СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ КОНФЕРЕНЦИИ

Министерство образования и науки Российской Федерации
Метрологическая академия Российской Федерации
Национальный исследовательский университет «МЭИ»
ОАО НПО «ЦНИИТМАШ»
ФГУП ЦНИИмаш
ВГИ (филиал) ВолГУ
ООО «ЛУКОЙЛ-Волгоградэнерго»
ОАО «Федеральная гидрогенерирующая компания – РусГидро»
Филиал ОАО «ФСК ЕЭС магистральные электрические сети Центра» (МЭС Центра), Волго-Донское ПМЭС
Волгоградский филиал ОАО «МРСК Юга»
Филиал МЭИ в г. Волжском

МОДЕЛИРОВАНИЕ И СОЗДАНИЕ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ

МЕЖРЕГИОНАЛЬНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

г. Волжский
24 - 27 сентября 2013 г.

Министерство образования и науки Российской Федерации
Метрологическая академия Российской Федерации
Национальный исследовательский университет «МЭИ»
ОАО НПО «ЦНИИТМАШ»
ФГУП ЦНИИмаш
ВГИ (филиал) ВолГУ
ООО «ЛУКОЙЛ-Волгоградэнерго»
ОАО «Федеральная гидрогенерирующая компания – РусГидро»
Филиал ОАО «ФСК ЕЭС магистральные электрические сети Центра»
(МЭС Центра), Волго-Донское ПМЭС
Волгоградский филиал ОАО «МРСК Юга»
Филиал МЭИ в г. Волжском

МОДЕЛИРОВАНИЕ И СОЗДАНИЕ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ

МЕЖРЕГИОНАЛЬНАЯ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

г. Волжский
24 – 27 сентября 2013 г.

Сборник материалов конференции

Волжский **Филиал МЭИ** **2013**

УДК 620.9(042)
ББК 31
Р 443

Организационный комитет:

Драгунов В.К. (председатель), Шамигулов П.В. (сопредседатель), Гончарова Л.К., Капля Е.В., Кузеванов В.С., Папуша А.И., Плякин А.В., Раменский П.П., Самедов Я.Ю., Скопов С.А., Султанов М.М., Терентьев Г.Ф., Чичирова Н.Д.

Моделирование и создание объектов энерго- и ресурсосберегающих технологий: Межрегиональная научно-практическая конференция, г. Волжский, 24-27 сентября 2013 г. / Сборник материалов конференции. – Волжский: Филиал МЭИ в г. Волжском, 2013. – 167 с.

ISBN 978-5-94721-085-9

В сборник вошли статьи, отражающие основное содержание докладов, представленных на конференции, в которых освещены актуальные проблемы развития теплоэнергетики, электроэнергетики, машиностроения, металлургии, химической, нефтеперерабатывающей и газовой промышленности в части моделирования и создания объектов энерго- и ресурсосберегающих технологий. Рассмотрены проблемы математического моделирования, автоматизированного проектирования, информационных технологий и управляющих систем. Обсуждены также проблемы внедрения технических и программных средств измерения, диагностики и автоматизации.

Публикуемые материалы предназначены для научных работников, инженеров и аспирантов. Материалы могут быть полезны студентам старших курсов технических вузов при выборе тематики бакалаврских работ, дипломных проектов и магистерских диссертаций.

Сохранена авторская редакция.

Печатается по решению Учебно-методического совета филиала МЭИ в г. Волжском.

УДК 620.9(042)
ББК 31

ISBN 978-5-94721-085-9

© Авторы, 2013
© Филиал МЭИ в г. Волжском, 2013

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ПОВЫШЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ТЭС

Чичирова Н.Д. – д-р хим. наук, профессор
Чичиров А.А. – д-р хим. наук, профессор
Филимонов А.Г. – канд. техн. наук
Паймин С.С., Власов С.М. – аспиранты
Казанский государственный энергетический университет

Экологически безопасная тепловая электрическая станция или безотходная ТЭС наряду с производством тепловой и электрической энергии предполагает наличие технологий с переработкой сточных вод и газообразных выбросов в ценные продукты для повторного использования как в цикле электростанций, так и в других производствах [1-3].

Программа создания экологически безопасных ТЭС реализуется в Западной Европе, США, Японии. В России действует государственная научно-техническая программа «Экологически чистая энергетика».

Перспективны два направления создания бессточных ТЭС:

– разработка и внедрение экономичных и экологически совершенных технологий подготовки добавочной воды парогенераторов и подпиточной воды теплосети;

– разработка и внедрение технологий максимально полной переработки и утилизации образующихся сточных вод с получением и повторным использованием в цикле станции исходных химических реагентов.

Водоподготовка на электростанциях России в основном осуществляется ионитными методами, термообессоливанием и мембранными методами. При этом исторически подготовка добавочной воды на первых электростанциях велась испарительной дистилляцией; но со строительством крупных теплоэлектроцентралей с большими объемами пара, отдаваемыми промышленным предприятиям, а также с созданием централизованного теплоснабжения испарительные установки почти повсеместно были заменены на технологии химического обессоливания.

На большинстве электростанций России подготовка добавочной воды котлов осуществляется путем химического обессоливания на блоках Н-катионитовых и ОН-анионитовых фильтров после коагуляции с известкованием. Подпиточная вода теплосети готовится путем осветления, коагуляции или коагуляции с известкованием и далее – одноступенчатого натрий-катионирования.

Однако при подготовке воды с использованием ионообменных технологий общая масса веществ в сточных водах в несколько раз превышает их количество, поступившее с исходной водой.

На ряде ТЭЦ [Саранская ТЭЦ, Казанская ТЭЦ-3 (рис. 1), Ростовская ТЭЦ-2, Омская ТЭЦ-5 и др.] для подготовки добавочной воды энергетических

котлов из воды с высокой степенью минерализации используют испарительные установки. Термообессоливающий комплекс Казанской ТЭЦ-3 состоит из двух цепочек многоступенчатых испарителей – шесть И-600 в каждой, включенных последовательно по пару и параллельно по питательной воде и двух испарителей мгновенного вскипания ИМВ-50, работающих на избыточном паре.

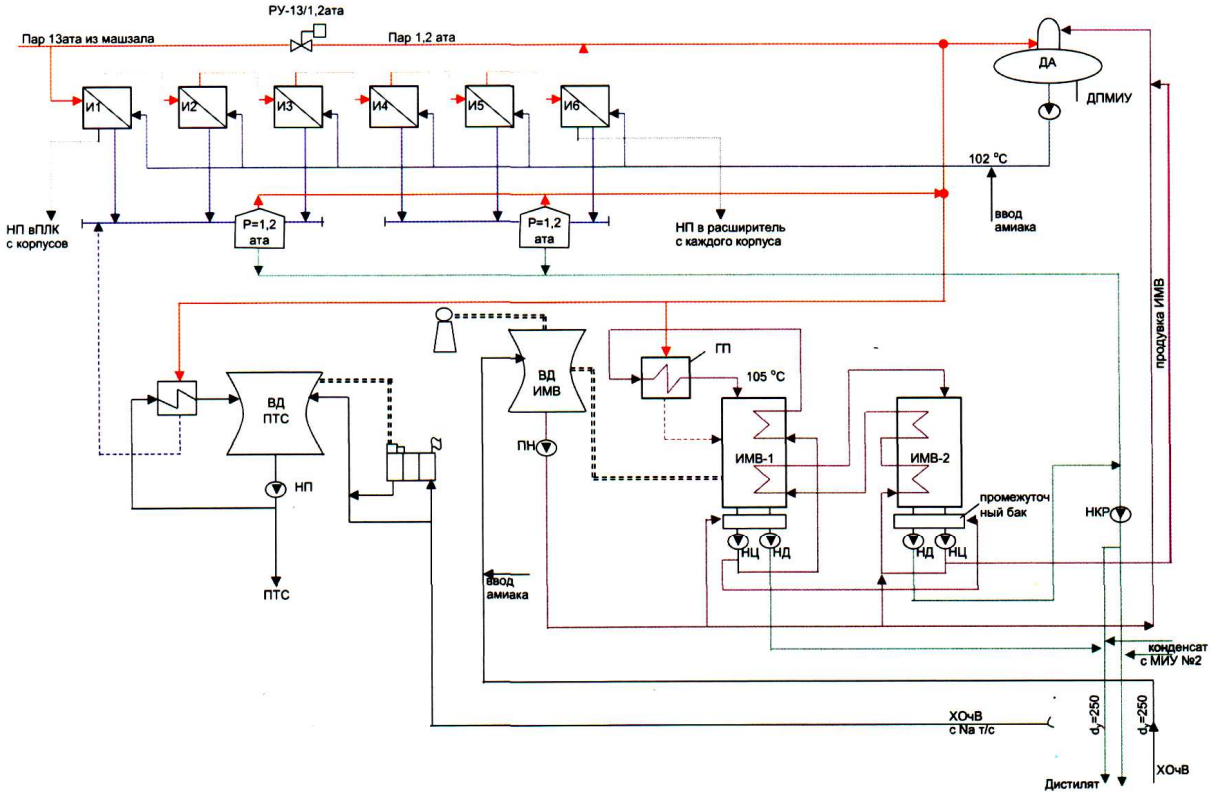


Рис. 1. Принципиальная схема термообессоливающего комплекса Казанской ТЭЦ-3

Производительность термообессоливающего комплекса – 340-400 м^3/ч дистиллята, соответствующего качеству добавочной воды котлов давлением 140 ата.

В последнее десятилетие на электростанциях России для подготовки добавочной воды паровых котлов, а также подпиточной воды теплосети используются баромембранные технологии. При этом первоначально обратноосмотические модули работали последовательно с ионообменным обессоливанием, в качестве предочистки использовали реагентную предочистку (ТЭЦ-23 «Мосэнерго», Сочинская ТЭЦ, Новочеркасская ГРЭС, Нижнекамская ТЭЦ-1). Так, введенная в эксплуатацию в 1999 г. УОО-166 на ХВО-2 Нижнекамской ТЭЦ осуществляет обессоливание воды, поступающей после традиционной реагентной предочистки в виде известкования, коагуляции и осветления на ультрафиолетовые стерилизаторы, патронные фильтры тонкой очистки и два мембранных модуля с ароматическими полиамидными мембранами фирмы «Hydranautics» [4].

В 2005-2009 гг. проведена реконструкция системы водоподготовки Заинской ГРЭС, которая в первоначальном варианте представляла собой последовательность катионитовых и анионитовых фильтров в виде трех ступеней

без предварительной очистки, на комплекс установок ультрафильтрации, обратного осмоса и противоточного ионирования [5].

В качестве предварительной очистки применяется установка ультрафильтрации, состоящая из трех модулей по 90 $м^3$/ч каждый. Осветленная вода после патронных предварительных фильтров тонкой очистки подается на обратноосмотические элементы производительностью 360 $м^3$/ч (280 $м^3$/ч – пермеат, 80 $м^3$/ч – концентрат). Пермеат проходит последнюю ступень очистки на фильтрах противоточного типа.

Хотя объем и солесодержание стоков водоподготовительных установок после реконструкции уменьшились до 25-55 %, концентрат установки обратного осмоса не подвергается очистке и утилизации.

Первая в СССР обратноосмотическая установка УОО-50 для подготовки добавочной воды на Зуевской экспериментальной ТЭЦ ВТИ работала на мембранах ЭРО-ЭМ-6,5/900 производства ПО «Тасма», г. Казань.

На электростанциях нашей страны мембранные технологии водоподготовки на основе электродиализа практически не реализуются, хотя выполнено достаточно много работ теоретического плана с хорошим научным уровнем.

За рубежом, особенно в США, в связи с тем, что лицензия на работу электростанции выдается зачастую при условии полной бессточности (Флорида, США), схемы водоподготовки и очистки стоков взаимоувязаны и представляют собой комбинацию мембранных методов, ионитного и термического обессоливания.

Подготовка воды на ядерной станции Брайдвуд (Иллинойс, США) представляет собой коагуляцию в присутствии хлорирующего агента, известкового молока и флокулянта, фильтрацию на песчаном или активноугольном фильтрах, ультрафильтрацию, электродиализ, обратный осмос, катионообменный слой, анионообменный слой, смешанный слой.

На ряде ТЭС США концентрат установки обратного осмоса и рассол электродиализной установки, пройдя механическую очистку, поступают на ЭДУ и ООУ первой ступени, рассол и концентрат которых подается на испарительную установку и фильтр-пресс для получения солей и утилизации их в твердом виде.

Анализ технологий, реализуемых для переработки высокоминерализованных сточных вод на отечественных электростанциях, позволяет утверждать, что полная утилизация осуществима только путем испарения в различных типах испарительных установок. При этом получают в качестве продуктов, пригодных к дальнейшей реализации: шлам осветлителей (в основном – карбонат кальция), шлам на гипсовой основе (в основном – двухводный сульфат кальция), хлорид натрия, сульфат натрия.

На Казанской ТЭЦ-3 создан замкнутый цикл водопотребления путем комплексной переработки высокоминерализованных сточных вод термообессоливающего комплекса с получением регенерационного раствора и гипса в виде товарного продукта. Работа выполнена специалистами Московского энергетического

института, ОАО «ВНИПИЭнергопром»; автоматизированная система управления разработана ЗАО «Энергосистематехника-2000», г. Москва.

При работе по этой схеме образуется избыточное количество продувочной воды испарительной установки в объеме около 1 м^3/ч. Продувка представляет собой концентрированный раствор, в котором в основном содержатся катионы натрия и сульфат-ионы.

Разработана технология переработки избытка продувочной воды термообессоливающего комплекса на базе электромембранной установки с получением щелочи и умягченной воды, рис. 2.

Рис. 2. Электромембранная опытная установка утилизации избытка продувочной воды испарителей

Сущность электромембранного метода заключается в направленном переносе диссоциированных ионов (растворенных в воде солей) под влиянием электрического поля через селективно проницаемые ионообменные мембраны.

В аппарате применяются два вида мембран: мембраны, селективно проницаемые для катионов – катионитовые мембраны, и мембраны, селективно проницаемые для анионов – анионитовые мембраны. Многокамерные двухтрактные аппараты ЭМА-120/2 и ЭМАК-120 имеют две изолированные друг от друга группы камер – тракт обессоливаемого раствора (диализатный) и тракт концентрирования (рассольный). По тракту обессоливания аппарата ЭМА-120/2 подается в циклическом режиме предварительно очищенный через блок механической фильтрации рабочий раствор, содержащий в том числе щелочь, подлежащую выделению. По тракту концентрирования подается вода. В результате процесса при подборе определенных технологических режимов щелочь и частично другие солевые примеси выделяются из перерабатываемого рабочего раствора и переходят в тракт концентрирования. Полученный раствор после этого подвергается дополнительному концентрированию на аппарате ЭМАК-120.

Продувочная вода испарительной установки содержит большое количество малорастворимых примесей – соединения железа, меди, кремния, поэтому первая

стадия обработки продувки включает предварительную очистку воды на фильтре-органопоглатителе.

Щелочной раствор отправляется на концентрирование или непосредственно потребителю. Дилюат можно использовать на подпитку теплосети или подпитку испарителей.

Образующаяся щелочь имеет высокую чистоту и может использоваться в цикле станции, например, для регенерации анионитных фильтров I ступени. Обессоленная вода подается на подпитку теплосети.

Применение электромембранной установки кроме получения щелочи позволяет значительно сократить годовой объем сбросных вод, а сточные воды термообессоливающего комплекса при реализации данной технологии полностью исключаются.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Чичирова, Н.Д.* Разработка и создание ТЭС с высокими экологическими показателями / Н.Д. Чичирова, А.А. Чичиров, А.И. Ляпин, А.Г. Королёв, Т.Ф. Вафин // Труды Академэнерго. – 2010. – № 1. – С. 34-44.

2. *Chichirova, N.D.* Prospects of environmentally friendly thermal power plant development / N.D. Chichirova, A.A. Chichirov, I.H. Gaifullin, A.I. Lyapin, A.G. Korolev // Transactions of Academenergo. – 2010. – № 4. – P. 33-53.

3. *Чичирова, Н.Д.* Экологическая и экономическая эффективность внедрения ресурсосберегающих технологий на тепловых электрических станциях / Н.Д. Чичирова, А.А. Чичиров, А.И. Ляпин, А.Г. Королёв, Т.Ф. Вафин // Труды Академэнерго. – 2010. – № 3. – С. 65-71.

4. *Чичирова, Н.Д.* Баромембранные технологии в энергетике: Монография / Н.Д. Чичирова, С.М. Власов. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2011. – 272 с.

5. *Чичирова, Н.Д.* Пост автоматизированного мониторинга качества воды на баромембранных установках в схеме водоподготовки Заинской ГРЭС / Н.Д. Чичирова, А.А. Чичиров, А.М. Хазеев, А.А. Коровкин // Труды Академэнерго. – 2011. – № 2. – С. 100-107.

КОНЦЕПЦИЯ ЭКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕГИОНАЛЬНЫХ И МЕЖРЕГИОНАЛЬНЫХ ПРОЕКТОВ НА БАЗЕ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ КОНВЕРСИОННОЙ РАЗРАБОТКИ

О ПЕРСПЕКТИВАХ И ПРЕИМУЩЕСТВАХ ИНТЕГРАЦИОННЫХ ЭКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОЕКТОВ МЕЖГОСУДАРСТВЕННОГО УРОВНЯ

Папуша А.И. – д-р техн. наук, академик РАЕН,
лауреат Государственной премии СССР

Предлагается принципиально новое решение комплекса экоэнергетических проектов в области энергетики, ресурсосбережения и охраны окружающей среды на базе отечественной конверсионной разработки. В основу проектов закладывается принципиально новый тип высокоскоростного высокотемпературного

горения. В техническом воплощении используется однотипный исполнительный блок (рисунок), комплектуемый на конверсионной основе отечественной ракетно-космической техники. Его высокая эффективность, универсальность и компактность предоставляют уникальную возможность формировать мобильные комплексы автомобильного, водного, железнодорожного, авиационного базирования. Сочетание стационарных объектов и мобильных комплексов позволяет оптимизировать решение объектовых, муниципальных, региональных и межгосударственных экоэнергетических проблем.

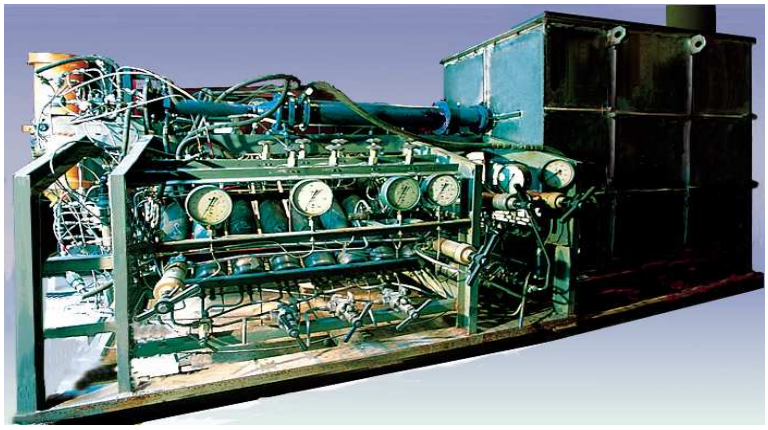


Рисунок. Базовый исполнительный модуль

Производительность: 300-1 000 кг/ч, габариты 4,5×2,0×2,8 м. Потенциальная электрическая мощность до 1 МВт

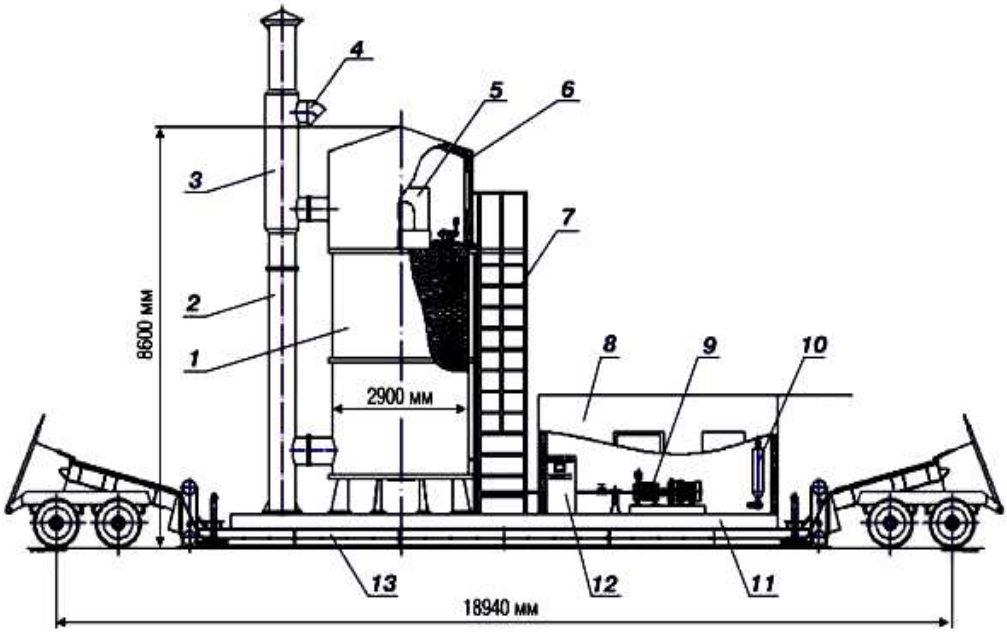
Инновационный подход и интегрирование интересов и возможностей участников проекта полностью корреспондируются с современной политикой повышения энергоэффективности и ресурсосбережения, освоения возобновляемых источников энергии, развития малой энергетики и особенно охраны окружающей среды. Последовательно усложняя задачи от освоения местных топливных ресурсов до обезвреживания супертоксикантов, наращивая оснащение исполнительных объектов за счет собственных ресурсов и с помощью участников проекта, можно в обозримые сроки кардинально улучшить ситуацию в области экоэнергетики. Выполнение международных обязательств, декларированных Стокгольмской конвенцией, Монреальским и Киотским протоколами и др., способствует повышению авторитета участников проектов на мировой арене. По мере выполнения проектов разного уровня, рамки международного сотрудничества могут последовательно расширяться в масштабах ЕврАзЭС, ШОС и БРИК.

СОЗДАНИЕ СКВАЖИННОГО ПАРОГАЗОГЕНЕРАТОРА НА БАЗЕ НОВОГО ТИПА ГОРЕНИЯ

Папуша А.И. – д-р техн. наук, академик РАЕН,
лауреат Государственной премии СССР
Папуша И.А.

Предлагается принципиально новое решение проблемы добычи тяжелой глубинной нефти путем использования компактного скважинного парогенератора. Конверсионная технология высокоскоростного высокотемпературного горения

позволила обеспечить создание компактного регулируемого в широком диапазоне источника парогаза, размещаемого непосредственно в разрабатываемом продуктивном пласте. В качестве источника тепла используется не более 10 % кондиционного топлива и 90 % добываемой сырой нефти, которые частично сжигаются в несортовом техническом кислороде. В образовавшиеся продукты сгорания вводится расход воды, приблизительно трехкратно превышающий расход генераторного газа. Впрыскиваемая вода может быть природной, неочищенной. Разрабатываемый парогазогенератор имеет размеры 50×800 мм, что позволяет осуществлять его размещение на различных глубинах, в продуктивном пласте. Для сравнения, габаритные размеры традиционного теплообменника – 3×9 м.



Традиционный парогенератор

Разрабатываемый парогазогенератор

Проведена серия экспериментального опробования полупромышленного образца с параметрами, максимально приближенными к реальным промышленным условиям. Производительность сравниваемых объектов составляет 10 тонн в час. Компоновку подводящих магистралей предполагается осуществить в осевом направлении (максимальный поперечный размер представляется на уровне 100 мм).

СЕКЦИЯ № 1

ХИМИЧЕСКАЯ, НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩАЯ И ГАЗОВАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

Председатель: ***Чичирова Н.Д.*** – д-р хим. наук, профессор
директор института теплоэнергетики (ИТЭ),
зав. кафедрой «Тепловые электрические станции» КГЭУ

Сопредседатели: ***Плякин А.В.*** – д-р экон. наук, зав. кафедрой
«Природоведение» ВГИ филиал ВолГУ
Одоевцева М.В. – канд. техн. наук, доцент
филиала МЭИ в г. Волжском

Секретарь: ***Демидова Е.А.*** – зав. лабораторией кафедры ТВТ
филиала МЭИ в г. Волжском

ОЧИСТКА ВОДЫ ОТ ОРГАНИЧЕСКИХ И МИНЕРАЛЬНЫХ ПРИМЕСЕЙ НА ОСНОВЕ МЕМБРАННОЙ ОБРАБОТКИ ВОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ГЕНЕРАЦИИ ОН-РАДИКАЛОВ

Бушова К.И., Шаркова М.А.
Всероссийский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт атомного и энергетического машиностроения (ОАО «ВНИИАМ»)

В настоящее время многие отрасли промышленности сталкиваются с проблемой очистки воды, содержащей органические и минеральные примеси, например нефтепродукты, в частности фенолы. К таким отраслям относятся атомная энергетика, химическое и нефтеперерабатывающее производство. Известные схемы по очистке воды от органических и минеральных примесей, включающие в себя несколько ступеней очистки, в том числе и мембранные технологии, не лишены некоторых недостатков, таких как: невозможность полной очистки от органических примесей, включая фенолы; утилизация концентрированных сточных вод; большие капитальные затраты. Поэтому в данном вопросе необходимо обратить внимание на один из перспективных методов удаления органических загрязнений воды и очистки промышленных стоков, которым является технология, основанная на использовании эффективных процессов окисления. Именно при включении процесса эффективного окисления в блок предварительной очистки реализуются эффективные процессы деструкции органических примесей, в том числе фенолов.

