехнологические процессы и установки: межвуз. науч. сб. Саратов: СГТУ, 2003. С. 5-11.
5. Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ: в 2 т. / И.В. Лебедев. М.: Высшая школа, 1970. Т. 1. 435 с.

Гришина Екатерина Михайловна – ассистент кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета

Статья поступила в редакцию 06.07.07, принята к опубликованию 05.12.07

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ, ПРЕДСТАВЛЯЕМЫХ В РЕДАКЦИЮ ЖУРНАЛА «ВЕСТНИК СГТУ»

1. Статья должна быть тщательно отредактирована и представлена в одном экземпляре, распечатанном через 1 интервал на белой бумаге форматом А4, поля: верхнее, нижнее, левое, правое – 2,0 см; ориентация книжная; шрифт Times New Roman, высота 12. Одновременно текст статьи представляется на дискете (1,44 Мбайт) в формате текстового редактора «MS Word 97» или по электронной почте vestnik@sstu.ru.

2. Статья должна обосновывать актуальность темы, отражать теоретические и (или) экспериментальные результаты и содержать четкие выводы.

3. В начале статьи в левом верхнем углу ставится индекс УДК. Далее на первой странице данные идут в такой последовательности:

- инициалы и фамилии авторов,
- полное название статьи (шрифт жирный, буквы прописные),
- краткая (5-7 строк) аннотация (курсив).

Далее авторы, название статьи и аннотация повторяются на английском языке.

Затем идет текст самой статьи и литература.

Статья завершается сведениями об авторах: ф.и.о. (полностью), ученая степень, ученое звание, место работы (полностью), должность, контактные телефоны.

4. Объем статьи не должен превышать 10 страниц текста, содержать не более 5 рисунков или фотографий; объем обзора – 25 страниц, 10 рисунков; объем краткого сообщения – не более 3 страниц, 2 рисунков.

Иллюстрации (рисунки, графики) должны быть расположены в тексте статьи и выполнены в одном из графических редакторов (формат tif, psc, jpg, pcd, msp, dib, cdr, cgm, eps, wmf). Допускается также создание и представление графиков при помощи табличных процессоров «Excel», «Quattro Pro», «MS Graph». Каждый рисунок должен иметь номер и подпись. Рисунки и фотографии должны иметь контрастное изображение.

Таблицы располагаются непосредственно в тексте статьи. Каждая таблица должна иметь номер и заголовок.

5. Формулы и буквенные обозначения величин должны быть набраны в редакторе формул **Microsoft Equation 3.0**. Каждая формула должна иметь номер.

6. Размерность всех величин, принятых в статье, должна соответствовать Международной системе единиц измерений (СИ). Не следует употреблять сокращенных слов, кроме общепринятых (т.е., и т.д., и т.п.). Допускается введение предварительно расшифрованных сокращений.

7. Список литературы должен быть оформлен по ГОСТ 7.1-2003 и включать: фамилию и инициалы автора, название статьи, название журнала, том, год, номер или выпуск, страницы, а для книг – фамилии и инициалы авторов, точное название книги, место издания (город), издательство, год издания, количество страниц.

8. Специалисты в технических отраслях к статье прилагают экспертное заключение.

9. Рукописи статей представляются в редакцию с рецензией ведущего ученого в данной области, как правило, доктора наук.

10. Редакция оставляет за собой право производить редакционные изменения, не искажающие основное содержание статьи.

11. Статьи, не отвечающие перечисленным требованиям, к рассмотрению не принимаются, рукописи и дискеты авторам не возвращаются. Датой поступления рукописи считается день получения редакцией окончательного текста.

12. Для публикации и своевременной подготовки журнала необходимо заполнить регистрационную карту участника, представляемую на отдельном бумажном носителе и в электронном виде.

Регистрационная карта участника

<u>РЕГИСТРАЦИОННАЯ КАРТА АВТОРА, ПУБЛИКУЮЩЕГОСЯ В ЖУРНАЛЕ «ВЕСТНИК СГТУ»</u>		
Фамилия	Имя	Отчество
Полное название статьи		
Ученая степень	Ученое звание	Должность с указанием кафедры, отдела, лаборатории
Электронная почта	Служебный телефон/факс	Домашний адрес и телефон
Наименование направляющей статью организации		
Отрасль научной статьи		