Представленная технологическая схема очистки воды от органических и минеральных примесей на основе мембранной обработки воды и технологии генерации ОН-радикалов включает в себя блок предварительной и глубокой очистки. В блок предварительной очистки входят генератор ОН-радикалов и озона и узел ультрафиолетового облучения, после которого по ходу очищаемой воды установлен фильтр насыпного типа. Для генерации ОН-радикалов широко

используются ультрафиолетовые лампы (UV диапазон с длиной волны 254 нм) и эксимерные ксеноновые лампы вакуумного ультрафиолета (VUV диапазон – 172 нм). В результате высокой реакционной способности ОН-радикалов реакции с их участием происходят очень быстро, часто со скоростью сравнимой с диффузионной, и имеют неселективный характер. В узле ультрафиолетового облучения происходит дополнительная бактерицидная обработка воды и окисление оставшихся органических соединений посредством превращения остаточного озона в высокоактивные и короткоживущие радикалы ОН*. Такой способ обработки повышает степень очистки воды от органических примесей, чем увеличивает эффективность обработки воды. В сорбционных фильтрах насыпного типа происходит удаление оставшихся органических соединений. В блок глубокой очистки входят установка обратного осмоса, блок корректировки pH, установка электродеионизации. Мембраны установки обратного осмоса задерживают минеральные, истинно растворимые примеси, но пропускают низкомолекулярные вещества, например такие газы, как кислород, хлор, углекислый газ и пр. Очищенная вода из-за наличия растворенного углекислого газа может иметь слабокислую реакцию (pH < 7), а так как для подачи на установку электродеионизации требуется значение pH ≈ 7, то после установки обратного осмоса в схеме предусмотрен блок корректировки pH. Компоненты блока корректировки значения pH зависят от производительности установки в целом. Так, для малой производительности достаточно использовать узел дозирования щелочи, в то время как при больших производительностях в схему включается дополнительно декарбонизатор. В установке электродеионизации вода подвергается глубокому обессоливанию за счет ее прохождения через полупроницаемые мембраны, на которые подается электрическое напряжение. Значение электропроводимости на выходе варьируется в диапазоне от 0,1 до 0,2 мкСм/см. Очищенная вода после установки электродеионизации подается в емкость запаса глубоко очищенной воды. Система очистки воды от органических и минеральных примесей поясняется схематичным чертежом (рис. 1).

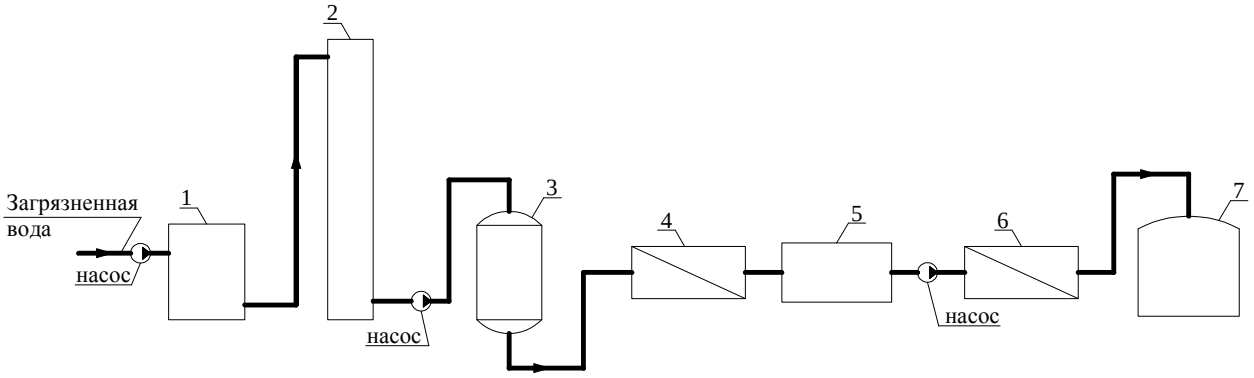


Рис. 1. Система очистки воды от органических и минеральных примесей:
1 – генератор ОН-радикалов; 2 – узел ультрафиолетового облучения;
3 – сорбционный фильтр; 4 – установка обратного осмоса; 5 – блок корректировки pH;
6 – электродеионизационная установка; 7 – емкость для сбора глубоко очищенной воды

Отдельно хотелось бы отметить, что в основу технических решений данного метода очистки положена технология очистки воды различного назначения и стоков от органических загрязнений XENOZONE с использованием генераторов ОН-радикалов, генераторов озона и ультрафиолетовых ламп. Технология деструкции органики XENOZONE разрабатывалась и применена на следующих промышленных объектах:

1) Уфимский НПЗ. Поставка и запуск генераторов ОН-радикалов и озона на базе эксимерных ксеноновых ламп для предочистки воды в установке обратного осмоса производительностью 150 $м^3$/ч. – 2010 г.;

2) Нововоронежская АЭС. Пилотная установка производительностью 4 $м^3$/ч по очистке сбросных вод АЭС от моноэтаноламина. Разработка методики удаления моноэтаноламина. – 2011 г.;

3) СПбАЭП. Отработка технологии удаления моноэтаноламина для разработки ИТТ (исходных технических требований) для ЛАЭС-2, Балтийской АЭС и Белорусской АЭС (комплекс по деструкции 3 кг моноэтаноламина в час). Создание и испытание пилотной установки по деструкции моноэтаноламина производительностью 50 г органики в час. – 2012 г.;

4) Нововоронежская АЭС. Опытно-промышленное опробование технологии очистки конденсата от органических загрязнений для подпитки первого контура реактора ВВЭР-440. Производительность 5 $м^3$/ч. – 2013 г.

Уникальность данной технологии очистки воды состоит в том, что:

– благодаря включенному в блок предварительной обработки воды генератору ОН-радикалов реализуются эффективные процессы деструкции органических примесей, в том числе фенолов; содержание общего органического углерода в исходной воде снижается на 92,5 %;

– процессы окисления с участием ОН-радикалов имеют скорости реакции в миллион раз выше, чем у озона;

– во включенном в систему узле ультрафиолетового облучения происходит дополнительная бактерицидная обработка воды и окисление оставшихся органических соединений посредством превращения остаточного озона в высокоактивные и короткоживущие радикалы ОН*, что повышает степень очистки воды от органических примесей.

Достоинством предлагаемой технологии очистки воды от органических и минеральных примесей на основе мембранной обработки воды и технологии генерации ОН-радикалов является:

– практически полный отказ от применения химических реагентов для обессоливания воды;

– доведение исходной загрязненной воды до значения удельной электропроводимости менее 0,2 мкСм/см;

– решение проблемы концентрированных сточных вод;

– снижение капитальных затрат на установку.

ЭМУЛЬСИЯ ДИЗЕЛЯ С ВОДНОСПИРТОВОЙ СМЕСЬЮ И ДИЗЕЛЯ С ВОДНОАЦЕТОНОВОЙ СМЕСЬЮ

Васильева Е.В. – аспирантка ВолгГТУ
Карева Г.Н. – канд. хим. наук, доцент
Волгоградского филиала РГУТиС
Голованчиков А.Б. – д-р техн. наук, профессор ВолгГТУ

Вода попадает в топливо при его хранении, перевозке, заправке и эксплуатации автомобиля (отмечено, что практически полностью обезвоженное топливо при хранении быстро насыщается водой). При обычных условиях содержание воды в топливе по абсолютной величине не превышает 0,03 % (мас.) при 20 °С и изменяется при изменении атмосферных условий (влажности, температуры, давления) [1].

При изменении условий часть растворенной воды выделяется из топлива в виде эмульсии. Эмульсия может расслаиваться с образованием слоя воды в свободном состоянии. Эти три состояния (раствор, эмульсия, свободное состояние) могут переходить друг в друга при изменении метеорологических и эксплуатационных условий. Образование эмульсии облегчается, а ее устойчивость увеличивается в присутствии поверхностно-активных веществ, которые, адсорбируясь на поверхности капель, препятствуют их слиянию. В топливе такими веществами являются нафтеновые кислоты и смолистые вещества. С утяжелением фракционного состава топлива растворимость в нем воды уменьшается.

Применение бензо-водяных эмульсий ограничивается их недостаточной стабильностью. Для стабилизации бензо-водяных эмульсий вводят присадки, обладающие поверхностно-активными свойствами – эмульгаторы. Качество эмульсии зависит от метода ее образования. Для получения эмульсий используют диспергаторы различных типов. Бензо-водяные эмульсии можно использовать как в двигателях с принудительным воспламенением, так и в дизелях. Применение бензо-водяных эмульсий в дизелях улучшает смесеобразование (за счет дополнительного дробления топлива парами перегретой воды) и снижает тепловую напряженность процесса, что дает возможность дополнительно форсировать двигатель, например путем увеличения давления наддува. При работе дизеля на бензо-водяных эмульсиях увеличивается период задержки воспламенения и скорость нарастания давления при уменьшении максимальных давлений и температуры цикла. Соответственно несколько ухудшаются пусковые характеристики двигателя. При использовании бензо-водяных эмульсий уменьшается закоксовывание топливоподающей системы дизеля (отмечено, что относительно кратковременная работа дизеля на бензо-водяных эмульсиях уменьшает количество отложений, образовавшихся ранее). В отработавших газах дизеля снижается концентрация оксидов азота и сажи.

К общим для всех типов двигателей недостаткам применения добавления воды относят возможность отложения накипи в камере сгорания, усиленный

коррозионный износ цилиндропоршневой группы и образование низкотемпературных отложений. Попадание воды в масло вызывает ухудшение его свойств и интенсивное пенообразование в картере двигателя.

Добавка спиртов к дизельным топливам (до 15 % метанола или до 20 % этанола) улучшает их низкотемпературные свойства. Такие смеси условно можно рассматривать как разновидность топлив широкого фракционного состава. При их использовании следует учитывать уменьшение цетанового числа, вязкости и плотности дизельного топлива, обусловливаемые добавкой спирта [2].

Спирты по сравнению с дизельным топливом имеют пониженное самовоспламенение (ЦЧ 3…10 ед.). Работа дизеля на смесевых составах может быть реализована без существенных конструктивных изменений двигателя.

Использование спирта в качестве альтернативного топлива в дизелях возможно из-за низкой склонности к дымлению (высокое содержание O_2), высокого ЦЧ и небольшой задержки самовоспламенения. Улучшение экологических показателей дизеля сопровождается улучшением до 5 % его экономических показателей по сравнению с работой на дизельном топливе.

Метиловый спирт получил применение в качестве моторного топлива в транспортных дизелях. Испарение метанола со стенок камеры сгорания и его последующее выгорание происходят путем теплоизлучения в результате интенсивного теплового потока в объеме камеры сгорания. Пусковые качества двигателя при работе на трудно испаряемом метаноле хорошо обеспечиваются до температуры −20 °С. Метанол, имея в своем составе кислород, интенсивно выгорает. Образующиеся на стадии быстрого сгорания NO_x в отработанных газах эквивалентны работе двигателя на дизельном топливе. В составе отработанных газов практически отсутствует сажа. Очень низкая в них концентрация C_mH_n и CO, сульфаты и твердые частицы отсутствуют. Метанол улучшает процесс сгорания топлива благодаря образованию радикалов, активизирующих цепные реакции окисления. Для сгорания метанола характерно существенное снижение дымности равное 40…50 % на режимах полной нагрузки. Это обусловлено меньшим содержанием в метаноле углерода и большим содержанием кислорода.

При работе дизеля на метаноле с неполной нагрузкой соблюдается некоторое увеличение C_mH_n и CO, но в отработанных газах повышается содержание CO_2 и альдегидов. Отмечено увеличение эффективного удельного расхода спиртового топлива. На режиме наилучшей экономичности переход с дизельного топлива на метанол сопровождается повышением удельного расхода топлива g_e с 240 до 470 г/кВт·ч, что связано с низкой теплотой сгорания метанола (19,67 против 42,5 МДж/кг у дизельного топлива).

Экологические характеристики дизеля с присадкой спирта заметно улучшаются. Выбросы оксидов серы полностью определяются содержанием серы в топливе. На режиме Рен – номинальная мощность при работе на спиртах – достигается сокращение Cso_2 в 3,3 раза. При работе дизеля без подачи спиртов с ростом Ре-мощности увеличивается температура в цилиндре, что приводит

к экспоненциальному увеличению скорости образования NO_x. На больших нагрузках этот рост перекрывается снижением образования NO_x из-за уменьшения концентрации в цилиндре дизеля свободного кислорода из-за снижения α-коэффициента избытка воздуха. Низкие значения CN_{ox} в отработанных газах исследуемого дизеля 0,5…0,7 г/м^3 при работе без подачи спиртов объясняются конструкцией дизеля. В вихрекамерных дизелях начальные стадии сгорания происходят в вихревой камере при значениях α-коэффициента избытка воздуха значительно меньше 1,0. Содержание NO_x ограничено недостатком свободного O_2, а процесс догорания происходит в объеме цилиндра во время расширения при относительно низких температурах [3].

Задачей эксперимента являлось получение стабильных эмульсий дизельного топлива с водно-спиртовой смесью (ВСС) и водно-ацетоновой смесью (ВАС). Известно, что вода, этиловый спирт и ацетон не растворяются в дизельном топливе, но пары растворителей: этиловый спирт и вода, а также ацетон и вода хорошо растворяются друг в друге.

Объемные соотношения воды и этилового спирта в смеси подбирали таким образом, чтобы плотность ВСС была максимально приближена к плотности дизельного топлива. Аналогично выбирали объемное соотношение воды и ацетона.

Плотность дизельного топлива, водно-спиртовой смеси, состоящей из 13,7 мл этилового спирта (содержащего 94 % C_2H_5OH) и 1,3 мл воды, водно-ацетоновой смеси, состоящей из 13,3 мл ацетона и 1,7 мл воды, измеряли пикнометром при 20 °С.

Плотности дизельного топлива, ВСС и ВАС, соответственно, равны:

$$\rho^{20}_{\text{ДТ}} = 833 \text{ кг/м}^3; \quad \rho^{20}_{\text{ВСС}} = 833 \text{ кг/м}^3; \quad \rho^{20}_{\text{ВАС}} = 833{,}96 \text{ кг/м}^3.$$

Результаты опытов

Опыт 1. Смешали 15 мл дизельного топлива и 15 мл этанола ρ^{20} = 805 кг/м^3 ($\omega_{\text{этанол}}$ = 94 %) в делительной воронке. Образовалась эмульсия; деление фаз началось через 30 минут и закончилось через 1 час. Верхняя фаза – желтая мутная эмульсия (16,5 мл), нижняя фаза – светло-желтая прозрачная жидкость (13,5 мл).

Нижнюю фазу дизельного топлива 13,5 мл, насыщенную этанолом, смешали с 2 мл воды в делительной воронке. Деление фаз началось через 20 минут: верхняя фаза – желтая мутная эмульсия (13,5 мл) и нижняя – чуть мутная вода (2 мл). Хотя количество воды не изменилось, можно судить о том, что топливо взяло воду, потому что оно стало мутным. Получили стабильную желтую мутную эмульсию дизельного топлива со следами этанола и воды.

Опыт 2. Смешали 15 мл ДТ и 15 мл ВСС (13,7 мл этилового спирта + + 1,3 мл воды) в делительной воронке (объемное соотношение ДТ : ВСС = 50 : 50 %). Полученная эмульсия была стабильна в течение 1 часа, а затем началось разделение: верхняя фаза – желтая мутная эмульсия (14,5 мл), нижняя фаза – светло-желтая эмульсия с мелкими каплями (14 мл). Разделенные фазы перегнали на воздушной бане при атмосферном давлении. В верхней фазе содержится большее

количество этилового спирта. Температура начала перегонки – 79 °С; температура конца перегонки – 98 °С (температура кипения этилового спирта – 78,5 °С); кубовый остаток (2 мл) – мутная желтая эмульсия. В нижней фазе содержится 0,5 мл этилового спирта, который перегонялся при t = 78 °С; кубовый остаток – желтая мутная эмульсия, в основном дизельное топливо.

В опытах 3 и 4 объемы ДТ и ВСС брались, соответственно, 20 и 10 мл (объемные соотношения ДТ : ВСС = 66,66 : 33,33 %) и 25 и 5 мл (объемные соотношения ДТ : ВСС = 83,33 : 16,66 %). Деление фаз началось через 1 час: верхняя фаза – желтая мутная эмульсия (опыт 3 – 18 мл, опыт 4 – 26 мл); нижняя фаза – светло-желтая эмульсия (опыт 3 – 11 мл, опыт 4 – 4 мл).

Опыт 5. Смешали 15 мл ДТ и 15 мл ВАС (13,3 мл ацетона и 1,7 мл воды) в делительной воронке (объемное соотношение ДТ : ВАС = 50 : 50 %). Полученная эмульсия через 30 минут разделилась: верхняя фаза – желтая мутная эмульсия (V = 15,8 мл), нижняя фаза – прозрачная желтая жидкость (V = 12,4 мл). Разделенные фазы перегнали на водяной бане при атмосферном давлении: в верхней фазе содержится 1 мл ацетона, который перегонялся при t = 58 °С (температура кипения ацетона – 56,24 °С); кубовый остаток – светло-желтый прозрачный, содержит дизельное топливо (13,4 мл). В нижней фазе содержится основное количество ацетона. Температура начала перегонки – 56 °С; температура конца перегонки – 62 °С (температура кипения ацетона – 56,24 °С); кубовый остаток – 2 мл светло-желтой эмульсии. Показатель преломления отогнанного ацетона $n_{д}^{20}$ = 1,3591.

В опытах 6 и 7 объемы ДТ и ВАС брались, соответственно, 20 и 10 мл (объемное соотношение ДТ : ВАС = 66,66 : 33,33 %) и 25 и 5 мл (объемное соотношение ДТ : ВАС = 83,33 : 16,66 %). Деление фаз началось через 45 минут: верхняя фаза – желтая мутная эмульсия (опыт 6 – 21,5 мл, опыт 7 – 26 мл); нижняя фаза – прозрачная желтая жидкость с небольшим количеством мелких капель (опыт 6 – 7,5 мл, опыт 7 – 2 мл).

Полученные эмульсии из опытов 1-7 можно использовать в двигателе. Идеальный вариант для приготовления эмульсии – это опыт 1, так как он более прост. Планируется продолжение экспериментов по исследованию стабильности эмульсий.

Применение ВСС дает следующие преимущества для использования в дизельных двигателях:

– улучшение смесеобразования;

– уменьшение теплового напряжения процесса;

– уменьшение закоксовывания топливоподающих систем дизеля (уменьшение количества отложений);

– уменьшение концентрации оксидов азота и сажи;

– большее ЦЧ;

– низкая склонность к дымлению;

– интенсивное выгорание;

– отсутствие сажи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дубовкин, Н.Ф.* Физико-химические и эксплуатационные свойства реактивных топлив / Н.Ф. Дубовкин. – М.: Химия, 1985. – 241 с.

2. *Обельницкий, А.М.* Топливо, смазочные материалы и охлаждающиеся жидкости / А.М. Обельницкий, Е.А. Егорушкина, Ю.Н. Чернявский; под ред. А.М. Обельницкого. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: ИПО «Полигран», 1997. – 272 с.

3. Применение спиртов в бензиновых двигателях и дизелях / В.И. Ерохов, И.В. Одинокова // Научно-техническая конференция ААИ «Автомобиле-тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров», посвященная 145-летию МГТУ «МАМИ».

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ УТИЛИЗАЦИИ СТОКОВ СХЕМЫ УМЯГЧЕНИЯ ВОДЫ

Одоевцева М.В. – канд. техн. наук, доцент филиала МЭИ в г. Волжском
Гаврилина Д.Л. – магистрантка филиала МЭИ в г. Волжском
Скоромная О.С. – выпускница филиала МЭИ в г. Волжском

Из существующих схем водоподготовки с применением ионитных материалов наибольшее распространение получило Na-катионирование [1]. Однако применение Na-катионирования при относительной дешевизне поваренной соли связано с большим сбросом растворимых солей с химводоочистки, поскольку удельный расход NaCI на регенерацию в 2,5-3,5 раза превышает количество удаляемых катионов Ca^{2+} и Mg^{2+} [2]. Важной задачей сейчас является создание установок, работающих по безотходной или малоотходной технологии. По мнению авторов [3], это возможно при уменьшении количества сбрасываемых солей до значений, близких к извлекаемому из обрабатываемой воды; снижении концентрации сбросных вод до уровня, сопоставимого с солесодержанием природной воды.

Создание безотходных водоподготовительных технологий (ВПУ) ведется по двум направлениям: совершенствование схемы водообработки для максимального сокращения жидких стоков и переработка засоленных стоков станций (пром. предприятий). Один из методов утилизации жидких отходов заключается в повторном использовании засоленных стоков после их переработки, другой – в переработке стоков с получением твердых товарных продуктов или твердых отходов для последующей переработки, складирования, захоронения или вывоза. Третье направление заключается в извлечении ценных продуктов из высокоминерализованных стоков с целью их повторного использования в производственном цикле [4]. Эти решения могут быть успешными при условии утилизации концентрированных жидких отходов непосредственно с установок водопользования станций [1]. Задача сокращения отходов станций водоподготовки подразумевает уменьшение как объема сточных вод, так и количества сбрасываемых с ними растворенных солей. Известными опробованными на промышленных

установках методами являются: повторное использование необработанных регенерационных сточных вод; противоточное ионирование; внедрение высокоемких катионитов; рециркуляция фильтрата; повышение температуры регенерационного раствора; применение фильтров непрерывного действия. В процессе регенерации Na-катионитного фильтра первые порции отработанного регенерационного раствора содержат в основном соли жесткости, последние – преимущественно хлорид натрия. Использование для предварительной регенерации последних 50-60 % объема отработанного регенерационного раствора позволит снизить расход NaCI с 2,4-3,0 до 1,7 экв/экв, то есть на 30-40 % [5]. Для двухступенчатых Na-катионитных ВПУ использование отработанного регенерационного раствора фильтров второй ступени для регенерации фильтров первой ступени сокращает сброс солей с установки на 10 % [6]. С ростом температуры интенсифицируются процессы, сопутствующие ионному обмену, и заданная степень регенерации катионита может быть получена при меньших расходах регенерата. При Na-катионировании воды с солесодержанием до 1 г/л повышение температуры регенерационного раствора с 20 до 40 °С позволяет снизить расход соли на 10 % [7].

Наиболее изученные методы повторного использования сточных вод ВПУ основаны на осаждении из сточных вод катионов жесткости с помощью реагентов.

Известно использование [9] способа обработки засоленных вод растворами извести и соды. Исследовано влияние состава известково-содовой смеси на степень умягчения обработанного солевого раствора, что необходимо для разработки технологического оборудования. Положительным эффектом данного метода является интенсивное осаждение кальция и магния, за счет чего происходит снижение общей жесткости воды, наличие которой способствует образованию накипи. Отрицательной чертой является возможное повышение карбонатной жесткости, которая может при pH < 8,35 из ионов CO_3^{2-} переходить в CO_2, вызывая углекислотную коррозию металла. Также, если ионов Ca^{2+} и Mg^{2+} будет большое количество, то необходимо в соответствующем эквивалентном количестве добавлять Na_2CO_3. Другим способом обработки регенератов ионообменных фильтров является применение раствора едкого натра и соды. Наиболее полное умягчение при этом способе наблюдается при соотношении соды и NaOH в растворах осадителях, соответствующем соотношению ионов Ca^{2+} и Mg^{2+} в обрабатываемом растворе, а значение pH смеси должно составлять 11,2-11,9 [10]. Однако недостатками таких способов являются высокая стоимость применяющегося реагента едкого натра и высокие значения pH получаемого раствора, затрудняющие использование на стадии регенерации.

Выявлено, что имеющиеся схемы (применение обратного осмоса, электродиализа, дистилляции, выпаривание стоков) по переработке отработанных регенерационных растворов в силу их технических или технологических недостатков не находят широкого применения на практике. Нереальна в настоящее время и переработка солевых отходов ВПУ в товарные продукты из-за чрезвычайно

сложной технологии селективной кристаллизации. Глубокое выпаривание сточных вод может применяться только в виде редкого исключения при наличии четкой программы утилизации сухих солей и концентратов и избытка бросового [8].

Наибольший интерес вызывает схема очистки засоленных сточных вод [8], сочетающая реагентное умягчение, осветление и мембранное разделение стоков. Мембранный обратноосмотический модуль позволяет максимально сконцентрировать соли и получить минимальный объем концентрата. Фильтрат после него возвращается в основное производство. Концентрат может использоваться в качестве регенерационного раствора для установок умягчения.

Однако внедрение такой технологии в Волгограде и области требует предварительных уточнений и корректировки всех стадий схемы в связи с индивидуальным солевым составом стоков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Высоцкий, С.П.* Применение экологически чистых схем подготовки воды / С.П. Высоцкий // Теплоэнергетика. – 1981. – № 6. – С. 57-60.

2. *Заболотная, Т.А.* Малоотходная технология ионообменного умягчении природных вод: дис. … канд. техн. наук / Т.А. Заболотная. – М., 1989. – 126 с.

3. Современное отечественное водоподготовительное оборудование для обессоливания и умягчения воды на ТЭС / Юрчевский Е.Б. // Теплоэнергетика. – 2002. – № 3. – С. 62-65.

4. *Чичирова, Н.Д.* Электромембранные технологии в энергетике / Н.Д. Чичирова, А.А. Чичиров, Т.Ф. Вафин.

5. О возможных решениях проблемы стоков систем водоподготовки на ТЭС / Мамет А.П., Юрчевский Е.Б. // Теплоэнергетика. – 1996. – № 8. – С. 2-6.

6. Проблемы и некоторые пути экологического совершенствования водопользования на тепловых электростанциях / О.И. Мартынова, А.С. Седлов, Б.С. Федосеев // Теплоэнергетика. – 1995. – № 2. – С. 2-8.

7. *Мамет, А.П.* Технология переработки стоков водоподготовительных установок ТЭС / Мамет А.П., Юрчевский Е.Б. – М: ЦНИИТЭИТЯЖМАШ, 1990.

8. Опыт создания малоотходных систем водопользования. – Режим доступа: http://nst.e-apbe.ru/book/2.2.5.pdf

9. Водоснабжение населенных мест и промышленных предприятий: Справочник проектировщика / Под ред. И.А. Назарова. – М. Стройиздат, 1977. – С. 211.

10. *Заграй, Я.М.* Технология безотходной переработки солевых растворов после регенерации ионообменных фильтров по умягчению воды / Я.М. Заграй, П.И. Довгуша, А.Г. Еременко и др. // Химия и технология воды. – 1979. – № 1. – С. 51-56.

ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЕ ВОДЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ В ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТАХ

Воротнева С.Б. – аспирантка ВолгГТУ
Голованчиков А.Б. – д-р техн. наук, профессор ВолгГТУ

Обеззараживание воды является заключительным и важным этапом водоподготовки. На данный момент существует множество методов, используемых как в бытовых условиях, так и на крупных производствах. Одним из перспективных методов предупреждения обрастания теплообменных поверхностей продуктами жизнедеятельности микроорганизмов является обеззараживание электрическим током.

Разработаны новые конструкции теплообменных аппаратов, обеспечивающие обеззараживание воды и позволяющие интенсифицировать процесс теплопереноса через теплопередающую поверхность за счет подавления жизнедеятельности микроорганизмов и предупреждения заиливания и обрастания продуктами жизнедеятельности микроорганизмов этой поверхности.

На рис. 1 представлен общий вид теплообменного аппарата погружного типа; на рис. 2 – аксонометрический вид кольца со сквозной поперечной прорезью [1].

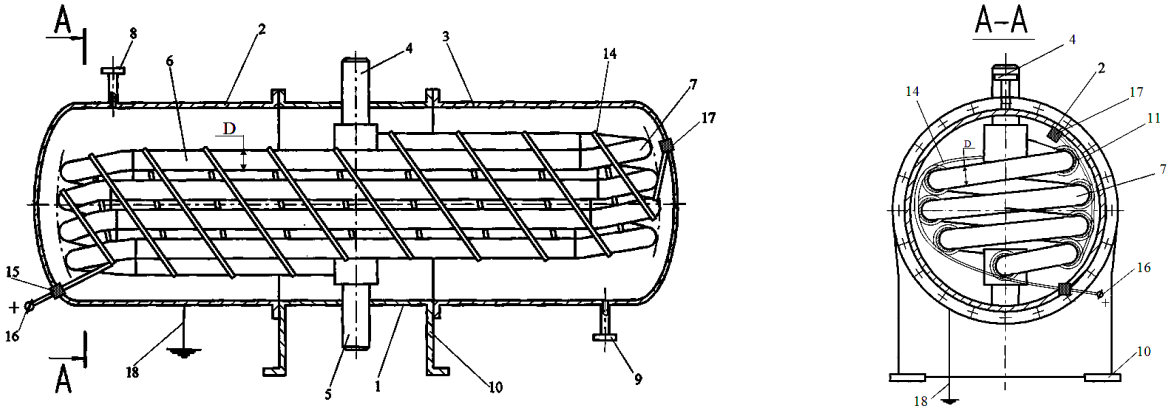


Рис. 1. Теплообменный аппарат погружного типа:
1 – центральная секция; 2, 3 – съемные боковые секции; 4, 5 – патрубки для трубной среды; 6 – трубы; 7 – U-образные отводы; 8, 9 – патрубки для межтрубной среды; 10 – опора; 11 – кольцо; 12 – сквозная поперечная прорезь; 13 – цилиндрическая канавка; 14 – электрический провод; 15 – диэлектрическая пробка; 16 – положительный полюс источника постоянного тока; 17 – изолятор; 18 – заземление

Теплообменный аппарат погружного типа работает следующим образом. От положительного полюса источника постоянного тока 16 на электрический провод 14 подают потенциал того же знака. По патрубку 4 подают трубную среду, которая движется в трубах 6 и U-образных отводах 7 и выводится через патрубок 5. Одновременно в патрубок 8 подают межтрубную среду, например охлаждающую воду, которая омывает теплопередающие наружные поверхности труб 6 и U-образных отводов 7 и выводится наружу по патрубку 9. Так как

охлаждающая вода является проводником II-го рода, то под действием разности потенциалов между электрическим проводом 14 и боковыми поверхностями труб 6 и U-образных отводов 7 протекает электрический ток, который подавляет жизнедеятельность микроорганизмов, находящихся в воде, и предотвращает заиливание или обрастание теплопередающих наружных поверхностей труб 6 и U-образных отводов 7 продуктами жизнедеятельности этих микроорганизмов, что препятствует росту термического сопротивления и увеличивает интенсивность теплопереноса. Кроме того, так как трубы 6 и U-образные отводы 7 вместе с секциями 1, 2 и 3 кожуха соединены с заземлением 18, то они не подвержены электрохимической коррозии, что также не позволяет увеличивать термическое сопротивление теплопередающей поверхности труб 6 и U-образных отводов 7 и снижать интенсивность теплопереноса [1].

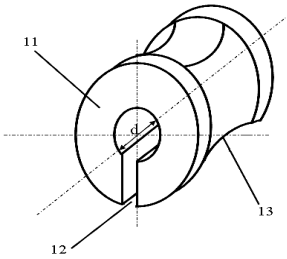


Рис. 2. Аксонометрический вид кольца со сквозной поперечной прорезью

Предлагаемая конструкция теплообменного аппарата погружного типа при невысоких энергозатратах постоянного тока предотвращает обрастание и заиливание теплопередающих наружных поверхностей труб и U-образных отводов, что позволяет сохранять невысокое термическое сопротивление и высокую степень теплопереноса. Также данная конструкция позволяет решить проблему периодической остановки работы для удаления ила и продуктов жизнедеятельности микроорганизмов с теплопередающих поверхностей, что увеличивает срок службы и производительность теплообменного аппарата погружного типа.

На рис. 3 показан общий вид кожухотрубного теплообменника; на рис. 4 – поперечный разрез по А-А и поперечный разрез перегородки по Б-Б.

Особенность данной конструкции кожухотрубного теплообменника заключается в том, что поверхности отверстий для труб и торцовая поверхность в каждой перегородке покрыты электроизоляционным материалом, а смежные перегородки подключены к противоположным полюсам источника постоянного тока, и кожух теплообменника заземлен [2].

Кожухотрубный теплообменник работает следующим образом. Вода поступает и выходит через штуцеры 6 для межтрубного пространства, а рабочая среда поступает и выходит через штуцеры 7. Перегородки 5 с сегментными вырезами, установленные в кожухе 3, направляют поток воды, который несколько раз меняет свое направление. На клеммы 15 смежных перегородок 5 подают напряжение от противоположных полюсов источника постоянного тока; так как вода в межтрубном пространстве является проводником II-го рода, то между смежными перегородками 5 по воде идет ток, который приводит к подавлению жизнедеятельности микроорганизмов и препятствует образованию

биопленки на внешней поверхности труб 4, что интенсифицирует теплоотдачу от их внешней поверхности к воде.

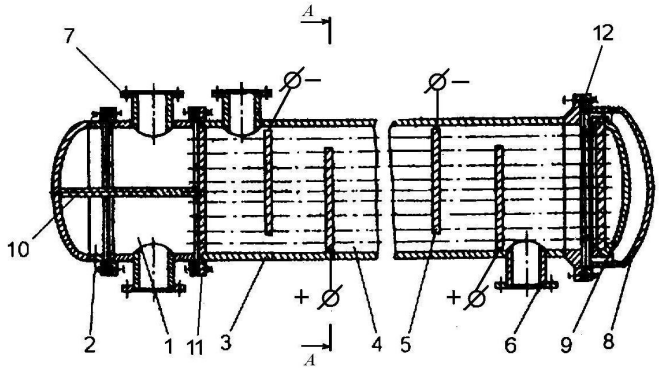


Рис. 3. Общий вид кожухотрубного теплообменника:
1 – распределительная камера; 2, 8, 9 – крышки; 3 – кожух; 4 – теплообменные трубы; 5 – перегородки с сегментными вырезами; 6 – штуцер для межтрубного пространства; 7 – штуцер для трубного пространства; 10 – перегородка; 11, 12 – трубные решетки; 13 – гильзы; 14 – резиновый шланг; 15 – клемма

Так как стенки труб 4 отделены от отверстий в перегородках 5, в которых трубы 4 смонтированы, электроизоляционным материалом в виде гильз 13, то утечки тока по трубам 4 не происходит. А покрытие торцевой поверхности перегородок 5 электроизоляционным материалом в виде ее окантовки резиновым шлангом 14 также предупреждает утечку тока на кожух. Поэтому затраты электрической энергии, идущей на обеззараживание воды от микрофлоры, будут незначительными [2]. Кроме того, предупреждение обрастания наружной поверхности труб биопленкой увеличивает время стабильной работы кожухотрубного теплообменника, а в период ремонта – уменьшает трудозатраты, которые бывают особенно большими и сложными при очистке наружной поверхности труб.

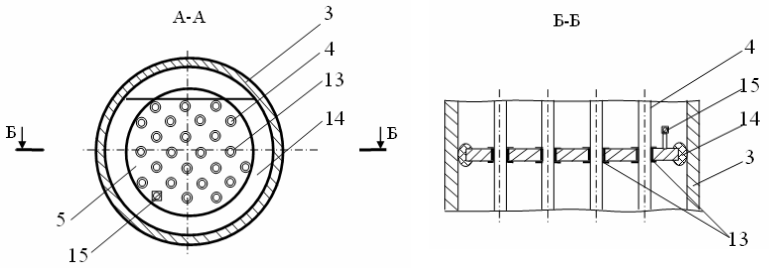


Рис. 4. Поперечный разрез по А-А и поперечный разрез перегородки по Б-Б

Таким образом, предлагаемые конструкции теплообменных аппаратов для обеззараживания воды электрическим током позволяют интенсифицировать процесс теплопереноса и могут найти применение в химической, нефтехимической, металлургической, энергетической, машиностроительной, атомной и других отраслях промышленности, а также в экологических процессах энерго- и ресурсосбережения при утилизации тепла сточных вод и дымовых газов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полезная модель 130057 РФ, МПК F28D7/02. Теплообменный аппарат погружного типа / А.Б. Голованчиков, С.Б. Воротнева, Н.О. Сиволобова, Д.С. Мурзенков, Л.В. Кетат, Т.Ю. Тарабрин; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Волгоградский государственный технический университет». – № 2013103900/06; заявл. 29.01.13; опубл. 10.07.13.

2. Полезная модель 124376 РФ, МПК F28D7/00. Кожухотрубный теплообменник / А.Б. Голованчиков, С.Б. Воротнева, Н.О. Сиволобова, Н.А. Дулькина, Д.С. Мурзенков; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Волгоградский государственный технический университет». – № 2012129448/06; заявл. 11.07.12; опубл. 20.01.13.

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ВОДОПОДГОТОВКИ НА ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ

Гончарова Л.К. – канд. хим. наук, профессор
филиала МЭИ в г. Волжском
Тарынина А.Э. – магистрантка
филиала МЭИ в г. Волжском
Гончаров Ю.А. – канд. хим. наук, доцент
филиала МЭИ в г. Волжском

В последнее десятилетие отечественная энергетика вошла в период реформирования. Наряду с вводом новых энергоблоков часто на основе парогазовых установок происходит восстановление и техническое совершенствование давно действующих агрегатов тепловых электростанций (ТЭС). На таких ТЭС реконструкции требовали водоподготовительные установки (ВПУ), прежде работавшие в большинстве по технологии химического обессоливания.

На новых ВПУ внедряются противоточные технологии ионного обмена, включаются установки ультрафильтрации (УФ) или обратного осмоса (УОО) с финишной доочисткой на ионитных фильтрах или электродеионизацией. Примерами являются ВПУ ТЭЦ-12 и ТЭЦ-23 «Мосэнерго», ТЭЦ ОАО «Северсталь», Владимирской и Нижнее-Камской ТЭЦ, Заинской ГРЭС, Калининской АЭС. Таким образом, реализуется концепция технического перевооружения ВПУ, заложенная в конце XX – начале XXI вв. в России [1].

Анализ литературных источников [2-5] показывает, что предложения по совершенствованию технологии обессоливания вод на ТЭС можно подразделить на следующие группы:

1) оптимизация действующих установок ионообменного химического обессоливания, направленная на сокращение расхода реагентов и снижение объемов стоков (с применением в основном отечественных фильтрующих материалов, ионитов и инертов);

2) разработка схем обессоливания на основе противоточных технологий («Schwebebett», «Amberpack», «UPCORE» и другие);

3) разработка схем обессоливания на основе сочетания мембранных и ионообменных методов обработки воды (комбинированной очистки воды);

4) создание малоотходных технологий на основе термического метода.

Реализация названных направлений совершенствования водоподготовки на ТЭС в начале XXI в. привела к созданию ряда новых технологических систем [2].

Один из вариантов оптимизации группы 1 предусматривает при традиционной предочистке двухслойную загрузку механических фильтров гидроантрацитом и кварцевым песком, что приводит к увеличению фильтроцикла в 3-4 раза и сокращению собственных нужд ВПУ до 1-1,5 %, а для защиты катионита в Н-1 фильтре от загрязнения взвешенными веществами и железом фильтр дополнительно загружается сополимером и инертом [6].

Для технологических схем группы 2 нужна хорошая предочистка, противоточные фильтры, моносферные ионообменные смолы с высокой механической прочностью и инертный материал. Противоточные фильтры выпускает Таганрогское АО «Красный котельщик», моносферные иониты и инерты выпускают все ведущие фирмы, а в России ООО «ПО Токем» выпускает сополимер стирола и дивинилбензола и моносферные катионит Токем-140 и анионит Токем-860.

В схемах группы 3 сохраняется обычная предочистка или механическое фильтрование заменяется УФ, далее осветлённая вода подаётся в УОО, а затем пермеат проходит дообессоливание на Н- и ОН-ионитных фильтрах, ФСД или электродеионизацией.

Опыт эксплуатации таких установок в России в последнее десятилетие показал, что при реконструкции ВПУ с ионитным обессоливанием желательно параллельно с установкой обратного осмоса оставлять первую ступень Н-, ОН-ионирования. Это повышает маневренность установки при гарантированном качестве частично обессоленной воды.

Схемы группы 4 включают предочистку, противоточное натрий-катионирование, деаэрацию и дистилляцию в испарительных установках [7].

Выбор того или иного варианта обессоливания должен основываться на технико-экономических расчетах, учитывающих фактические условия эксплуатации ВПУ и включающих плату за исходную воду и сбросы сточных вод. Такие расчёты, выполненные рядом организаций [3], показывают, что при небольшой минерализации природных вод, суммарном содержании в них хлорид- и сульфат-ионов не превышающем 2-3 мг-экв/дм^3 и высокой производительности ВПУ наиболее экономичным является метод ионообменного химического обессоливания [2].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Опыт освоения новых технологий обработки воды на ТЭС / Б.М. Ларин // Теплоэнергетика. – 2010. – № 8. – С. 62-78.

2. Опыт совершенствования технологий обессоливания воды на ТЭС / Б.М. Ларин, А.Б. Ларин, А.С. Седлов // Энергетические станции. – 2010. – № 10. – С. 13-21.

3. Стратегия защиты водоёмов от сброса сточных вод ТЭС АО «Мосэнерго» / Н.И. Серебряников, Г.В. Преснов и др. // Теплоэнергетика. – 1998. – № 7. – С. 2-6.

4. Современное состояние водоподготовительных установок и водно-химических режимов ТЭС / Б.С. Федосеев //Теплоэнергетика. – 2000. – № 7. – С. 2-9.

5. Перспективы использования мембранных технологий водоподготовки для предотвращения загрязнения пароводяных трактов ТЭС органическими примесями природной воды / Е.Б. Юрчевский, А.Г. Первов, А.П. Андрианов // Теплоэнергетика. – 2006. – № 8. – С. 2-9.

6. Существующее положение и возможности реконструкции ХВО в условиях финансового кризиса / И.С. Балаев, Г.Г. Кучма // Энергосбережение и водоподготовка. – 2010. – № 1. – С. 12-16.

7. Снижение отходов при производстве химически очищенной и обессоленной воды / Ю.В. Солодянникова, В.В. Васильев // Энергосбережение и водоподготовка. – 2010. – № 4. – С. 8-12.

ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ УСТАНОВКИ ОБРАТНОГО ОСМОСА НА ВОЛГОГРАДСКОЙ ТЭЦ-2

Купцова И.Г. – начальник ХЦ
ПугачёвА.С. – старший мастер
ООО «ЛУКОЙЛ-Волгоградэнерго» Волгоградская ТЭЦ-2

Сравнение эффективности обратноосмотических и ионообменной схем обессоливающих установок производилось по нескольким основным показателям:

– собственные нужды обессоливающей установки;
– удельный расход исходной воды на обессоливающую установку;
– количество регенераций каждого фильтра;
– расходы реагентов на регенерацию фильтров и мембранной установки.

Собственные нужды обессоливающей установки на ООО «ЛУКОЙЛ-Волгоградэнерго» Волгоградская ТЭЦ-2 в сутки представлены в табл. 1.

Таблица 1

Собственные нужды сравниваемых схем обессоливания

Год	Количество выработанной обессоленной воды, м^3	Собственные нужды обессоливающей установки, м^3	Собственные нужды по ионитной части, м^3	Собственные нужды УОО в год, м^3
2008	2 053 276	267 901		
2012	1 902 534	277 229	86 951	190 278

Таким образом, при сравнении расходов воды на собственные нужды в 2008 и 2012 году видно, что расход воды на собственные нужды несколько возрастает в связи с пуском в работу УОО.

Расходы реагентов на регенерацию фильтров обессоливающей установки и УОО представлены в табл. 2.

Суммарное количество реагентов, потраченных на обессоливающую установку в 2008 году, составляет

1 020 +788 = 1 808 т на общую сумму 18 млн. руб.

При работе обессоливающей установки в 2012 году (включая УОО):

60 +9 + 6,5 + 15 = 90,5 т и 3 100 шт. ФЭЛов на общую сумму 12 млн. руб.

Таблица 2

Расходы реагентов на регенерацию фильтров обессоливающей установки и УОО

Реагент	2008 год	Обессоливающая установка, 2012 г.	Установка обратного осмоса, 2012 г.
Серная кислота, т	1 020,0	392,0	60,0
Лимонная кислота, т	–	–	9,0
Натр едкий, т	788,0	343,0	–
Трилон «Б», т	–	–	6,5
Аминат «К», т	–	–	15,0
Сменные фильтрующие элементы ЭФГ, шт.	–	–	3 100,0

Таким образом, расходование реагентов на обессоливающую установку в 2008 году в 1,5 раза больше, чем при работе ОУ в 2012 году.

Количество регенераций на обессоливающей установке представлено в табл. 3.

Из таблицы видно, что количество регенераций фильтров Н-ОН первой ступени в связи с включением в схему УОО на выработку данного количества воды снизилось в 3,7 раз, и фильтроцикл фильтров Н-ОН второй ступени увеличился в 1,4 раза из-за улучшения качества частично-обессоленной воды.

Таблица 3

Количество регенераций каждого фильтра в год

Год	Н-катионитные фильтры		ОН-анионитные фильтры	
	Н-I	ОН-I	Н-II	ОН-II
2008	1009	489	42	82
2012	245	123	25	65

По данным работы обратноосмотической мембраны имеем количество промывок каждой ступени в год (табл. 4).

Таблица 4

Количество промывок каждой ступени в год

Год	УОО	
	I ступень	II ступень
2012	24	24

Общее количество воды на промывку блоков – 580 м^3 в год.

Расходы на замену фильтрующего материала

Для замены фильтрующего материала фильтров Н-ОН первой ступени (так как срок эксплуатации смолы истёк) необходимо затратить 25 млн. руб., для замены всех мембран (480 шт.) 10 блоков УОО потребуется 12 млн. руб.

Проблемы установки обратного осмоса:

– качество концентрата. В связи с тем, что существует программа прекращения сбросов в озеро Сарпа и перевода сточных вод на очистные сооружения ОАО «Каустик», есть проблема с предельно допустимыми концентрациями стоков. По трём показателям идёт превышение норм качества, а именно по сухому остатку, азоту нитритов и сульфатам, а три показателя качества (кальций, магний, натрий) не включены в общий перечень;

– качество осветлённой воды, подаваемой на установку. Из-за проскоков мутности (выноса взвешенных веществ) происходит забивание мембран блоков, что требует дополнительной промывки мембран блоков и частой замены фильтров тонкой очистки на предфильтрах;

– коррозия оснований высоконапорных насосов (разъедание кислой средой). Так как для корректировки значения pH перед высоконапорными насосами организован ввод серной кислоты насосами-дозаторами, при отключении блоков в резерв или ремонт происходит застой кислой среды, что приводит к коррозии;

– форсированный пуск блока, который приводит к течи блоков.

МЕТОД СВЕРХГЛУБОКОЙ ОЧИСТКИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ КАК СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ ЭНЕРГООБЪЕКТОВ РОССИИ

Курочкин А.С. – канд. техн. наук, руководитель проекта
ООО «Центр молекулярных технологий», г. Кемерово
Курочкин С.А. – аспирант КемТИПП, г. Кемерово
Суббота С.А. – директор Ставропольского филиала
ООО «Центр молекулярных технологий», г. Кемерово
Осадчий В.Л. – канд. хим. наук, гл. технолог
ООО «Центр молекулярных технологий», г. Кемерово

На сегодняшний день в Российской энергетике сложилась сложная ситуация, обусловленная несколькими факторами: сильный износ основных мощностей, моральное устаревание основной части оборудования, недостаточное финансирование инвестиционных планов предприятий, направленных на поддержание и обновление производственных мощностей. Это, на взгляд авторов, основные факторы большой ресурсоемкости и, как следствие, низкой эффективности производства электрической энергии на территории РФ. Целью данной работы является способствование выходу российской энергетики на более эффективный способ управления активами и процессом генерации энергии. Одним из инструментов повышения эффективности генерации и использования энергии

является уменьшение количества ресурсов, затрачиваемого на ее производство, при одновременном сохранении и даже увеличении объемов генерации. Очевидно также, что необходимо внедрять новые технологии для поддержания технической конкурентоспособности российской энергетики. Одновременно необходимо обеспечивать надежность энергоснабжения потребителей. Для этого требуется контролировать бесперебойность функционирования объектов энергетики, которая должна обеспечиваться поддержанием основного оборудования в хорошем состоянии и постоянным контролем его работы.

Одним из ресурсов, используемых в процессе генерации и распределения, является масло. Квалифицирование масла как ресурса обусловлено необходимостью периодического его обновления в силу объективного процесса загрязнения.

Турбинное масло, находящееся в эксплуатации, представляет собой многокомпонентную среду, и благодаря обработке внешним полем происходят изменения в её структуре:

– рабочая жидкость (турбинное масло) после обработки электростатическими полями сложной конфигурации начинает выполнять роль промывочной жидкости и способствует очистке внутренних поверхностей маслонаполненного оборудования; при этом достигается 6-7 класс промышленной чистоты по ГОСТ 17216-01;

– разрушаются молекулярные ассоциации поверхностно-активных веществ (мицеллы), что способствует росту числа их мономеров (в одиночном состоянии) в базовом масле, а, следовательно, вероятность их адсорбции на поверхностях продуктов износа и трения увеличивается;

– на продуктах износа и частицах загрязнений металлического происхождения образуются локальные поля за счет индуцирования электрических зарядов. Под воздействием локальных полей на частицах продуктов износа и частицах загрязнений металлического происхождения интенсифицируется адсорбция молекул поверхностно-активных веществ. Благодаря взаимодействию молекул поверхностно-активных веществ между собой и действию локального поля на их поверхностях формируются полимолекулярные образования, и продукты износа играют роль концентратора молекул ПАВ, а впоследствии и переносчика их на поверхности трения;

– благодаря росту числа молекул поверхностно-активных веществ, находящихся в виде мономеров, вязкость РЖ увеличивается, так как образуется непосредственная связь на молекулярном уровне между молекулами поверхностно-активных веществ и базового масла;

– за счет роста локальной концентрации молекул ПАВ непосредственно на поверхностях трения и роста их числа в виде мономеров происходит рост толщины и степени «упакованности» смазочного слоя, а следовательно, увеличения несущей способности, что позволяет снизить износ трущихся поверхностей.

ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ МЕМБРАННОЙ ВОДОПОДГОТОВИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Муртазинов Р.Р. – ассистент филиала МЭИ в г. Волжском

Использование мембранных методов подготовки воды является одним из популярных направлений водоподготовки в энергетике на сегодняшний день. Это связано с тем, что использование таких методов позволяет сократить количество потребляемых реагентов по сравнению с традиционными методами водоподготовки. Экономическая целесообразность применения этих методов помимо прочих факторов [1-2] зависит и от эффективности технологических решений в области их реализации в каждом конкретном случае.

В качестве примера рассмотрим действующую схему ВПУ, реализованную на одном из энергетических объектов Российской Федерации (рисунок).

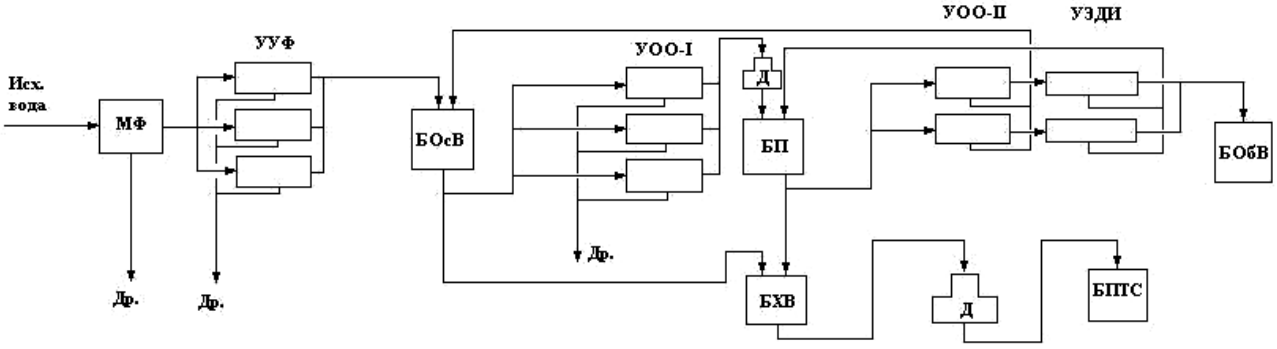


Рисунок. Технологическая схема водоподготовительной установки

В качестве исходной воды для ВПУ используется водопроводная вода с химическим составом, удовлетворяющим требованиям к качеству «вода питьевая».

Исходная вода с температурой 20-25 °С подается на первую ступень ВПУ – установку механической фильтрации МФ производительностью 132 м^3/ч, состоящую из шести 4-дюймовых дисковых фильтров, предназначенную для удаления примесей размером более 200 мкм. Промывка каждого фильтра происходит по истечении определенного времени водой, прошедшей очистку на дисковых фильтрах (фильтратом). Промывочные воды механических фильтров удаляются в дренажный коллектор.

Из дисковых фильтров вода поступает на установку ультрафильтрации (УУФ) производительностью 102 м^3/ч, состоящую из трех блоков, предназначенную для очистки исходной воды от взвешенных частиц, микроорганизмов и органических соединений. Для повышения эффективности очистки (промывки) мембран в промывочную воду дозируют гипохлорит натрия и едкий натр. Сброс промывочной воды предусмотрен как в канализацию, так и в бак-нейтрализатор.

Осветленная вода с УУФ собирается в три параллельно работающих бака осветленной воды (БОсВ) объемом 14,5 $м^3$ каждый.

Из БОсВ осветленная вода насосами подачи осветленной воды подается в бак химически очищенной воды (БХВ) на подпитку теплосети. Также из БОсВ осветленная вода подается на вход установки обратного осмоса первой ступени (УОО-I) производительностью 54 $м^3$/ч, состоящей из трех блоков и предназначенной для получения частично-обессоленной воды.

Для предотвращения осадкообразования на обратноосмотических мембранных элементах и связывания свободного остаточного хлора в поток осветленной воды, идущей на УОО-I, дозируется антискалант и бисульфит натрия.

Периодически, 1-4 раза в год, для повышения эффективности эксплуатации мембранных элементов проводят их химическую очистку (обработку мембранных элементов моющими средствами) с целью удаления накопившихся за время эксплуатации отложений, с помощью кислотного и щелочного реагентов.

После УОО-I частично обессоленная вода проходит через декарбонизатор и поступает в два параллельно работающих бака пермеата (БП) объемом 14,5 $м^3$ каждый. Концентрат установки обратного осмоса первой ступени собирается в общий коллектор и сливается в дренаж.

Из БП частично обессоленная вода подается в БХВ на подпитку теплосети, а также на установку обратного осмоса второй ступени (УОО-II) производительностью 36 $м^3$/ч, состоящую из двух блоков. Для поддержания значения pH в диапазоне 8,2-8,6 на входе в УОО-II в поток воды дозируется раствор щелочи (едкий натр).

Оборудование УОО-II также подвергается химической мойке кислым и щелочным растворами. Концентрат с установки обратного осмоса второй ступени возвращается в баки осветленных вод на повторное использование.

После УОО-II вода поступает на стадию электродеионизации, состоящую из двух установок (УЭДИ), по одной для каждого блока установки обратного осмоса второй ступени соответственно, производительностью 15 $м^3$/ч каждая.

Узел УОО-II и УЭДИ предназначен для получения обессоленной воды требуемого качества. Обессоленная вода после УЭДИ собирается в двух баках обессоленной воды объемом 25 $м^3$ каждый.

Из баков обессоленной воды вода подается в бак запаса конденсата или сбрасывается в бак пермеата для обеспечения циркуляции обессоленной воды и сохранения ее качественных показателей.

Таким образом, данное технологическое решение помимо организации подготовки воды для подпитки котлов-утилизаторов предполагает обеспечение подпиточной водой теплосети за счет смешения осветленной воды после УУФ с частично обессоленной водой после УОО-I в определенном проектом соотношении.

Однако в ходе эксплуатации данной схемы водоподготовки на конкретном производственном объекте возникли некоторые проблемы в работе блока подпитки теплосети. На пластинках охладителя слива с деаэратора образовались

отложения. Отложения также наблюдались и на теплонапряженных поверхностях самого деаэратора. Примерное время образования отложений – трое суток.

Результаты количественного химического анализа отражены в таблице.

Таблица

Результаты количественного химического анализа отложений

Определяемый показатель	Количество, %
CaO + MgO	49,93
Fe_2O_3	1,42
Потери при прокаливании	42,43
Сумма	93,78

Результаты анализа показывают, что отложения состоят в основном из карбоната кальция.

Для предотвращения образования отложений было принято решение отказаться от проектной схемы смешения осветленной воды после УУФ с частично обессоленной водой после УОО-I и ограничиться подачей в деаэратор подпитки теплосети только частично обессоленной воды после УОО-I.

Вышеупомянутые изменения в схеме эксплуатации водоподготовительной установки привели к некоторым негативным последствиям, а именно:

– увеличилась нагрузка на УУФ и УОО-I, то есть увеличился объем потребляемой исходной воды при той же производительности ВПУ;

– увеличились удельные расходы реагентов на предотвращение отложений и регенерацию мембран;

– возросла себестоимость 1м^3 химически обессоленной воды;

– увеличился объем сточных вод при той же производительности ВПУ;

– уменьшилась экономическая эффективность установки ВПУ.

Помимо всего прочего, увеличение нагрузки на УОО-I привело к снижению запаса производительности этого блока, что не может не сказаться на надежности работы установки в целом в период ее максимальной загрузки. При номинальном расходе подпиточной воды теплосети и номинальном расходе химически обессоленной воды для подпитки котлов-утилизаторов производительность УОО-I не позволит вырабатывать необходимое количество пермеата.

Предполагаемой причиной образования отложений в деаэраторе и на пластинках охладителя слива стало нарушение технологического режима подготовки подпиточной воды для теплосети. Для обеспечения безнакипного режима работы в сетевых подогревателях проектной организацией предусмотрено регулирование соотношения количества частично обессоленной и осветленной воды в соответствии с требованиями ПТЭ при температуре нагрева сетевой воды 101-120 °С и pH подпиточной воды теплосети 8,3-9,5 [3].

Однако необходимо обратить внимание на то, что высокая температура пара для деаэрации (t = 212 °С), подаваемого в деаэратор атмосферного типа в рабочем режиме с расходом подпиточной воды менее 30 % от расчетного,

приводит к увеличению температуры и вскипанию деаэрируемой воды. Нужно учитывать еще тот факт, что значение pH подпиточной воды в деаэраторе возрастает. Все это влечет изменение требований к нормативному значению карбонатного индекса при нагреве подпиточной воды в подогревателях. Следовательно, соотношение количества частично обессоленной и осветленной воды должно быть рассчитано и поддерживаться с учетом не только температуры, pH, но и с учетом фактического расхода подпиточной воды.

Решением возникшей проблемы снижения экономической эффективности ВПУ могут стать следующие мероприятия:

– разработка и реализация режимной карты регулирования соотношения количества частично обессоленной и осветленной воды в соответствии с температурой, pH и расходом подпиточной воды теплосети;

– организация дополнительной стадии подготовки подпиточной воды для теплосети.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проектные решения водоподготовительных установок на основе мембранных технологий / А.А. Пантелеев, Б.Е. Рябчиков, А.В. Жадан и др. / Теплоэнергетика. – 2012. – № 7. – С. 30-36.

2. Анализ современных технологий водоподготовки на ТЭС / Е.Н. Бушуев, Н.А. Еремина, А.В. Жадан / Вестник ИГЭУ. – 2013. – № 1. – С. 8-15.

3. СО 153-34.20.501-2003. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации.

ОБУЧАЮЩЕ-КОНТРОЛИРУЮЩАЯ СИСТЕМА ПОДГОТОВКИ СОТРУДНИКОВ ХИМИЧЕСКИХ ЦЕХОВ ТЭС

Одоевцева М.В. – канд. техн. наук, доцент
филиала МЭИ в г. Волжском
Петерс Е.Н., Мазин Г.С. – программисты
филиала МЭИ в г. Волжском
Ракова И.В. – начальник химического цеха Волжской ТЭЦ

Наиболее важной причиной дестабилизации энергетических систем является влияние «человеческого фактора». Качественное улучшение взаимодействия между человеком и машиной может быть достигнуто путем специальной подготовки работника. Одним из путей такой подготовки является обучение персонала на компьютерных тренажерах.

Тренажер – это наиболее наглядный и эффективный способ обучения персонала. Тренажеры предназначены для использования в качестве тренировочных средств вместо имитируемых ими реальных систем [3]. Применение тренажёров – безопасный, экономичный и удобный способ обучения персонала. Кроме того, по сравнению с реальной системой тренажеры позволяют углубить

процесс обучения благодаря расширению спектра формируемых навыков и приёмов. В общем случае тренажеры предназначаются для создания учебной обстановки, которую в противном случае пришлось бы обеспечивать в действующей системе, а также для отработки важных профессиональных навыков, приобретение которых в реальной обстановке достаточно сложно.

Компьютерные тренажеры очень разнообразны и применяются в самых разных областях. Необходимость их применения обусловлена большой сложностью оборудования. Примеры создания и применения таких средств для персонала химических цехов ТЭС ограничены [1]. В этой связи возникает необходимость в создании индивидуальных тренажеров или программных комплексов, представляющих собой необходимый инструментарий для обучения, последующего закрепления знаний путём их применения в различных ситуациях и контроля полученного в результате обучения опыта.

Обучающе-контролирующая система призвана активизировать процесс совершенствования профессиональных знаний и практического опыта специалистов ТЭС. Она состоит из программных продуктов: «Предочистка воды на ТЭС», «Трехступенчатое обессоливание воды с реализацией одинарной регенерации», «Трехступенчатое обессоливание воды с реализацией парной регенерации».

Обучающе-контролирующая система предназначена для формирования навыков при эксплуатации оборудования предочистки и обессоливания воды на ТЭС и закрепления определённого стиля мышления, необходимого для выработки четких быстрых реакций на разнообразные производственные ситуации, возникающие в процессе эксплуатации технологического оборудования, а также для моделирования аварийных ситуаций и поиска путей выхода из них.

Мнемосхемы программных продуктов являются отражением действующих технологических схем химического цеха Волжской ТЭС с учётом особенностей конкретного производства и работы технологического оборудования.

Мнемосхемы состоят из осветлителей, механических фильтров (рис. 1), ионообменных фильтров, блока регенерации, баков осветлённой воды, баков частично обессоленной воды и баков обессоленной воды. Блок регенерации состоит из баков с кислотой и щёлочью, насосов и эжекторов. Обвязка, арматура, баки точно соответствуют технологической схеме (рис. 2).

Программные продукты обучающе-контролирующей системы реализуют специфику всех технологических циклов предочистки и обессоливания воды на ТЭС. Для основных элементов реальных схем разработаны и апробированы математические модели, позволяющие контролировать состояние оборудования. Обеспечена визуализация процесса течения жидкости в трубопроводах (каждой среде на схеме соответствует свой цвет). Это позволяет обучаемому наблюдать за реализацией технологического процесса не только по технологическим показателям, но и по цвету раствора в трубопроводе, по степени заполнения объекта, по направлению течения среды; оценить, ведут ли его действия к аварийной ситуации. Предусмотрено изменение масштаба времени физических процессов, что позволяет сократить время работы на тренажере.

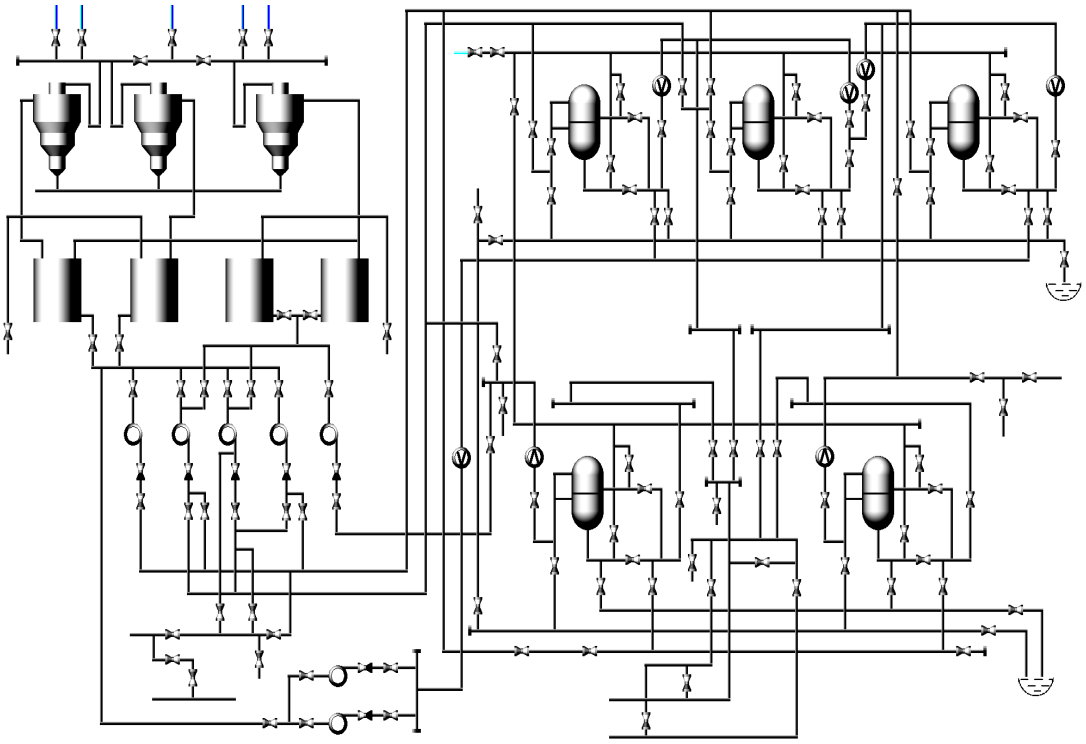


Рис. 1. Схема предочистки воды

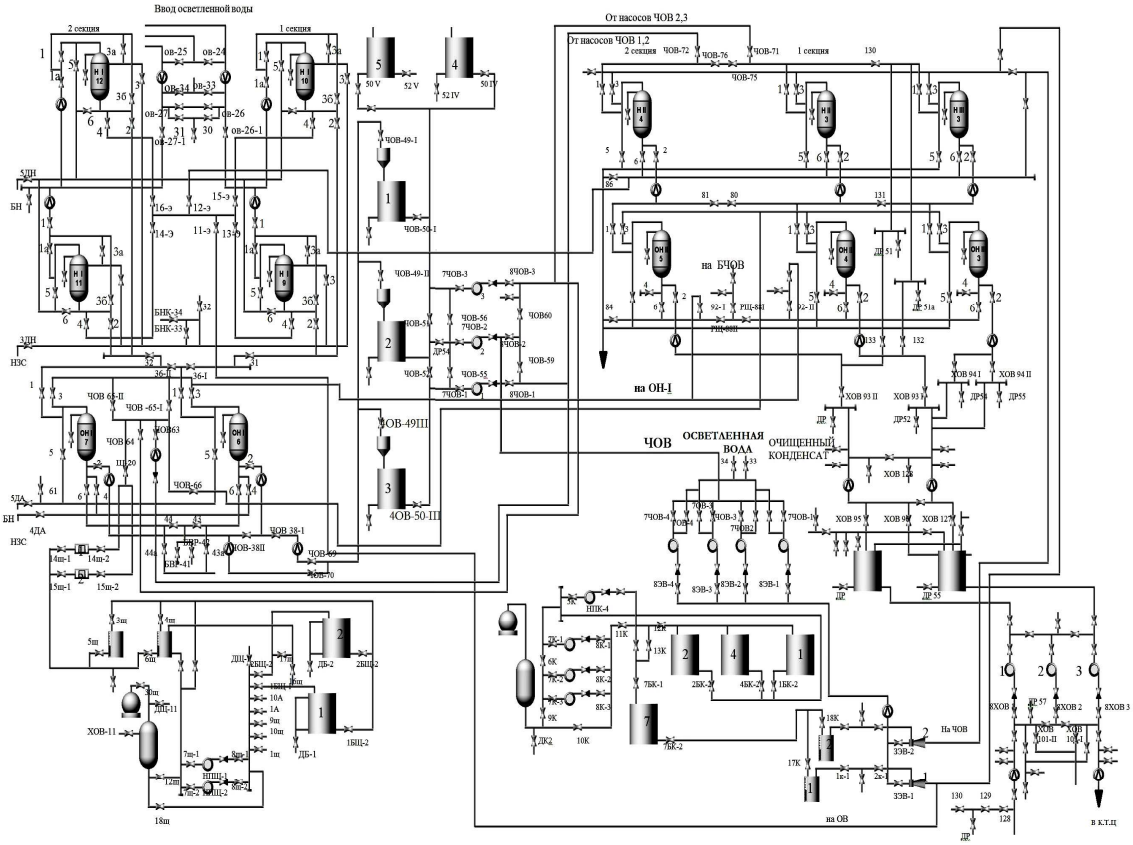


Рис 1.Схема обессоливания воды

Рис. 2. Схема обессоливания воды

Действия обучаемого или тестируемого фиксируются. Во время работы с технологической схемой заполняются файлы отчёта. В них отражается динамика изменения параметров, фиксируются действия, совершённые в процессе работы на тренажере, время реакции обучаемого (тестируемого), выделение неверных действий, приведших к возникновению нештатной или аварийной ситуации, а также указывается путь исправления ситуации и балльная оценка всех действий.

Балльная оценка снижается при действиях, приведших к нарушению или прекращению технологического процесса (потока), несоответствию качества воды (раствора), поданной на единицу оборудования конкретной схемы, нарушению последовательности и времени выполнения операции с элементами оборудования конкретной схемы. Активными являются все основные элементы схем. Управление задвижками (клапанами), насосами происходит путем нажатия на их изображение. При этом они меняют свое состояние (закрыто/открыто). Открытие задвижки приводит к «течению воды в трубопроводе» (если расход в трубе больше нуля) до следующей задвижки. «Течение воды в трубопроводах» контролируется по изменению цвета раствора в них. «Течение воды в трубопроводах» осуществляется только при открытых задвижках и фиксируется по таймеру. При нажатии на единицу оборудования в таблице «Параметры оборудования» указываются параметры, позволяющие контролировать работу оборудования.

Обучающе-контролирующая система используется для обучения оперативного персонала химических цехов ТЭС.

Программные продукты обучающе-контролирующей системы: «Предочистка воды на ТЭС», «Трехступенчатое обессоливание воды с реализацией одинарной регенерации» использовались при проведении практической части VII Конкурса профессионального мастерства рабочих организаций Группы «ЛУКОЙЛ» на звание «Лучший по профессии» (1-2 этапы).

Выводы

Отличительные характеристики разработанной обучающе-контролирующей системы:

1) для основных элементов моделируемых схем разработаны и апробированы математические модели, позволяющие контролировать работу оборудования;

2) компьютерные модели воспроизводят специфику реализации всех технологических циклов схем предочистки и обессоливания воды с учетом задаваемого пользователем ионного состава и расхода воды;

3) все элементы схем, в том числе запорная арматура, насосы, эжекторы являются активными;

4) работа с технологическими схемами или участками схем заканчивается отчётом о работе тестируемого с указанием его действий, совершённых в процессе работы на конкретном тренажере, времени реакции, с выделением неверных действий пользователя, с фиксированием пути исправления ошибок и выставлением балльной оценки;

5) балльная оценка изменяется при:

– несвоевременном прекращении технологического процесса (потока);

– несоответствии качества воды или концентрации раствора, поданного на единицу оборудования конкретной схемы;

– нарушении последовательности и времени выполнения операции с элементами оборудования конкретной схемы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Очков, В.Ф.* Комплекс программ «Энциклопедия химического цеха ТЭС» / В.Ф. Очков, А.С. Копылов, А.П. Пильщиков, М.А. Рахаев, Л.А. Зайцева, А.В. Очков // 2-й международный симпозиум по энергетике, окружающей среде и экономике: сб. трудов. – Казань, 1998. – С. 70.

2. *Рахаев, М.А.* Разработка тренажеров для химических цехов ТЭС и АЭС с целью повышения общестанционных показателей надежности: Автореферат диссертации. – М., 2000.

3. *Салвенди, Г.* Человеческий фактор. Том 3, гл. 12 / Г. Салвенди. Под. ред. Масликова Е.К. // Моделирование деятельности, профессионального обучения и отбор операторов. – «МИР», 1991. – С. 146-199.

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ИНТЕНСИФИКАЦИИ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПЛАСТ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НЕФТЕОТДАЧИ

Фомичёв В.Т. – д-р техн. наук, профессор ВолГАСУ
Поляков С.В. – канд. техн. наук, доцент филиала МЭИ в г. Волжском
Остроухов С.Б. – канд. хим. наук, ведущий научный сотрудник
ЛУКОЙЛ-Инжиниринг «ВолгоградНИПИморнефть»

Взятый курс на повышение ресурсной базы нефтяной промышленности подразумевает под собой, наряду с открытием новых и введением в эксплуатацию ранее разведанных залежей углеводородов, повышение нефтеотдачи старых месторождений. Повышение коэффициента извлечения нефти (КИН) на месторождениях позволит существенно прирастить запасы углеводородов на действующих месторождениях, имеющих готовую инфраструктуру. Это направление является основным, поскольку КИН на большинстве месторождений составляет в среднем 0,3, а на некоторых – не превышает 0,1. Таким образом, основные запасы углеводородного сырья остаются в недрах. В этой связи перед нефтяниками стоит важная задача в интенсификации на продуктивные пласты с целью повышения КИН до 0,6 и более (соответствующего зарубежным нефтяным компаниям).

В настоящее время решение данной проблемы осуществляется в основном традиционными методами, отработанными ещё в период Советского Союза. Но сложность разработки, связанная с геологическими условиями залегания продуктивных отложений, а также с составом флюида и его физико-химическими свойствами, не дает должной отдачи в получении продукции. Поэтому требуются новые технологии, позволяющие более эффективно воздействовать на КИН.

Историю изучения и реализации методов увеличения нефтеотдачи (МУН) можно разделить на несколько этапов. До середины 80-х гг. 20 в. перспективы внедрения МУН представлялись весьма оптимистичными, основная концепция их применения в те годы заключалась в стремлении получить максимальный технологический эффект от их внедрения. Считалось, что высокие коэффициенты вытеснения нефти теплоносителями, химреагентами или различными газами, получаемые в лабораторных условиях на физических моделях, могут обеспечить хороший технологический эффект при испытании этих методов в реальных промысловых условиях. Число действующих проектов по новым технологиям увеличения нефтеотдачи пластов в этот период во всем мире возрастало. Меньше чем за 20 лет, с середины 60-х гг. до 1985 г., число действующих проектов по новым технологиям нефтеотдачи возросло с 120-130 до 800.

Одним из ведущих в настоящее время становится газовый метод. Газовые методы увеличения нефтеотдачи пластов – наиболее динамично развивающиеся технологии, которые стали активно внедряться с начала 80-х гг. Методы вытеснения нефти углеводородным газом и CO_2 и их модификации – наиболее эффективные методы повышения нефтеотдачи пластов для низкопроницаемых коллекторов. Их применение позволяет увеличить коэффициент нефтеизвлечения на 5-17 % по сравнению с традиционными методами разработки нефтяных месторождений. Наиболее широко и коммерчески обоснованно газовые технологии применяются в США, где в настоящее время действует 169 проектов.

Одной из таких технологий является направленное воздействие на пласт активных компонентов, образованных в электрохимической ячейке, расположенной непосредственно в призабойной зоне. Активные компоненты представляют собой как газы, так и жидкие соединения, имеющие активность, необходимую для селективного воздействия на минеральные и органические объекты, лимитирующие нефтеотдачу в пласте. В этой связи электрохимической ячейке отводится главная роль не только в формировании данных агентов, но и в обеспечении достаточного их количества для получения должного отклика от их воздействия.

Производство газовых сред: водорода, кислорода, хлора возможно в электрохимической ячейке при задании определённого режима функционирования. Рассмотрим один из вариантов конструкции электрохимической ячейки (рис. 1), которая может функционировать непосредственно в зоне забоя.

Электрохимическая ячейка состоит из кожуха 1, двух активных металлических элементов: анода 2 и катода 3, изолятора 4, к которым подводится напряжение, и протекающего электролита 5.

Наибольший интерес для повышения нефтеотдачи представляет водород, образующийся в такой ячейке, и хлор, образующийся непосредственно в пластовых условиях при диссоциации пластовой воды. Данный метод необходим для воздействия на карбонатные породы в качестве активного агента. В настоящее время для этих целей используется HCl, подаваемая с поверхности в пласт. Образование хлора непосредственно в пластовых условиях значительно снижает затраты и повышает экологичность процесса.

Проведённые лабораторные исследования воздействия водорода на состав нефтей (особенно тяжёлых) показывают высокие значения нефтеотдачи. В сочетании с другими методами КИН достигал 0,8, а при некоторых режимах и 0,95. Это связано с резким изменением физико-химических свойств нефтей в пластовых условиях, повышающих их движение.

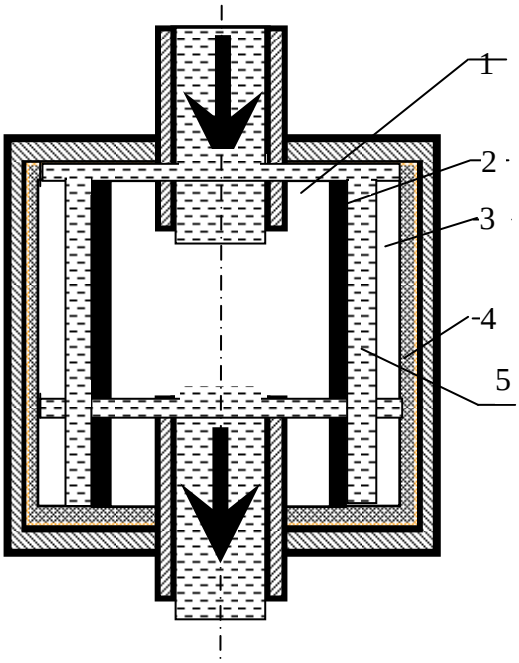


Рис. 1

Все эти технологии обладают направленным воздействием на пласт активными компонентами, образующимися в электрохимической ячейке, расположенной непосредственно в призабойной зоне.

В нефтегазовой промышленности существует ряд разработок, в которых используются электрохимические процессы. В данном случае может быть применена следующая схема организации процесса (рис. 2). В скважину через обсадную трубу 1 подаётся на конце напорной колонны (НКТ) 3 электрохимическая ячейка 2, к которой по кабелю 5 подаётся постоянное напряжение от источника 4. С помощью насоса 6 в пласт закачивается жидкость, являющаяся электролитом, перемещение которой в пласт достигается установкой пакера 7. Электролит, проходя через ячейку, захватывает образующиеся при электролизе газы и доставляет их в пласт.

Характерной чертой электрохимической ячейки является большой ток при малом напряжении. При создании данной ячейки был решен важный вопрос, связанный с доставкой электрической энергии в пласт. Известно, что большие глубины, жёсткие термобарические условия пласта, а также пропускная способность кабеля значительно влияют на мощность подаваемой электрической энергии. Значительные потери мощности существенно сказываются на работе электрохимической ячейки. В этой связи были проведены специальные работы

по значительному повышению электропитания ячейки. Были разработаны оригинальные схемы как подачи энергии с поверхности, так и её генерации непосредственно в зоне пласта. Данные решения защищены патентами РФ [1-3].

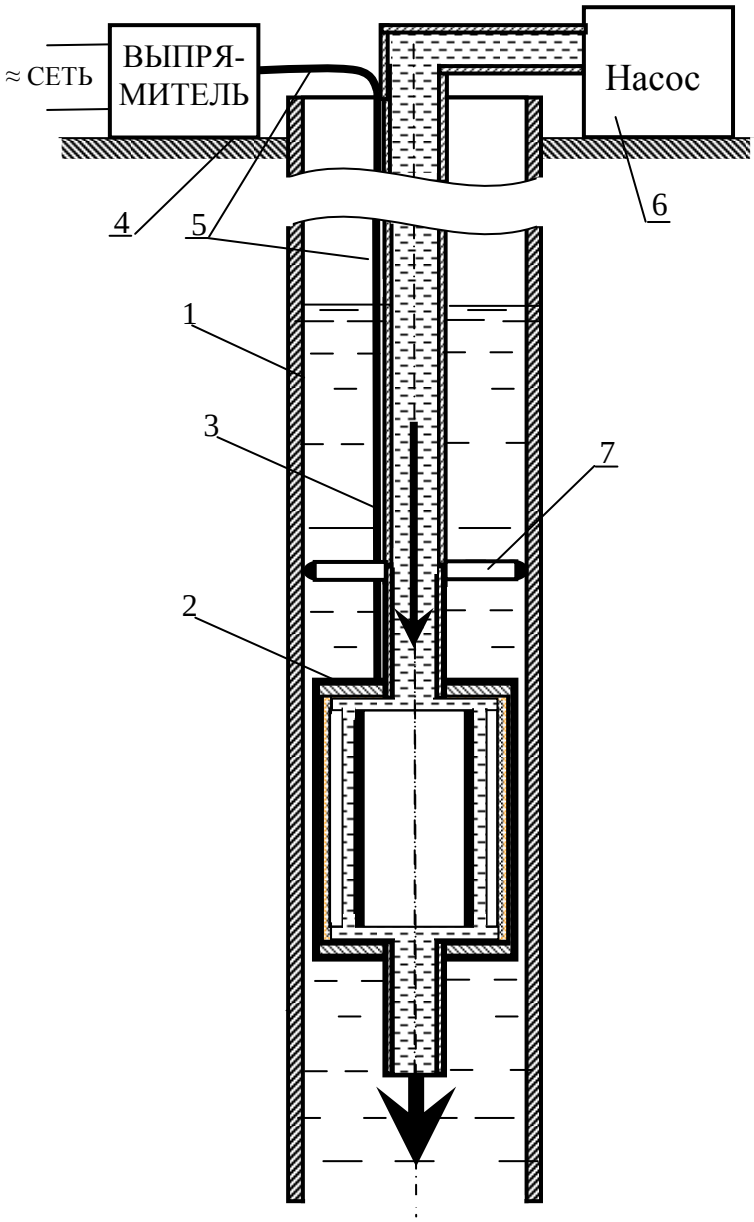


Рис. 2

Реализуя данное методическое и аппаратурное оформление в пластовых условиях, можно существенно воздействовать на пласт с повышением нефтеотдачи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент RU 2227201. Способ разрушения участка трубы в скважине и устройство для его осуществления.

2. Патент RU 2370625. Способ разрушения участка металлической трубы в скважине (варианты).

3. Полезная модель RU 77633. Устройство электрохимического разрушения участка трубы в скважине.

СХЕМНЫЕ РЕШЕНИЯ И СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ ЗАМКНУТЫХ СИСТЕМ ВОДОПОЛЬЗОВАНИЯ НА ОБЪЕКТАХ ЭНЕРГЕТИКИ

Чичирова Н.Д. – д-р хим. наук, профессор
Чичиров А.А. – д-р хим. наук, профессор
Филимонов А.Г. – канд. техн. наук
Гирфанов А.А., Власов С.М. – аспиранты
Казанский государственный энергетический университет

В 2011 году на Казанской ТЭЦ-2 в эксплуатацию введена новая установка химводоочистки (ХВО). Проектная производительность ХВО: 300 м^3/ч – по обессоленной воде для подпитки котлов и 300 м^3/ч – по воде для подпитки теплосети [1].

Источником водоснабжения для ХВО является река Волга. Исходная вода характеризуется повышенной окисляемостью и высокой концентрацией техногенных примесей (нефтепродуктов). В воде присутствуют в превышающих ПДК концентрациях железо и взвешенные вещества.

На основании анализа возможных технологий водоподготовки (метод ионного обмена, термообессоливание и баромембранные методы) для Казанской ТЭЦ-2 принята следующая принципиальная технологическая схема обессоливания: очистка исходной воды от грубодисперсных примесей на сетчатых фильтрах – коагуляция оксихлоридом алюминия – очистка на микрофильтрационной установке – частичное обессоливание на установке обратного осмоса – декарбонизация – глубокое обессоливание воды методом ионного обмена.

Подготовка воды для подпитки теплосети осуществляется по следующей схеме: очистка по схеме, аналогичной подготовке обессоленной воды до установок микрофильтрации – подкисление воды серной кислотой для перевода карбонатной жесткости в некарбонатную – декарбонизация – подщелачивание воды до норм ПТЭ [2].

Структурная схема процесса обработки воды приведена на рис. 1.

С использованием разработанной компьютерной прикладной программы были проведены расчеты равновесного распределения растворимых и нерастворимых комплексов алюминия при моделировании органической фракции мономерными кислотами. На рис. 2 и 3 представлено распределение гидроксокомплексов алюминия в воде в отсутствии органических соединений и при их наличии (моделируются салициловой кислотой). Из представленных данных можно видеть, что в отсутствии органических комплексообразующих веществ (рис. 2) диапазон образования устойчивого осадка гидроокиси алюминия с минимальным содержанием растворимых форм алюминия (3+) составляет 6,0-6,9 единиц pH. Это находится в полном соответствии с литературными данными и рекомендациями по ведению предочистки солями алюминия. При более низких значениях pH (менее 6,0) образуются растворимые гидроксокомплексы алюминия $Al(OH)_2^+$ и $Al(OH)^{2+}$, а также негидратированные ионы алюминия.

При pH более 6,8 образуются растворимые гидроксокомплексы $Al(OH)_4^-$, которые снижают степень осаждения алюминия. При pH выше 8,2 осаждение гидроксида алюминия прекращается [3-4].

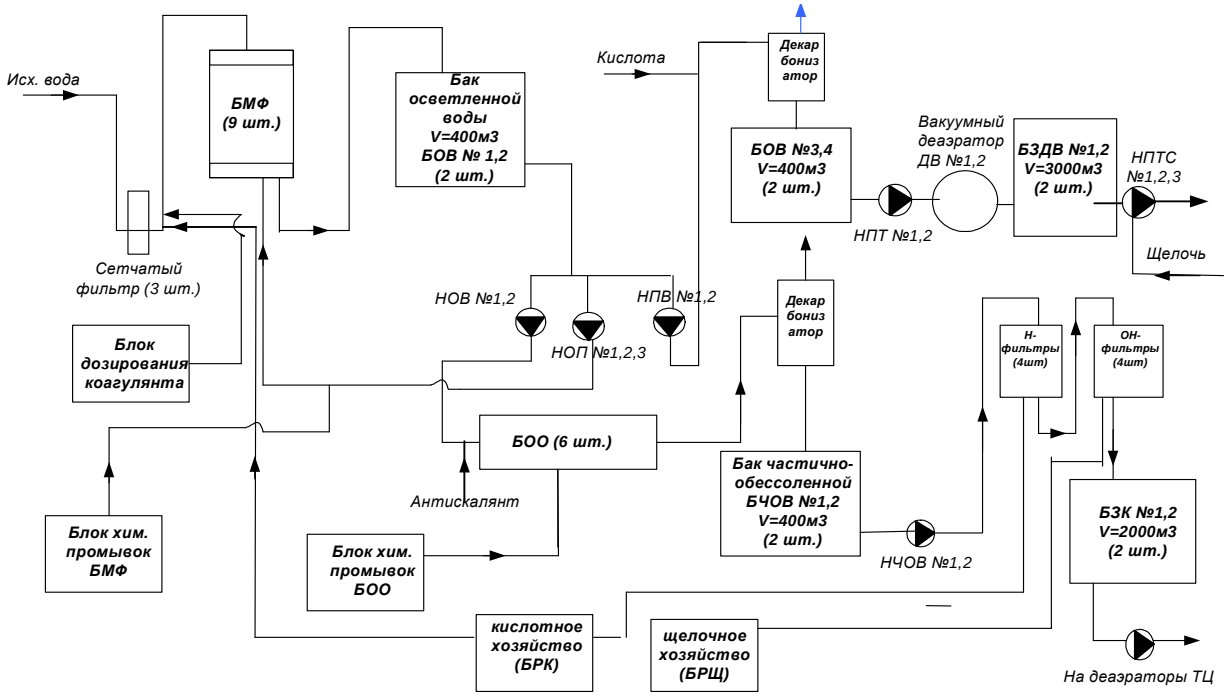


Рис. 1. Принципиальная схема подготовки воды на Казанской ТЭЦ-2

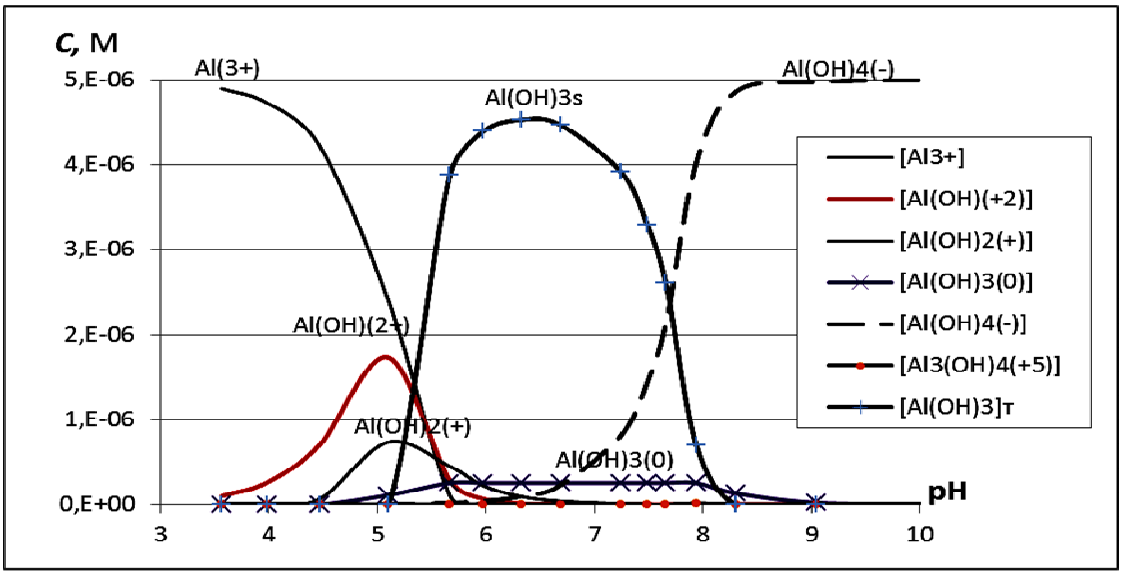


Рис. 2. Диаграмма распределения равновесных растворимых и нерастворимых форм алюминия (3+) в водном растворе в отсутствии органических примесей. Общая концентрация алюминия – $5 \cdot 10^{-6}$ М. Изменение pH достигается введением HCl и NaOH

В присутствии комплексообразующих органических субстратов характер распределения существенно меняется (рис. 3). Диапазон устойчивого образования

осадка гидроокиси алюминия сильно сужается и составляет 6,5-6,8 единиц pH. При более низких значения pH образуются растворимые комплексы алюминия с органическими субстратами, при pH более 6,8 – растворимые гидроксокомплексы $Al(OH)_4^-$.

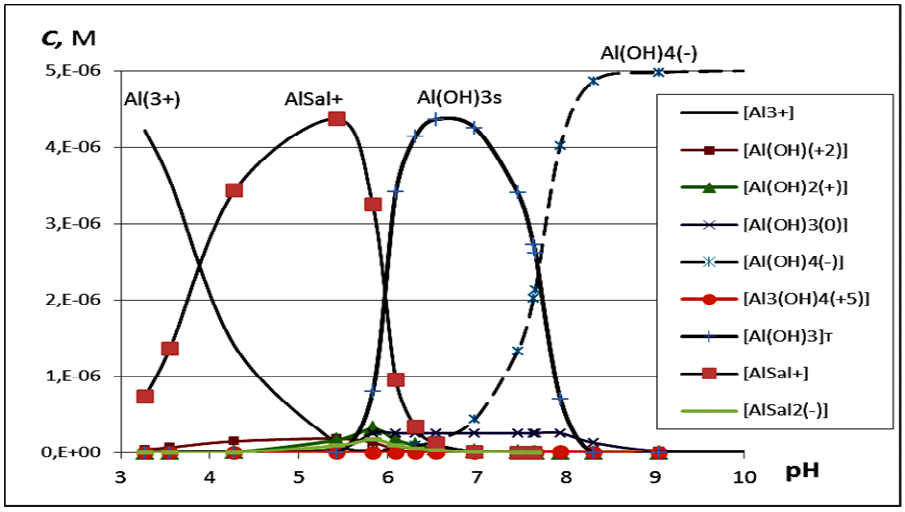


Рис. 3. Диаграмма распределения равновесных растворимых и нерастворимых форм алюминия (3+) в водном растворе с добавлением 0,1 ммоль/л салициловой кислоты. Общая концентрация алюминия – $5 \cdot 10^{-6}$ M

Были проведены расчеты по моделированию процесса коагуляции волжской воды с входными параметрами в виде реального состава воды и дозы коагулянта. Волжская вода в период паводка в мае 2012 г., прошедшая через систему оборотного охлаждения Казанской ТЭЦ-2, имела состав (в ммоль эквивалентов/л): Ж(Ca) = 1,8; Ж(Mg) = 0,6; Na^+ = 0,3; Cl^- = 0,2; SO_4^{2-} = 0,8; HCO_3^- = 1,5; SiO_2 = 0,27; Glu^{2-} = 0,4; pH = 7,94. При этом доза коагулянта (ОХА) в пересчете на Al_2O_3 составляла 15,1 мг/л. В расчетах органическая компонента моделировалась L-глутаминовой кислотой (H_2Glu_2). Температура: 25 °C. Результаты расчетов при дозе коагулянта 10,2 мг/л представлены в виде диаграммы (рис. 4), из которой видно, что дозы соли алюминия в 10,2 мг/л не хватает для достижения оптимального значения pH. По диаграмме pH коагулированной воды равен 7,55. При этом растворимость алюминия (остаточная концентрация) составляет 540 мкг/л. Для достижения оптимального значения pH (pH = 6,5) необходимо либо увеличение дозы коагулянта в 3-4 раза, либо подкисление воды. Однако даже в оптимальной области (pH = 6,5-6,6) расчетное остаточное содержание алюминия составит порядка 180 мкг/л. Причина повышенной растворимости алюминия – образование комплексов с органическими субстратами. В данном случае это гидроксоглютаматный комплекс – Al(OH)Glu, моделирующий комплексы алюминия с фульвокислотами.

Следует отметить еще один аспект, связанный с необходимостью подкисления воды при коагуляции ОХА. Исходная вода на ВПУ ТЭЦ отбирается из системы оборотного охлаждения (СОО) ТЭЦ. Вода СОО многократно проходит

через градирни, где происходит частичное удаление растворенной угольной кислоты (свободной CO_2). При этом вода существенно подщелачивается. Например, для мая 2012 г. pH волжской воды – 7,37, pH исходной воды из СОО – 7,94. Соответственно, кислотности коагулянта (ОХА) становится недостаточно для достижения оптимальной области pH.

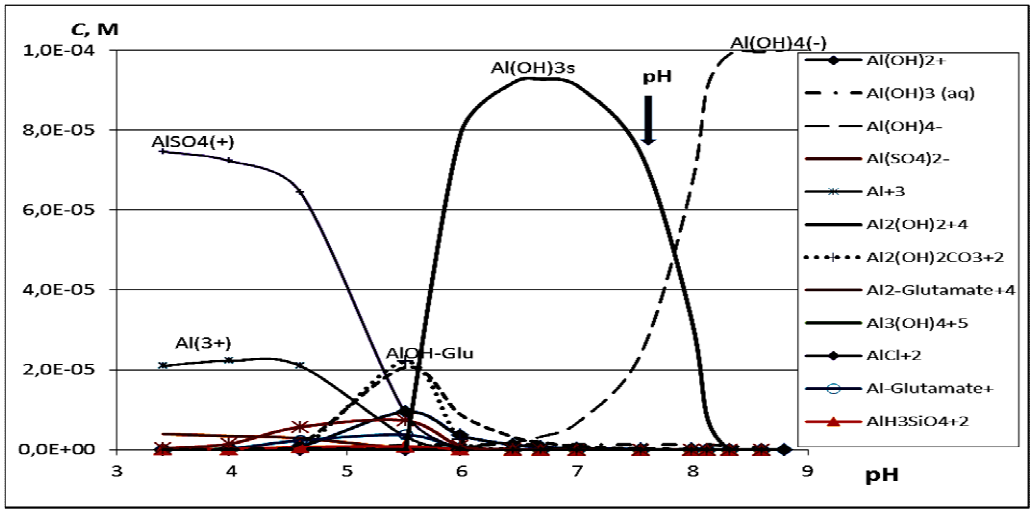


Рис. 4. Распределение равновесных растворимых и нерастворимых форм алюминия (3+) в водном растворе состава, соответствующего волжской воде в мае 2012 г. Доза соли алюминия (ОХА) в пересчете на Al_2O_3 – 10,2 мг/л

Представленные результаты расчетов на природной воде показывают, что при коагуляции с ОХА необходимо строго выдерживать значение pH в обрабатываемой воде в зависимости от содержания в ней комплексообразующих органических веществ. В период паводка, когда в речной воде сильно увеличивается содержание гумусовых веществ (в два и более раза) за счет смывания торфа в реки, растворимость алюминия за счет реакций комплексообразования возрастает и возможен его проскок через фильтры практически при любом значении pH. В период паводка целесообразно включить на стадии предочистки дополнительную очистку от органических веществ. Например, предварительное фильтрование с загрузкой фильтра активным углем или органопоглотителем, а также обработка реагентами с активным хлором и добавка флокулянтов.

ФГБОУ ВПО «Казанский государственный энергетический университет» совместно кафедрами «ТЭС» и «Химии» была предложена бессточная схема для Казанской ТЭЦ-2, которая представлена на рис. 5.

Исходная вода по линии 1 подается в блок I предварительной очистки, в осветлитель 2 с последующим осветлением в насыпном механическом фильтре 4, который установлен после бака 3 коагулированной воды. Осветленная вода после механического фильтра 4 подается в блок II умягчения воды, в котором вода проходит фильтр 5 Na-катионирования. С бака 6 умягченной воды после корректировки pH по линии 26 подается в блок III обратного осмоса. Далее пермеат с установки обратного осмоса 7 по линии 14 поступает в блок IV ионного обмена для глубокого обессоливания воды на фильтрах 8, 9 H-OH-ионирования.

Затем по линии 15 глубоко обессоленная вода с фильтра 9 Н-ОН-ионирования поступает в деаэратор 10 с дальнейшей подачей по линии 16 в котел 11 высокого давления. Регенерационные воды с фильтров 8, 9 Н-ОН-ионирования по линиям 17 и 18 поступают в бак нейтрализатор 19.

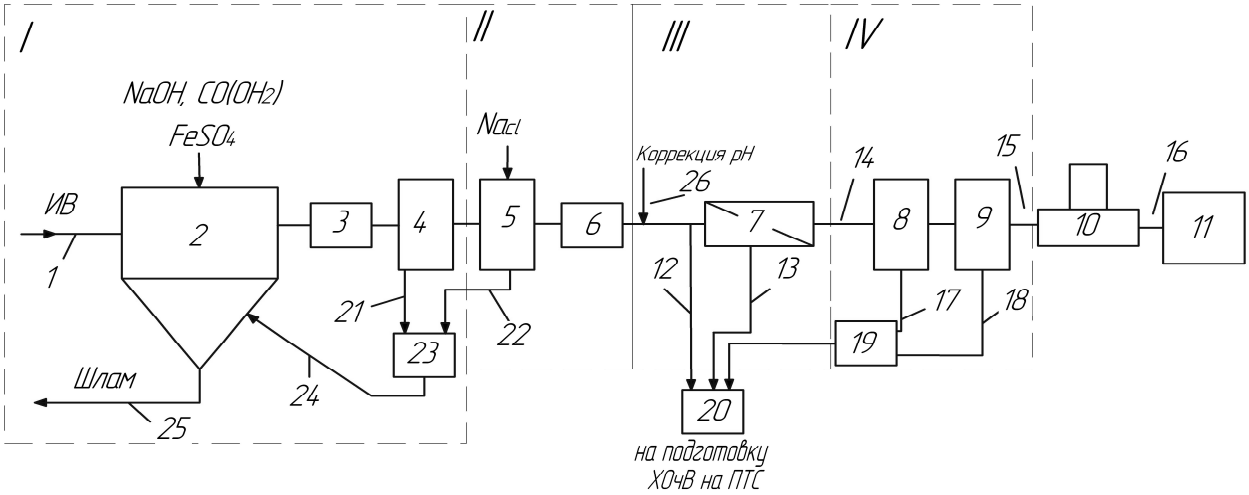


Рис. 5. Бессточная схема водоподготовки КТЭЦ-2

Часть умягченной воды с бака 6 умягченной воды по линии 12, концентрат с установки обратного осмоса по линии 13, а также регенерационные воды с бака нейтрализатора 19 подаются на установку 20 для подготовки химически очищенной воды на подпитку теплосети.

Промывочная вода по линии 21 и регенерационный раствор по линии 22 с механического фильтра 4 и с фильтра 5 Na-катионирования направляются в бак 23 промывочных растворов с дальнейшей подачей их в осветлитель по линии 24. В процессе работы осветлителя 2 удаляется шлам по линии 25.

Таким образом, использование предложенной схемы позволит повысить качество обрабатываемой воды за счет глубокого обессоливания воды, а также минимизировать остаточные сточные воды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Чичирова, Н.Д.* Баромембранные технологии в энергетике: Монография / Н.Д. Чичирова, С.М. Власов. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2011. – 272 с.

2. *Гирфанов, А.А.* Баромембранные технологии водоподготовки в системе ТЭС-теплосеть / А.А. Гирфанов, А.Г. Филимонов, А.А. Чичиров, Н.Д. Чичирова // Энергосбережение и водоподготовка. – 2012. – № 5 (79). – С. 11-15.

3. *Чичирова, Н.Д.* Анализ структуры и классификация воды / Н.Д. Чичирова, А.А. Чичиров, С.Л. Сергеев // Программы для ЭВМ базы данных топологии интегральных микросхем. ФГУ ФИПС. – М., 2009 – № 1 (66) (2 ч.). – С. 272.

4. *Филимонов, А.Г.* Потенциометрический и pH-спектроскопический анализ слабощелочных карбонатных метастабильных растворов / А.Г. Филимонов, А.А. Чичиров, Л.И. Гайнутдинова, Н.Д. Чичирова // Энергосбережение и водоподготовка. – 2012. – № 1. – С. 11-14.

ЭКСТРУДЕР ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ГРАНУЛ

Голованчиков А.Б. – д-р техн. наук, профессор ВолгГТУ
Шагарова А.А. – канд. техн. наук, доцент ВолгГТУ
Шапошников А.П., Тарасенко Л.Е. – магистранты ВолгГТУ

Принципы прессового гранулирования реализуют в червячных прессах (экструдерах) различной конструкции, рабочими элементами которых являются червяки (шнеки), пластицирующие перерабатываемый материал и продавливающие его через фильерную решетку, по выходе из которой сформированные жгуты либо ломаются под действием собственной тяжести, либо их режут до или после охлаждения дисковым или гильотинным ножом на частицы заданной длины.

При гранулировании в экструдере материал постоянно находится под воздействием механических сил и высокой температуры, что способствует процессу термомеханодеструкции полимерных цепей [1].

Вследствие высокой вязкости перерабатываемых материалов, которые не позволяют выдавливать гранулы через отверстия фильерной решетки с большой скоростью, производительность гранулятора снижается.

Колебание скорости вращения формующей головки с большой амплитудой уменьшает эффективную вязкость перерабатываемого материала, увеличивает скорость его течения через выпускные отверстия, что способствует возрастанию производительности [2].

Симметричное расположение выпускных отверстий на малой оси эллипса, образованного поперечным сечением формующей головки, позволяет сохранять динамическое равновесие при выдавливании перерабатываемого материала через эти отверстия, уменьшая динамические нагрузки при колебаниях давления внутри формующей головки, а значит, увеличивает срок службы и способствует повышению производительности за счет длительной работы без остановок на ремонт.

Конструкция предлагаемого устройства показана на рисунке.

Экструдер работает следующим образом. Перерабатываемый материал подается червяком 2 к выпускным отверстиям 5 формующей головки 4, имеющей в поперечном сечении форму эллипса. Прерыватель 3 получает вращение от привода 6 через муфту 7, червяк 2 и цилиндрическую пружину 8. Так как прерыватель 3 имеет овальную форму, он образует канал переменного сечения, то запирающий выпускные отверстия 5, как показано на рисунке, так как размер малой оси эллипса формующей головки равен размеру большой оси овала прерывателя 3, то открывающий их. Когда выпускные отверстия 5 открыты, перерабатываемый материал проходит сквозь них наружу, когда закрыты – подача перерабатываемого материала прекращается, и образующиеся гранулы отделяются от выпускных отверстий 5. При вращении прерывателя 3, закрепленного посредством цилиндрической пружины 8 на торце червяка 2, из-за образующегося гидроклина между овальной поверхностью прерывателя 3 и поперечным сечением в форме эллипса формующей головки 4, прерыватель то замедляет свое

движение с накоплением упругой энергии в цилиндрической пружине, то ускоряет это движение. Периодическое колебательное вращение с большой амплитудой колебаний прерывателя 3 приводит к снижению эффективной вязкости и колебаниям давления, которое не только увеличивает скорость движения перерабатываемого материала, а значит и производительность, но и уплотняет перерабатываемый материал, находящийся в отверстиях 5, с получением на выходе гранул с гладкой поверхностью и однородных по форме и размерам. Кроме того, дополнительная опора червяка 2 и прерывателя 3, образованная валиком 11 с подшипником 10, не позволяет гребням червяка 2 соприкасаться при вращении с рабочей внутренней поверхностью корпуса 1, что увеличивает срок службы экструдера, а значит и его производительность [3].

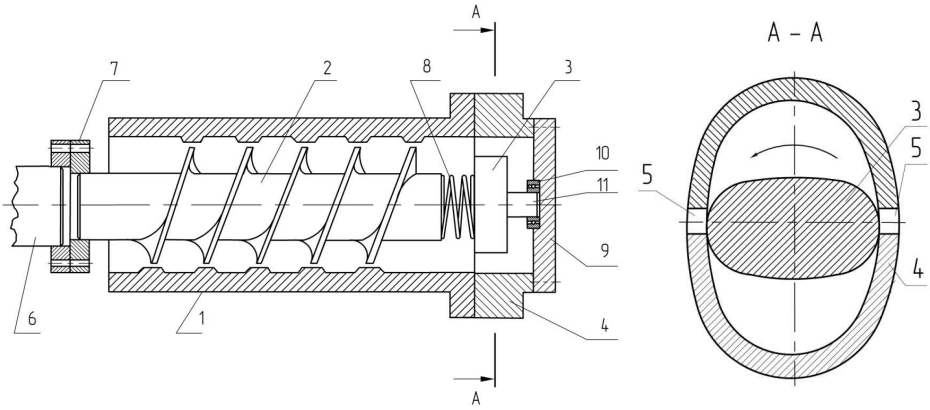


Рисунок. Схема экструдера:
1 – корпус; 2 – червяк; 3 – прерыватель; 4 – формующая головка;
5 – выпуское отверстие; 6 – привод; 7 – муфта; 8 – цилиндрическая пружина;
9 – съемная крышка; 10 – подшипник; 11 – валик

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Раувендаль, К.* Экструзия полимеров: пер. с англ. / К. Раувендаль; под ред. А.Я. Малкина. – СПб.: Профессия, 2008. – 768 с.

2. *Ла Мантия, Ф.* Вторичная переработка пластмасс: пер. с англ. / Ф. Ла Мантия; под ред. Г.Е. Заикова. – СПб.: Профессия, 2006 – 400 с.

3. Заявка на полезную модель Р Ф № 2013121862 от 13.05.2013 «Экструдер для получения гранул», А.Б. Голованчиков, Н.А. Дулькина, А.А. Шагарова, В.А. Панов, А.П. Шапошников, Н.А. Прохоренко.

СЕКЦИЯ № 2

МАШИНОСТРОЕНИЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

Председатель: ***Самедов Я.Ю.*** – канд. техн. наук, ген. директор ОАО НПО «ЦНИИТМАШ»
Сопредседатель: ***Терентьев Г.Ф.*** – канд. техн. наук, профессор филиала МЭИ в г. Волжском
Секретарь: ***Агринская С.А.*** – канд. техн. наук, доцент филиала МЭИ в г. Волжском

МЕТОДИКА ПОВЕРКИ ВИРТУАЛЬНЫХ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

Апкарян А.Г. – аспирант МЭИ
Шевчук В.П. – д-р техн. наук, профессор филиала МЭИ в г. Волжском

Особенно актуальной для современных систем автоматического управления является предварительная проверка работоспособности алгоритмов робастной системы и адекватности эталонных математических моделей объектов управления. Эта задача может выполняться только методами имитационного моделирования на специальных стендах для диагностики программного обеспечения виртуальных приборов, создаваемых специально для этих целей [1, 2]. На рис. 1 представлена схема информационных потоков стенда для диагностики программного обеспечения робастных систем управления.

Стенд функционирует следующим образом. Истинные значения измеряемой величины $X(t)$ и помехи $N(t)$ моделируются в блоке 1 по алгоритмам, которые подробно описаны в работе [3].

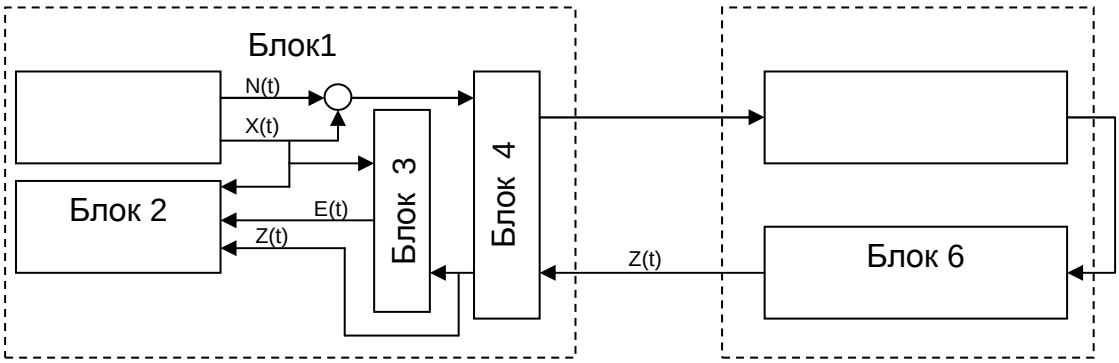


Рис. 1. Схема информационных потоков стенда

Сигнал с аддитивной помехой $X(t) + N(t)$ преобразуется в аналоговый с помощью блока 5 и возвращается в ЭВМ общего назначения посредством блока 6. Прошедший двойную дискретизацию сигнал $Z(t)$ после предварительной обработки в блоках 4 и 3 поступает на визуализацию в блок 2.

На рис. 2 изображен фрагмент работы программы для визуализации процесса измерения истинного значения $X(t)$. Здесь жирной линией отображается моделируемая синусоида, тонкая ступенчатая линия отображает сигнал, искажённый помехой, а жирная ступенчатая линия отображает процесс формирования методической динамической ошибки цифровой обработки измерительной информации $E(t) = X(t) - Z(t)$.

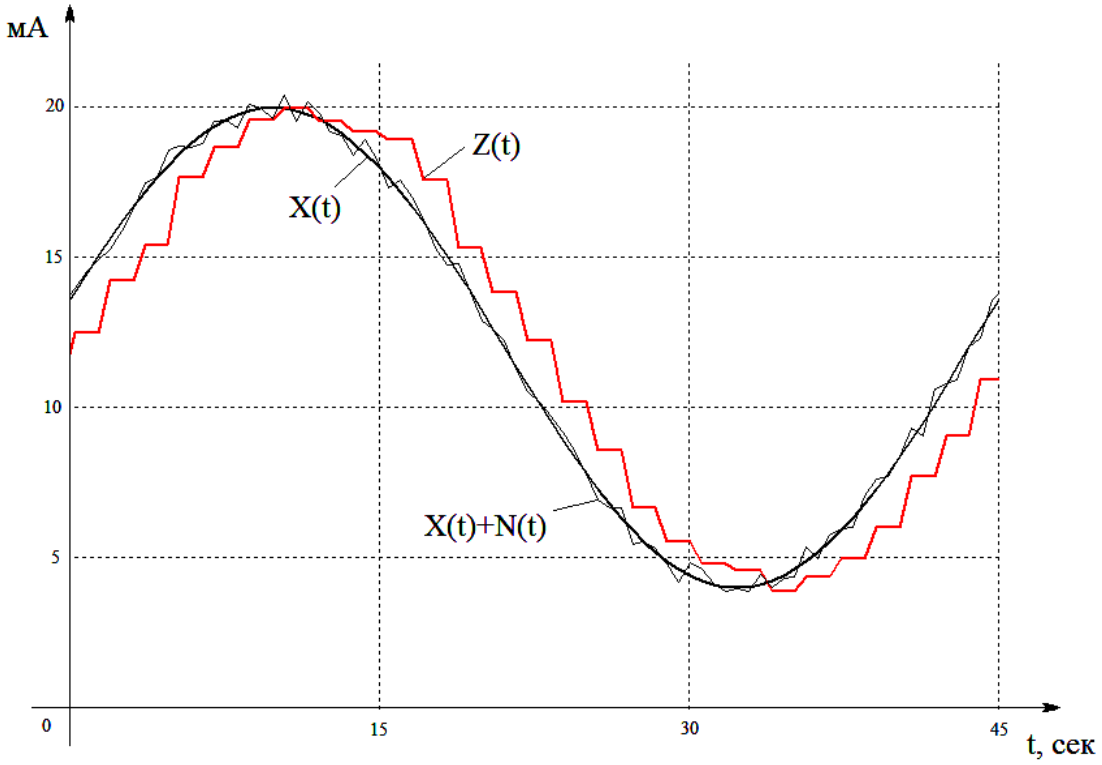


Рис. 2. Визуализация динамических погрешностей в процессе измерения

Методика работы при поверке виртуальных приборов и систем

1. Моделируются показания эталонного $Y(t) = X(t)$ и виртуального $Z(t)$ приборов.

2. Вычисляются оценки математического ожидания всех случайных процессов; вычисляются предварительные оценки значений нормированных корреляционных функций по длине одной реализации.

3. Формируются j реализаций.

4. По множеству реализаций вычисляются уточненные оценки математического ожидания, значения нормированной корреляционной функции и оценка дисперсии.

5. С помощью критерия Стьюдента осуществляется проверка равенства математического ожидания моделируемого случайного процесса заданной величине.

6. С помощью критерия Фишера проводится проверка соответствия текущих значений дисперсии моделируемого случайного процесса заданной величине.

7. С помощью критерия Стьюдента осуществляется проверка соответствия текущей скорости изменения моделируемого случайного процесса заданной величине; проверка осуществляется путем анализа совпадения значений корре-

ляционных функций при заданном временном сдвиге аргументов.

8. Принимается решение о пригодности виртуального прибора путем оценки его метрологических характеристик [3].

Как видно из рис. 2, общие потери информации при работе виртуального прибора равны площади, заключённой между показаниями эталонного прибора $Y(t)$, которые являются истинными значениями измеряемой величины $X(t)$, и показаниями виртуального прибора $Z(t)$, которые являются результатом отражения измеряемой величины $X(t)$ с аддитивной помехой $N(t)$. При этом стенд фактически проводит имитацию работы программно-технического комплекса с оценкой основных метрологических характеристик программно-аппаратных измерительных каналов [3], а именно:

1) оценку дисперсии последовательности показаний эталонного прибора:

$$D_Y(iT_S) = \sum_{j=0}^{N}\sum_{k=0}^{N} h_Y(jT_C)\cdot h_Y(kT_C)\cdot K_{XX}(i-j+k),$$

где $h_Y(t)$ – весовая функция эталонного измерительного канала; $K_{XX}(t)$ – автокорреляционная функция истинного значения измеряемой величины;

2) оценку дисперсии последовательности показаний программно-аппаратного прибора:

$$D_Z(iT_S) = \sum_{j=0}^{N}\sum_{k=0}^{N} h_Z(jT_C)\cdot h_Z(kT_C)\cdot\left[K_{XX}(i-j+k)+K_{\Pi}(i-j+k)\right],$$

где $h_Z(t)$ – весовая функция программно-аппаратного прибора; $K_{\Pi}(t)$ – автокорреляционная функция помехи измерения;

3) оценку взаимокорреляционной функции последовательности показаний эталонного прибора $Y(iT_S)$ и последовательности показаний виртуального прибора (программно-технического комплекса) $Z(iT_S)$:

$$K_{YZ}(iT_S) = \sum_{j=0}^{N}\sum_{k=0}^{N} h_Y(jT_C)\cdot h_Z(kT_C)\cdot\left[K_{XX}(i-j+k)\right].$$

При оптимизации настроечных коэффициентов программного обеспечения программно-технического комплекса очень важной становится оценка дисперсии последовательности ошибок цифровой обработки измерительной информации:

$$D_E(iT_S) = \sum_{j=0}^{N}\sum_{k=0}^{N} h_Y(jT_C)\cdot h_Y(kT_C)\cdot K_{XX}(i-j+k) -$$

$$-2\sum_{j=0}^{N}\sum_{k=0}^{N} h_Y(jT_C)\cdot h_Z(kT_C)\cdot\left[K_{XX}(i-j+k)\right]+$$

$$+\sum_{j=0}^{N}\sum_{k=0}^{N} h_Z(jT_C)\cdot h_Z(kT_C)\cdot\left[K_{XX}(i-j+k)+K_{\Pi}(i-j+k)\right].$$

На стенде можно также вычислять текущие значения динамической

погрешности переходного процесса при адаптивном управлении:

$$\eta_Z^{\max}(iT_S) = \sup\sqrt{\frac{\sigma_E^2(iT_S)}{\sigma_Z^2(iT_S)}}$$

или усредненное значение относительной среднеквадратической погрешности отклонения переходного процесса при адаптивном управлении от эталонного переходного процесса

$$\eta_Z^{\text{ср}} = \varepsilon = \Delta = \sqrt{\frac{1}{\sigma_Y^2 \cdot (N-1)}\sum_{i=0}^{N}\sigma_E^2(iT_S)}\,.$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Болдырев И.А., Шамигулов П.В., Шевчук В.П.* Стенд для диагностики программного обеспечения и измерительных каналов многофункциональных систем контроля и управления //Патент на полезную модель № 94333. Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей 20.05.2010. – Бюл. № 14.

2. *Болдырев И.А., Шевчук В.П.* Изменяемый полевой прибор // Патент на полезную модель № 84965. Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей 20.07.09 г. – Бюл. № 20.

3. *Шевчук, В.П.* Моделирование метрологических характеристик интеллектуальных измерительных приборов и систем / В.П. Шевчук. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. – 320 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЗАКАЛОЧНОЙ ПЕЧИ

Баркова Н.В. – студентка филиала МЭИ в г. Волжском
Агринская С.А. – канд. техн. наук, доцент
филиала МЭИ в г. Волжском

В современных закалочных печах существует необходимость в непрерывном получении информации о свойствах и параметрах технологического процесса, которая необходима для функционирования алгоритмов адаптации. Поэтому важным элементом автоматизированных систем управления становятся математические модели объекта управления, позволяющие оперативно прогнозировать его текущее состояние.

Качество работы закалочных печей зависит от правильного выбора режима закалки, а именно: температуры нагрева, времени выдержки и скорости охлаждения. Нагрев деталей должен быть достаточно медленным, чтобы не возникли напряжения и трещины.

В данной работе рассмотрена закалочная печь газовая рекуперативная с шагающими балками с односторонним нагревом.

В качестве объекта исследования был выбран первый участок нагрева закалочной печи, включающий в себя три зоны регулирования.

Анализ основных входных и выходных параметров закалочной печи показал, что поддержание строго определенного температурного режима в каждой зоне регулирования приведет к оптимальной работе всей закалочной печи.

В результате обработки экспериментальных данных пассивным методом, то есть путем расчета корреляционных функций, были получены следующие передаточные функции: «расход газа зоны 1 – температура зоны 1», «расход газа зоны 2 – температура зоны 2», «расход газа зоны 3 – температура зоны 3», «расход воздуха зоны 1 – температура зоны 1», «расход воздуха зоны 2 – температура зоны 2», «расход воздуха зоны 3 – температура зоны 3», «температура зоны 1 – температура зоны 2», «температура зоны 2 – температура зоны 1», «температура зоны 2 – температура зоны 3», «температура зоны 3 – температура зоны 2», приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Результаты пассивного эксперимента

Передаточная функция по каналу	**Вид передаточной функции**
«расход газа зоны 1 – температура зоны 1»	$W_{11} = \frac{0{,}087}{13{,}834\rho + 1} e^{-0{,}019p}$
«расход газа зоны 2 – температура зоны 2»	$W_{32} = \frac{0{,}156}{8{,}751\rho + 1} e^{-0{,}03p}$
«расход газа зоны 3 – температура зоны 3»	$W_{53} = \frac{12{,}6}{0{,}036\rho + 1} e^{-25p}$
«расход воздуха зоны 1 – температура зоны 1»	$W_{21} = \frac{0{,}005}{10{,}113\rho + 1} e^{-0{,}002p}$
«расход воздуха зоны 2 – температура зоны 2»	$W_{42} = \frac{0{,}0008}{64{,}297\rho + 1} e^{-0{,}002p}$
«расход воздуха зоны 3 – температура зоны 3»	$W_{63} = \frac{0{,}007}{15{,}984\rho + 1} e^{-0{,}003p}$
«температура зоны 1 – температура зоны 2»	$W\upsilon_{12} = \frac{0{,}003}{16{,}309\rho + 1} e^{-0{,}016p}$
«температура зоны 2 – температура зоны 1»	$W\upsilon_{21} = \frac{0{,}01}{0{,}238\rho + 1} e^{-0{,}556p}$
«температура зоны 2 – температура зоны 3»	$W\upsilon_{23} = \frac{0{,}198}{0{,}71\rho + 1} e^{-5{,}185p}$
«температура зоны 3 – температура зоны 2»	$W\upsilon_{32} = \frac{0{,}002}{0{,}471\rho + 1} e^{-0{,}13p}$

Анализ технологического процесса показал, что температура зоны регулирования 1 оказывает влияние на температуру зоны 2, которая в свою очередь является возмущающим воздействием для температур зоны 1 и зоны 3, а температура зоны 3 влияет на температуру зоны 2. В результате была разработана

структурная схема системы регулирования температуры рабочего пространства первого участка закалочной печи, которая представлена на рис. 1.

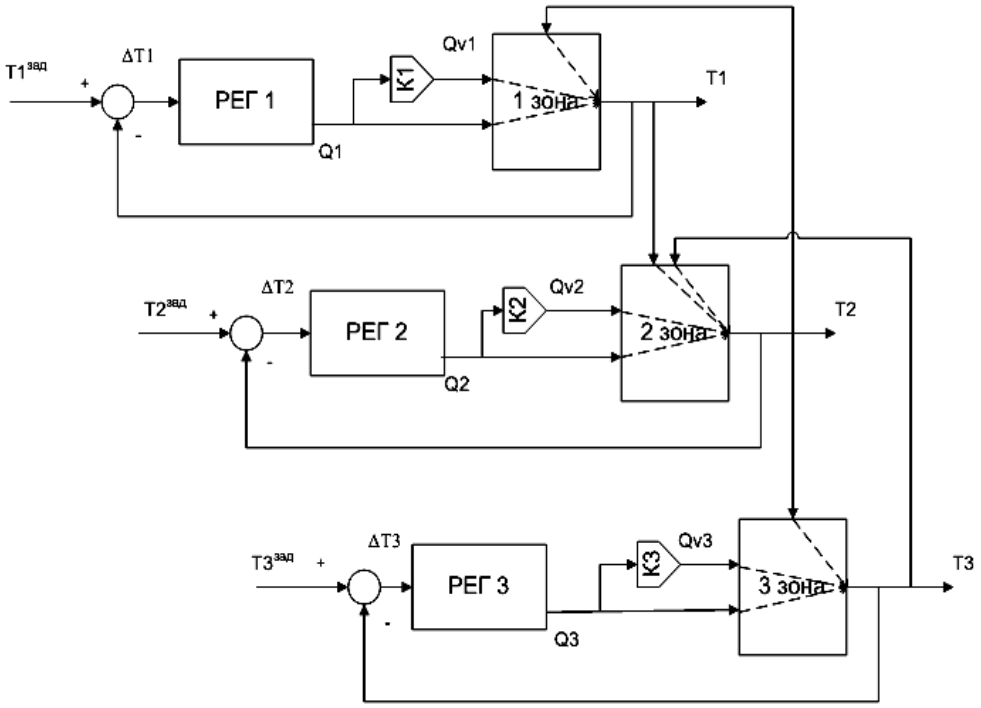


Рис. 1. Структурная схема системы регулирования температуры рабочего пространства первого участка закалочной печи:
$T1^{зад}$, $T2^{зад}$, $T3^{зад}$ – температуры задания в 1,2 и 3 зон регулирования; T1, T2, T3 – выходные значения температуры 1, 2, 3 зон регулирования; ΔT1, ΔT2, ΔT3– сигналы рассогласования (разница между заданным и текущим выходным значением температуры) 1, 2 и 3 зон регулирования; Q1, Q2, Q3– расходы газа на горение 1, 2 и 3 зон регулирования; Qv1, Qv2, Qv3 – расход воздуха на горение 1, 2 и 3 зон регулирования; РЕГ1, РЕГ2, РЕГ3– регулятор 1, 2, 3 зон регулирования; К1, К2, К3 – усилительные звенья 1, 2, 3 зон регулирования, предназначенные для поддержания требуемого соотношения расхода «газ-воздух» на горение

В качестве закона регулирования температуры в каждой зоне был выбран пропорционально-интегральный, позволяющий добиться высокой точности и устойчивости регулирования. Расчет настроек регуляторов проводился в среде Mathcad с использованием метода ограничения на запас устойчивости по корневому показателю колебательности (табл. 2).

Таблица 2

Коэффициенты настройки ПИ-регуляторов

Номер зоны	k_p, °С·ч / м^3	T_i, ч
1	5 180	0,054
2	1 249	0,085
3	0,023	7,068

Передаточные функции компенсаторов возмущающих воздействий, рассчитанные из условия идеальной компенсации, приведены в табл. 3.

Таблица 3

Передаточные функции компенсаторов

Передаточная функция по каналу	Вид передаточной функции
«температура зоны 2 – температура зоны 1»	$W_{k2-1} = \dfrac{0{,}076p^3 + 0{,}013p^2 + 0{,}0005p}{63{,}178p^3 + 1\,441{,}543p^2 + 5\,054{,}971p + 476{,}56}$
«температура зоны 1 – температура зоны 2»	$W_{k1-2} = \dfrac{0{,}143p^3 + 0{,}019p^2 + 0{,}0003p}{17\,354{,}276p^3 + 205\,500{,}734p^2 + 15\,696{,}619p + 193{,}845}$
«температура зоны 2 – температура зоны 3»	$W_{k2-3} = \dfrac{0{,}805p^3 + 22{,}419p^2 + 1{,}399p}{200{,}114p^3 + 311{,}617p^2 + 42{,}132p + 0{,}28996}$
«температура зоны 3 – температура зоны 2»	$W_{k3-2} = \dfrac{0{,}096p^3 + 0{,}012p^2 + 0{,}0002p}{501{,}187p^3 + 6\,968{,}173p^2 + 12\,626{,}505p + 193{,}845}$

Структурная схема системы регулирования температуры рабочего пространства печи с компенсацией возмущений, реализованная в программе VisSim, приведена на рис. 2.

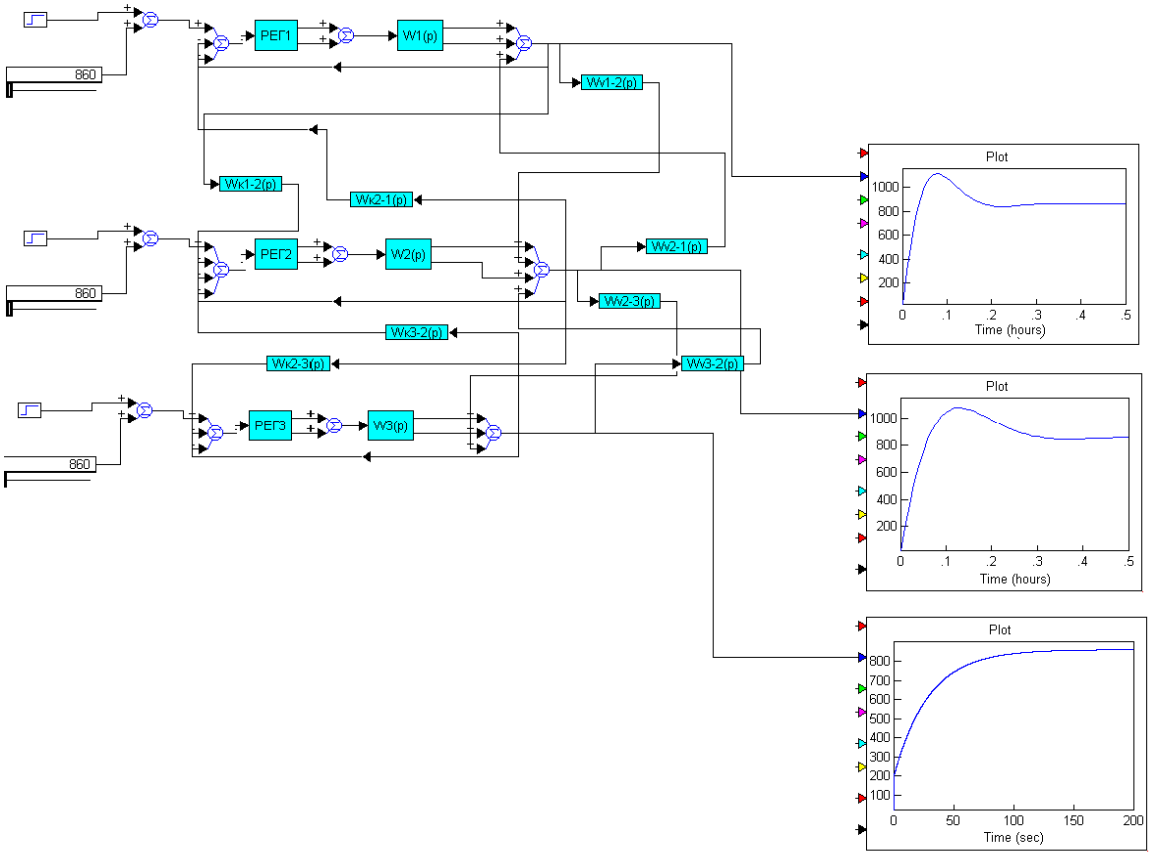


Рис. 2. Реализация алгоритма управления температурой в печи в программе VisSim с компенсацией возмущений

Сравнительный анализ графиков переходных процессов трех зон регулирования по показателям качества показал, что в результате применения компенсаторов улучшаются динамические свойства системы регулирования, что обусловлено инвариантностью системы регулирования по отношению к возмущающим воздействиям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Инструкция по эксплуатации закалочной печи ОАО «ВТЗ».

2. *Гуляев, А.П.* Металловедение: учебник для студентов ВТУЗов / А.П. Гуляев. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1986. – 544 с.

3. *Юревич, Е.И.* Теория автоматического управления / Е.И. Юревич. – Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2007. – 560 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ПЕЧИ С ШАГАЮЩИМИ БАЛКАМИ

Бирюкова С.С. – студентка филиала МЭИ в г. Волжском
Агринская С.А. – канд. техн. наук, доцент
филиала МЭИ в г. Волжском

Трубопрокатное производство – это производство бесшовных металлических труб с помощью прокатки. Бесшовные трубы используются в химической промышленности, в отраслях машиностроения, в авиастроении и т.д.

Тепловой и температурный режим работы печей с шагающими балками (ПШБ) неизменны во времени, так как это проходные нагревательные печи постоянного действия. Они могут работать как по камерному режиму, так и с переменной по длине печи. Распределение температуры по длине печи зависит от расположения горелок и дымоотводов.

Основными недостатками печей с шагающими балками являются высокая стоимость строительства и сложность эксплуатации, связанные с использованием сложных механизмов шагающего пода.

Для обеспечения равномерного нагрева заготовок в печи осуществляется их перекатывание по наклонной плоскости рейтеров неподвижных балок, что обеспечивается следующим: в результате специальной настройки механизма шагания балок при каждом шаге все заготовки при опускании подвижных балок укладываются не в ручьи рейтеров неподвижных балок, а на их наклонную поверхность. При каждом последующем переносе все заготовки поворачиваются на некоторый угол и за весь процесс нагрева совершают несколько полных оборотов. Независимое продвижение металла в печи по двум рядам осуществляется посредством системы шагающих балок.

Нагрев заготовок в ПШБ осуществляется методически, путем последовательного прохождения металла через методическую зону, первый участок нагрева (первая и вторая зоны регулирования), второй участок нагрева (третья и четвертая зоны регулирования), третий участок нагрева (пятая и шестая зоны регулирования).

В качестве объекта управления был выбран третий участок нагрева печи с шагающими балками (пятая и шестая зоны регулирования).

Печь с шагающими балками является сложным многомерным объектом управления со значительной инерционностью и временем запаздывания по каналам регулирования.

Анализ технологического процесса показал, что основными каналами регулирования в пятой зоне являются: расход воздуха $F_{в5}$ – температура рабочего пространства зоны T_5; расход газа $F_{г5}$ – температура рабочего пространства зоны T_5. В шестой зоне: расход воздуха $F_{в6}$ – температура рабочего пространства зоны T_6; расход газа $F_{г6}$ – температура рабочего пространства зоны T_6. Эти каналы позволяют осуществлять стабилизацию регулируемых величин с помощью независимых одноконтурных систем, связанных лишь через объект управления.

Регулирующие воздействия той или иной величины (рис. 1) показаны сплошными линиями и служат основным способом стабилизации регулируемой величины, а другие воздействия (пунктирные линии) считаются по отношению к этой величине внутренними или внешними возмущениями.

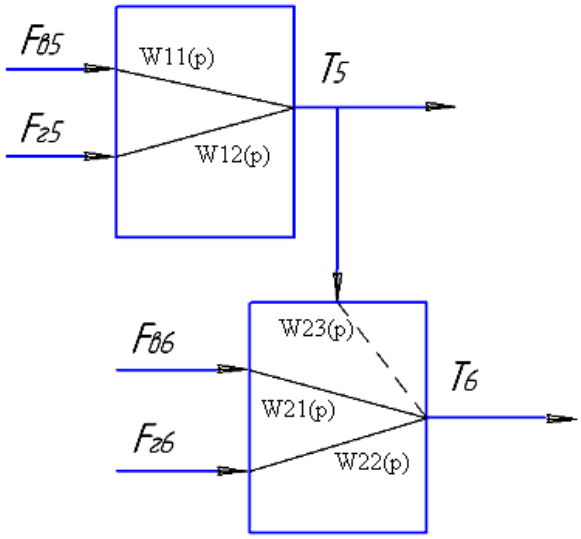


Рис. 1. Структурная схема объекта управления

В результате обработки экспериментальных данных пассивным методом, то есть путем расчета корреляционных функций были получены передаточные функции каналов управления, которые сведены в таблице.

Регулирование температуры в пятой и шестой зонах осуществляется путем изменения расходов газа и воздуха регулирующими клапанами с помощью исполнительных механизмов. При анализе технологического процесса было выявлено, что температура рабочего пространства пятой зоны влияет на температуру в шестой зоне, то есть является возмущающим воздействием.

Одной из причин возникновения погрешностей в системах управления является неполнота получаемой рабочей информации о текущем состоянии объекта управления. Физически неполнота рабочей информации о состоянии

объекта в одноконтурных САУ с управлением по отклонению обусловлена тем, что в таких структурах регулятор контролирует лишь конечный эффект действия возмущений на объект – вызванное этим возмущением нежелательное отклонение управляемой величины. Неполнота рабочей информации может быть в значительной мере устранена, если осуществлять непосредственный оперативный контроль возмущений.

Таблица

Результаты пассивных экспериментов

Канал управления	Передаточная функция
«расход воздуха – температура зоны 5»	$W11(p)=\frac{0{,}036}{4{,}572p+1}e^{-0{,}968p}$
«расход воздуха – температура зоны 6»	$W21(p)=\frac{0{,}112}{1{,}356p+1}e^{-64{,}979p}$
«расход газа – температура зоны 5»	$W12(p)=\frac{0{,}837}{8{,}916p+1}e^{-2{,}437p}$
«расход газа – температура зоны 6»	$W22(p)=\frac{0{,}253}{1{,}027p+1}e^{-37{,}975p}$
«температура зоны 5 – температура зоны 6»	$W23(p)=\frac{0{,}247}{1{,}224p+1}e^{-36{,}111p}$

Структурная схема системы регулирования температуры третьего участка печи с учетом возмущения представлена на рис. 2.

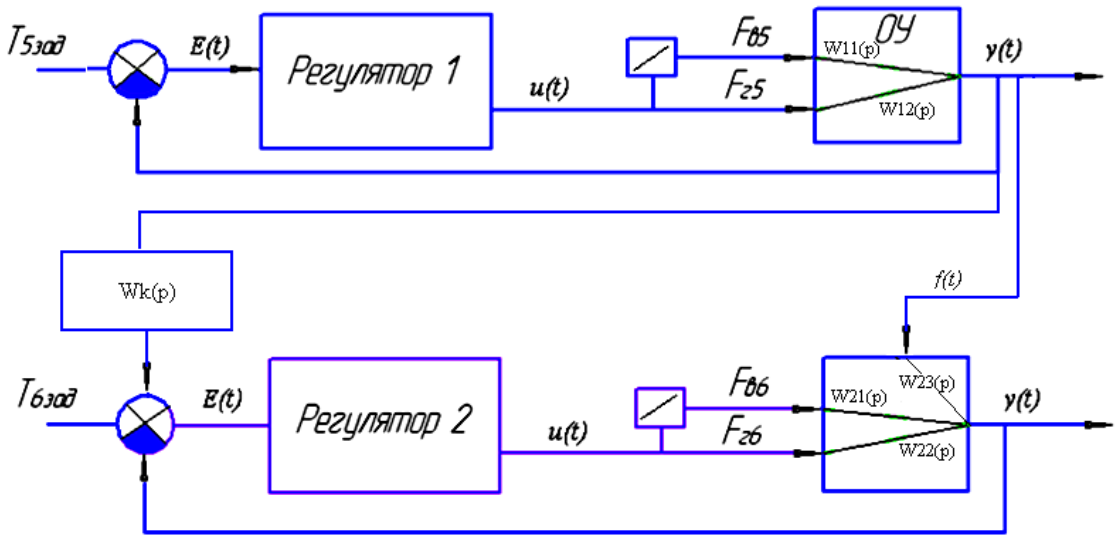


Рис. 2. Структурная схема системы регулирования температуры третьего участка печи с компенсацией возмущения

Проверка работоспособности разработанных алгоритмов управления процессом нагрева заготовок в печи проводилась методом имитационного

моделирования в программе VisSim. Блок-схема имитационного моделирования переходных процессов представлена на рис. 3.

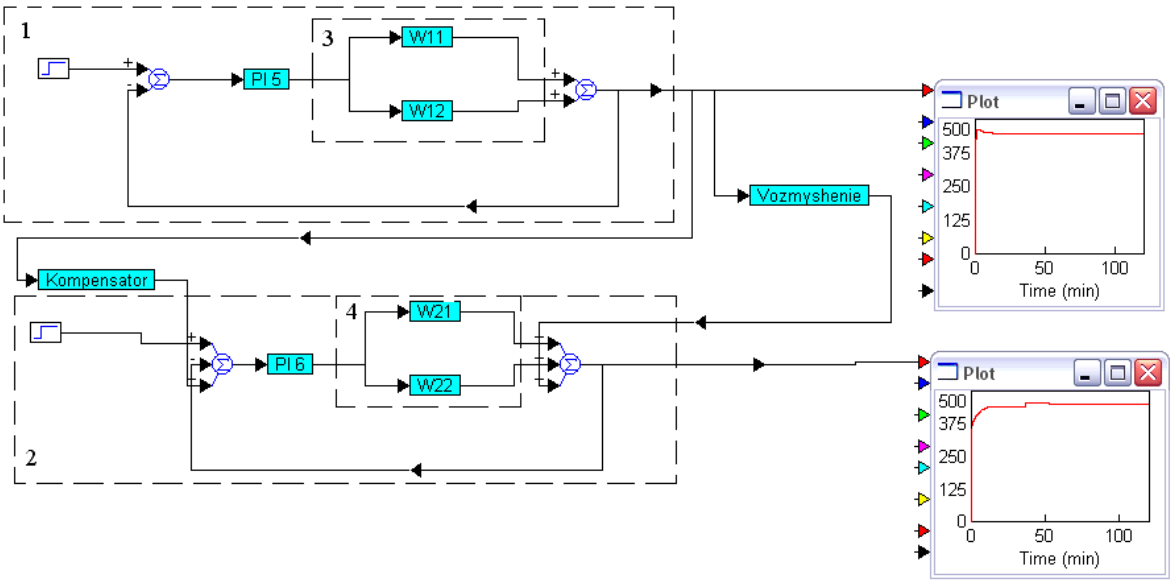


Рис. 3. Блок-схема имитационного моделирования процессов управления

Сравнительный анализ графиков переходных процессов шестой зоны регулирования показал, что в результате применения компенсатора улучшаются динамические свойства системы регулирования, что обусловлено инвариантностью системы регулирования по отношению к возмущающим воздействиям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 27881-88. Печи с шагающим подом и печи с шагающими балками для нагрева черных металлов. Удельный расход энергии. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2006.

2. *Буглак, Л.И.* Автоматизация методических печей / Л.И. Буглак. – М.: Металлургия, 1981.

3. *Миткалинный, В.И.* Металлургические печи: Учебное пособие для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. / В.И. Миткалинный. – М.: Металлургия, 1987.

4. *Осадчий, В.Я.* Технология и оборудование трубного производства / В.Я. Осадчий. – М.: Интермет Инжиринг, 2001. – 608 с.

УПРАВЛЕНИЕ СОЛНЕЧНЫМИ КОЛЛЕКТОРАМИ ПРИ НАЛИЧИИ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ В МАГИСТРАЛЯХ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Болдырев И.А. – канд. техн. наук, доцент
филиал МЭИ в г. Волжском
Пузиков Б.С. – студент филиала МЭИ в г. Волжском

Трубопроводы первого контура солнечных коллекторов (СК) расположены частично в помещении, а частично – вне помещения, обычно на крыше здания, и, следовательно, подвержены воздействию окружающей среды (рис. 1).

Практика эксплуатации СК показывает, что при большой длине внешних участков трубопроводов первого контура в зимнее время тепловые потери оказывают существенное влияние на процесс нагрева воды. Основным способом устранения тепловых потерь в трубопроводах является организация качественной теплоизоляции, однако в качестве дополнительного способа предлагается оптимизация закона управления циркуляционным насосом (ЦН) с целью предотвращения влияния вышеописанных явлений застоя теплоносителя на процесс нагрева воды.

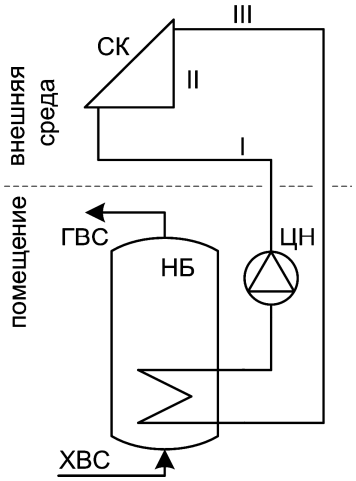


Рис. 1. Типовая схема двухконтурной системы солнечных коллекторов

Предлагается итерационный алгоритм расчета процесса нагрева воды для определения оптимальных параметров настройки алгоритма управления ЦН:

– определяют длительность цикла работы ЦН;

– по исходным данным определяют линейные термические сопротивления накопительного бака (НБ) и трубопроводов;

– предварительно рассчитывают длительность цикла нагрева теплоносителя в СК;

– рассчитывают объем перекачиваемого теплоносителя за один цикл работы ЦН;

– рассчитывают температуру теплоносителя перед НБ;

– рассчитывают температуру воды в НБ;

– уточняют длительность цикла нагрева теплоносителя в СК.

Рассмотрим подробнее порядок выполнения этапов алгоритма.

Длительность цикла работы ЦН τ'' зависит от времени остывания датчика температуры манифольда при попадании холодного теплоносителя в СК, которое можно определить, используя теорему Кондратьева [1]:

$$\tau'' = \left[\ln\left(T_{OS} - T_{NB}\right) - \ln\left(T_{OS} - T_{NB} - \Delta_T''\right)\right] / \left[K\alpha\right], \qquad (1)$$

где T_{OS} – температура окружающего воздуха, °С; T_{NB} – текущая температура в НБ, °С; Δ_T'' – заданная разница температур (уставка), при которой происходит

отключение ЦН, °С; α – коэффициент температуропроводности, м^2/с; K – коэффициент пропорциональности, который для цилиндра конечной длины l и радиуса r может быть вычислен по выражению

$$K = \left[\left(\frac{2{,}405}{r} \right)^2 + \left(\frac{\pi}{l} \right)^2 \right]^{-1}. \qquad (2)$$

При расчете температуры воды в НБ $\overline{T_{NB}}$ будем учитывать среднее по объему значение:

$$\overline{T_{NB_i}} = \frac{\tau'' \pi H T_{OV} / R_{NB} + (G_{TN} c_{TN} (T_{SK} - \Theta) + G_V c_V T_{HVS}) \tau'' + m_{NB} c_V \overline{T_{NB_{i-1}}}}{m_{NB} c_V + (G_V c_V + G_{TN} c_{TN}) \tau'' + \tau'' \pi H / R_{NB}}, \qquad (3)$$

где H – геометрическая высота НБ, м; T_{OV} – температура воздуха в помещении НБ, °С; R_{NB} – линейное термическое сопротивление теплопередачи бойлера, м °С/Вт; G_{TN}, c_{TN} и G_V, c_V – массовый расход и удельная теплоемкость жидкости в первом и втором контуре соответственно, кг/с, Дж/кг·°С; T_{SK} – температура теплоносителя на выходе из СК, °С; Θ – оставшийся температурный напор в бойлере, °С; T_{HVS} – температура холодной воды на входе в НБ, °С; m_{NB} – масса воды в НБ, кг.

Для расчета значения тепловых потерь в трубопроводах СК необходимо рассмотреть два случая:

а) время работы ЦН существенно меньше времени простоя ЦН. При этом расчет тепловых потерь производится для статической системы;

б) время работы ЦН сопоставимо или превышает время простоя ЦН. Расчет тепловых потерь производится для динамической системы с учетом режима течения жидкости. При этом, если режим течения теплоносителя в трубе – ламинарный, то расчет тепловых потерь производится с использованием интеграла Лайона; если режим течения жидкости турбулентный, то расчет производится с помощью эмпирической формулы Михеева.

Расчет времени нагрева теплоносителя в манифольде СК τ' производится по выражению

$$\tau' = \frac{V \rho_{TN} c_{TN} (\Delta'_T + \overline{T_{NB}} - T_{SK})}{E_{SK}}, \qquad (4)$$

где ρ_{TN} – плотность теплоносителя.

Моделирование показывает, что изменение уставки температуры включения ЦН оказывает существенное влияние на эффективность процесса нагрева. Зависимость температуры воды в НБ от времени при различных уставках температуры показана на рис. 2.

Таким образом, для повышения эффективности процесса нагрева воды СК в зимнее время года необходимо увеличивать уставку температуры на выключение ЦН, уменьшая при этом зону гистерезиса за счет значения уставки на включение ЦН. Подобная настройка системы управления приводит к повышению

частоты запусков ЦН, предотвращая существенное падение температуры теплоносителя первого контура в моменты простоя ЦН.

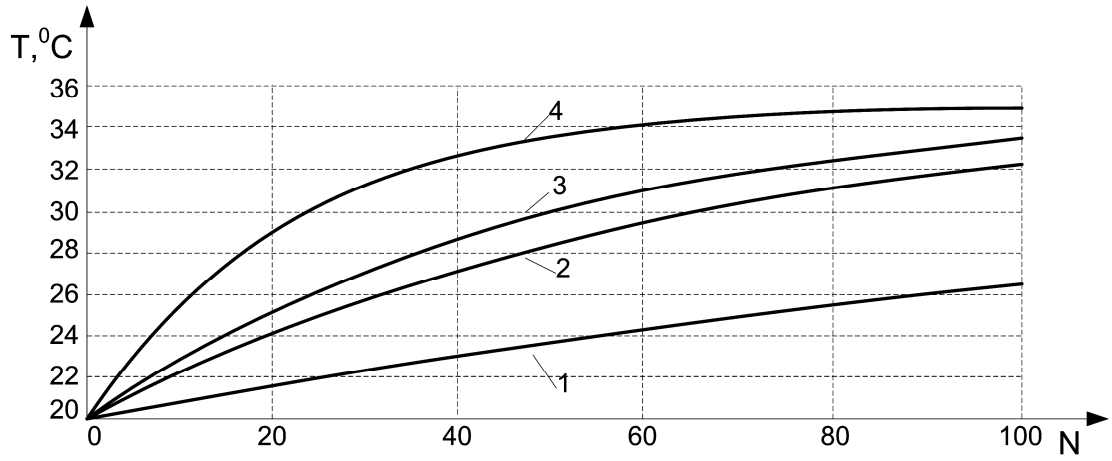


Рис. 2. Изменение температуры воды в НБ при разных уставках на включение ЦН:
1 – Δ'_T = 2 °С; 2 – Δ'_T = 4 °С; 3 – Δ'_T = 6 °С; 1 – Δ'_T = 8 °С

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Исаченко, В.П.* Теплопередача / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – М.: Энергия, 1965. – 425 с.

АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ РАБОТЫ ЭНЕРГОБЛОКА

Гайдержий Д.С. – аспирант МЭИ
Шевчук В.П. – д-р техн. наук, профессор
филиала МЭИ в г. Волжском

Анализ экспериментальных данных, полученных пассивным сбором информации, и обработка их методом наименьших квадратов дают модели критериев управления в виде текущих значений эффективности работы котлоагрегата

$$Э_К(iT_S) = -0{,}025G_Г(iT_S)^2 + 2{,}961G_Г(iT_S) - 173{,}654$$

и текущего значения эффективности работы турбогенератора

$$Э_Т(iT_S) = -0{,}014G_{ПП}(iT_S)^2 + 3{,}385G_{ПП}(iT_S) - 201{,}975.$$

При этом уравнение для оценки текущих значений эффективности работы энергоблока имеет вид:

$$Э_{ЭБ}(iT_S) = -0{,}0214G_Г(iT_S)^2 + 3{,}841G_Г(iT_S) - 190{,}021.$$

Эти оценки эффективности работы отдельного оборудования электростанции позволяют перейти к оптимальному управлению энергоблоком по критерию максимума эффективности работы энергоблока (минимума себестоимости

производимой электроэнергии). В основу программно-аппаратного прибора для измерения эффективности работы котлоагрегата положена динамическая модель критерия управления котлоагрегатом [1]:

$$Э_К(iT_S)=\frac{Y_1(iT_S)\cdot Y_5(iT_S)\cdot \mathrm{int}\left(Y_6(iT_S)\right)}{\sum_{j=0}^{N}X_1(iT_S)\cdot h_{15}\left((j-i)T_S\right)\sum_{j=0}^{N}X_2(iT_S)\cdot h_{21}\left((j-i)T_S\right)\cdot \mathrm{int}\left(Y_6(iT_S)\right)},$$

где $Y_1(iT_S)$ – текущее значение расхода перегретого пара; $Y_5(iT_S)$ – текущее значение температуры перегретого пара; $Y_6(iT_S)$ – текущее значение давления перегретого пара; $X_1(iT_S)$ – элементы массива текущих значений расхода топлива; $X_2(iT_S)$ – элементы массива текущих значений расхода воды; $h_{15}(jT_S)$ – элементы массива весовых коэффициентов по каналу влияния расхода топлива на температуру перегретого пара; $h_{21}(jT_S)$ – элементы массива весовых коэффициентов по каналу влияния расхода питательной воды на расход перегретого пара; $\mathrm{int}Y_6(iT_S)$ – энтальпия перегретого пара при текущем значении давления перегретого пара; N – длина массивов программного обеспечения.

На рис. 1 представлены результаты имитации работы виртуального прибора для измерения эффективности работы котлоагрегата по эталонной модели.

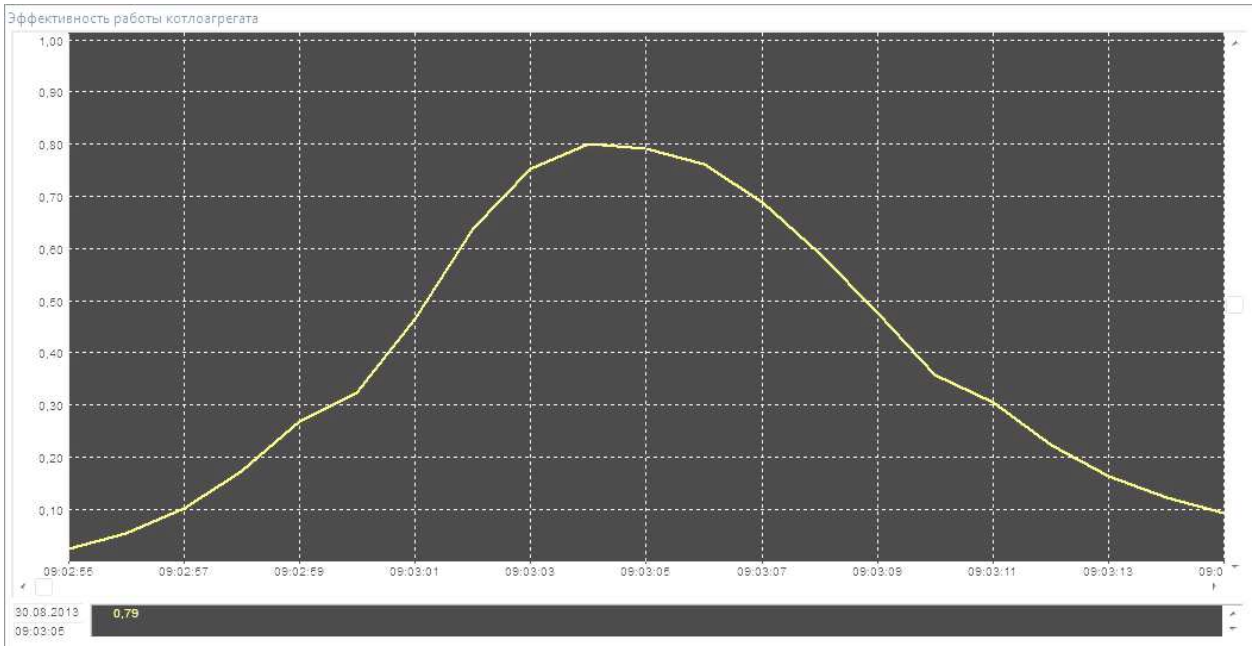


Рис. 1. Тренд эффективности работы котлоагрегата, $Э_К(t)$

Аналогично, в основу программно-аппаратного прибора для измерения эффективности работы турбоагрегата (рис. 2) положена динамическая модель критерия управления турбогенератором [1], которая имеет вид:

$$Э_Т(iT_S)=\frac{W(iT_S)}{\sum_{j=0}^{N}X(iT_S)\cdot h_{11}\left((j-i)T_S\right)},$$

где $X(j)$ – массив текущих значений расхода перегретого пара; $W(iT_S)$ – текущее значение активной мощности турбогенератора; $h_{11}(jT_S)$ – массив динамической характеристики турбогенератора.

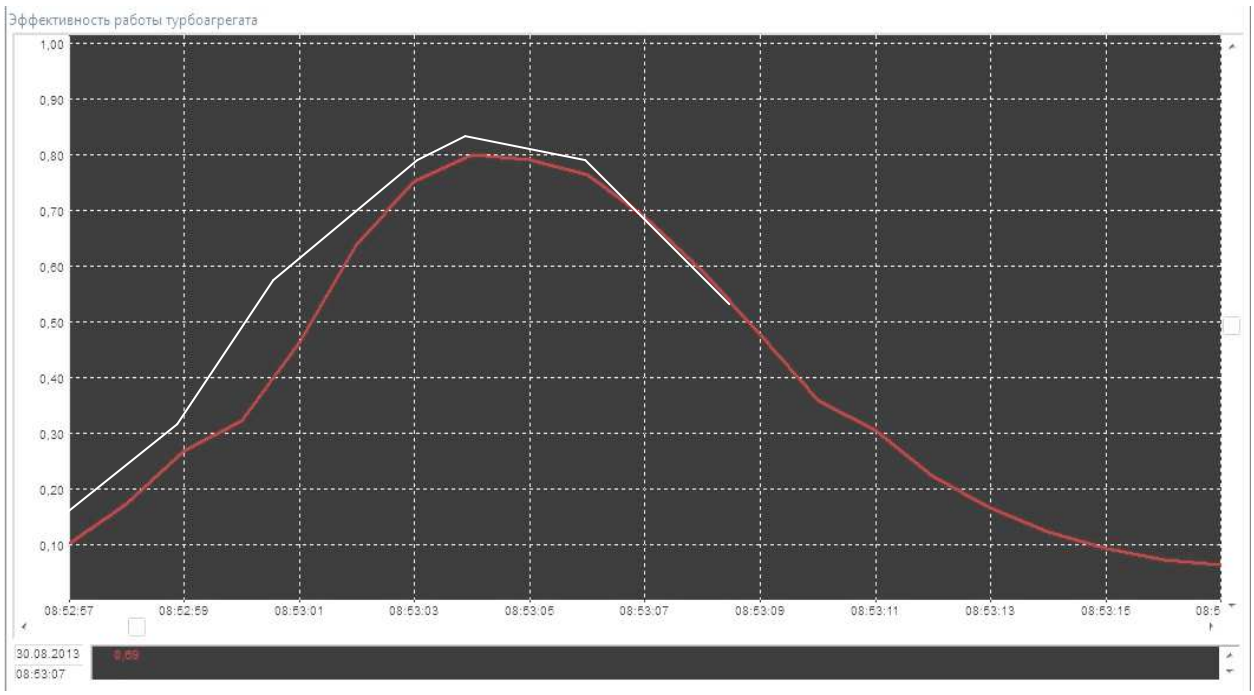


Рис. 2. Тренд эффективности работы турбоагрегата, $Э_Т(t)$

На рис. 2 представлены результаты имитации работы виртуального прибора для измерения эффективности работы турбоагрегата по эталонной модели (2). Предлагаемые программно-аппаратные приборы позволяют реализовать адаптивное управление эффективностью работы энергоблоком, состоящим из последовательного соединения котлоагрегата и турбины с помощью алгоритма идентификации положения рабочей точки энергоблока (рис. 3). Программа алгоритма состоит из следующих блоков: блок 1 реализации эталонной модели объекта управления; блок 2 реализации измерения текущих значений параметров объекта управления; блок 3, который реализует вычисление статистических характеристик измеряемых величин; блок 4 для идентификации величины и знака производной и блок 5 для вычисления рекомендаций по управлению. Алгоритм работает следующим образом. Блоками 2 измеряются текущие значения $X_1(t)$ и $Э_{ЭБ}(t)$ и накапливаются массивы $X_1(iT_S)$ и $Э_{ЭБ}(t)$ длиной N. В блоке 3 производится оценка статистических характеристик этих массивов:

$$M_X = \frac{1}{N+1}\sum_{i=0}^{N} X(iT_S); \quad M_y = \frac{1}{N+1}\sum_{i=0}^{N} y(iT_S) \quad \text{и} \quad D[X] = M[|X - M[X]|^2].$$

При этом используются центрированные значения измеряемых величин $\Delta x_i = x_i - Mx$ и $\Delta y_i = y_i - My$, где Δx_i, Δy_i – центрированные значения входного и выходного параметров.

Там же, в блоке 3, вычисляются оценки автокорреляционной функции

$$K_{X_1X_1}(jT_S) = \frac{1}{N-j}\sum_{i=0}^{N} X_1(iT_S)\cdot X_1(iT_S + jT_S)$$

и взаимокорреляционной функции

$$K_{X_1Э}(jT_S) = \frac{1}{N-j}\sum_{i=0}^{N} X_1(iT_S)\cdot Э_{ЭБ}(iT_S + jT_S).$$

В блоке 4 производится оценка модуля градиента в направлении изменения управляющего воздействия $X_1(t)$:

$$\mathrm{Grad}X_1(jT_S) \approx \frac{K_{XЭ}(0)}{K_{X_1X_1}(0)}.$$

Блок 5 предназначен для выработки рекомендации по изменению переменной $X_1(t)$ в сторону достижения максимального значения эффективности работы энергоблока:

$$X_1(jT_S) = X(j-1) + K_{H1}\frac{K_{XЭ}(0)}{K_{X_1X_1}(0)},$$

где K_{H1} – настроечный коэффициент алгоритма управления, величина которого обычно выбирается в диапазоне: $K_{H1} \cong \pm 3\cdot\sqrt{\sum_{i=0}^{N}(X_1(iT_S) - M_{X_1})^2}$.

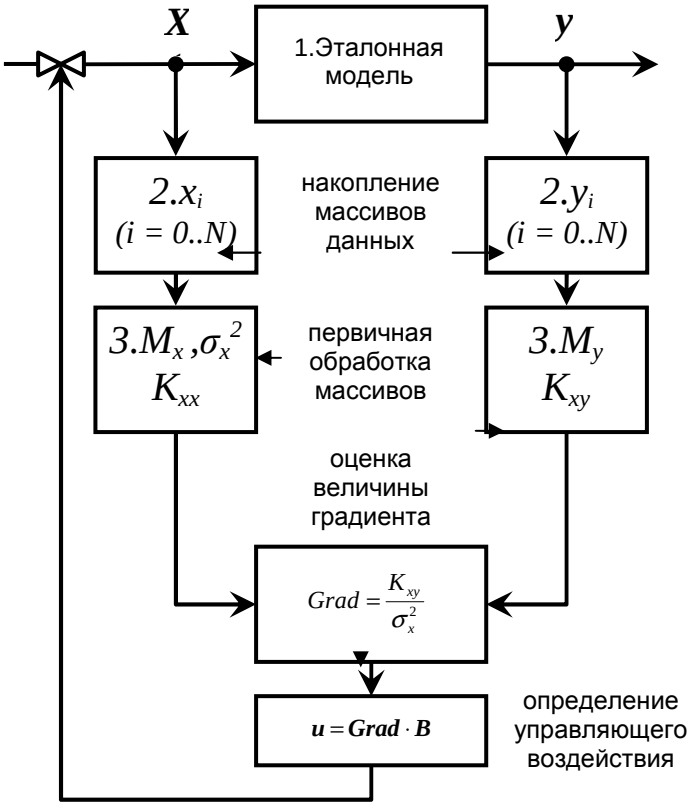


Рис. 3. Алгоритм идентификации положения рабочей точки энергоблока

Поскольку управляющие параметры являются статистически независимыми переменными, то движение в сторону достижения максимума эффективности энергоблока по переменной $X_2(t)$ проводится по тому же алгоритму. Проверка работоспособности алгоритма проводилась методом имитационного моделирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Капля, Е.В.* Моделирование процессов управления в интеллектуальных измерительных системах / Е.В. Капля, В.С. Кузеванов, В.П. Шевчук. – М: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 512 с.

2. *Шевчук, В.П.* Моделирование метрологических характеристик интеллектуальных измерительных приборов и систем / В.П. Шевчук. – М: ФИЗМАТЛИТ, 2011. – 320 с.

3. *Грошев, Н.А.* Способ контроля эффективности работы котлоагрегата / Н.А. Грошев, В.С. Кузеванов, П.П. Раменский, В.П. Шевчук // Приборы и системы. Управление. Контроль. Диагностика. – 2007. – № 6. – С. 53-57.

ГОРИЗОНТАЛЬНО-ОСЕВОЕ ВЕТРОКОЛЕСО С ВАРЬИРУЕМЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Капля Е.В. – канд. физ.-мат. наук, доцент
филиала МЭИ в г. Волжском

Горизонтально-осевые ветроколеса (ВК) типа Loopwing [1-3] обладают несколькими преимуществами по сравнению с пропеллерными ВК:

– способны начинать вращение при скоростях ветра около полутора м/с;

– характеризуются сравнительно низким уровнем шума;

– имеют меньший диаметр по сравнению с пропеллерными ВК такой же мощности;

– обладают сравнительно высокой энергетической производительностью при заданном диаметре ВК и заданной скорости ветра.

Оптимальные характеристики ветроколёс типа Loopwing неизвестны. Совершенствование ВК – перспективная задача. Аэродинамический расчёт переходных процессов вращающегося ВК с гибкими лопастями сложной формы с достаточной точностью в настоящее время не представляется возможным.

Экспериментальные исследования и оптимизацию аэродинамических характеристик ВК целесообразно выполнять с использованием регулируемых и видоизменяемых элементов ступиц и лопастей. Варьирование характеристик ВК в процессе эксперимента даёт возможность получить зависимости характеристик процесса вращения ВК от характеристик элементов ВК.

Вал ВК, разработанного в ВФ МЭИ, представляет собой стальной стержень с резьбой М8. Ветроколесо содержит две ступицы (рис. 1-3).

Ступицы можно перемещать вдоль вала и закреплять на различном расстоянии друг от друга и от опор. Каждую ступицу можно поворачивать относительно другой ступицы и фиксировать в заданном положении гайками на валу. Продольный разрез вала, ступиц и лопасти ВК представлен на рис. 2.

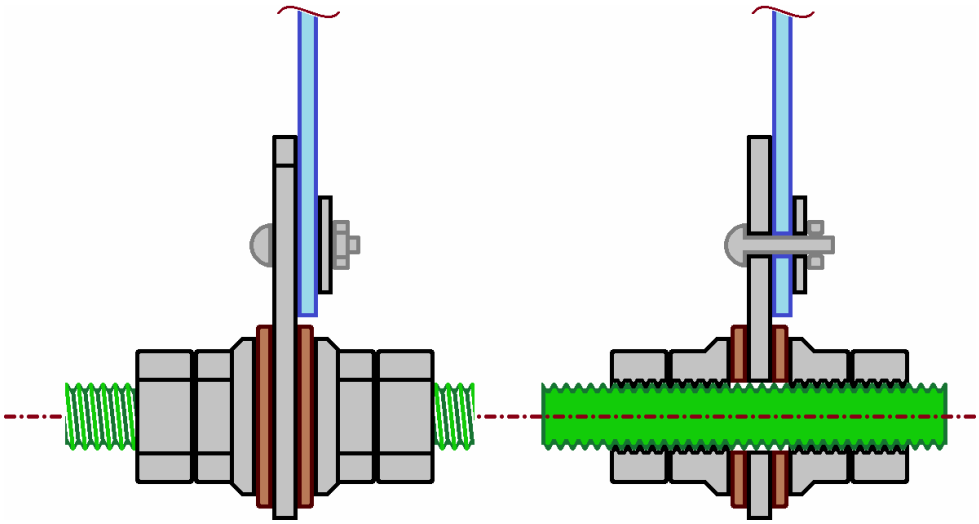


Рис. 1. Ступица: вид сбоку и в продольном разрезе

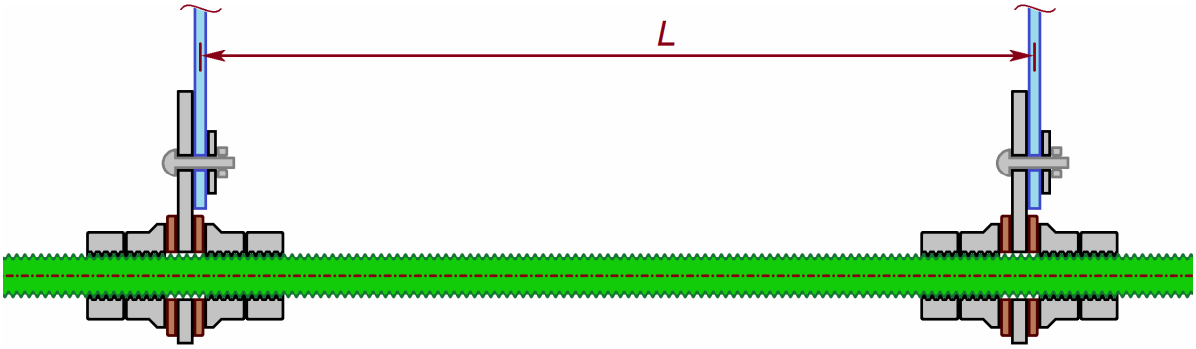


Рис. 2. Продольный разрез ВК

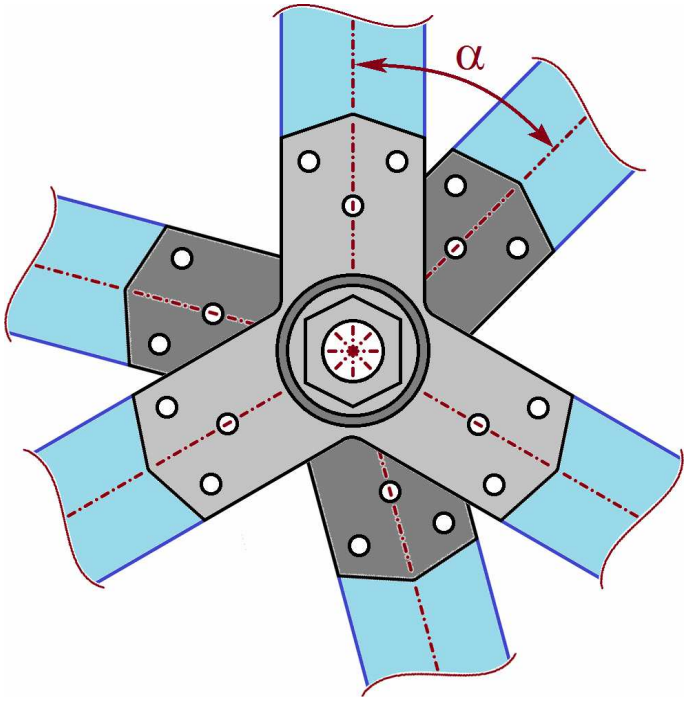


Рис. 3. Ступицы ветроколеса (вид спереди)

Концы лопастей прикреплены к ступицам винтами и гайками М3. Лопасти разработанного ВК изготовлены из листа пластика ПВХ толщиной 1 мм. Лопасти имеют форму полос длиной $a = 500$ мм и шириной $b = 40$ мм. Варьируя расстояние L между ступицами и относительный угол α поворота ступиц (рис. 2-4) можно изменять кривизну лопастей. Ступицы имеют три алюминиевых лепестка, которые можно изгибать совместно с лопастями. Форма лопастей влияет на аэродинамические свойства ВК.

Рис. 4. Ветроколесо, разработанное в ВФ МЭИ

Разработанная в ВФ МЭИ экспериментальная установка предназначена для исследований аэродинамических характеристик ВК и позволяет варьировать указанные параметры ВК в широких пределах: $L \in [1; 300]$ мм, $\alpha \in [0; 360]^\circ$. Варьируя параметры L и α можно экспериментально определить оптимальные комбинации значений параметров, при которых достигается наибольший вращающий момент $M(\lambda, L, \alpha)$ и максимум коэффициента $C_p(\lambda, L, \alpha)$ мощности ВК при различных значениях быстроходности λ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. http://www.loopwing.co.jp/ – Сайт компании Loopwing.
2. 小型風車の安全な利用に向けて　ユーザー側からみた問題点
3. 中学校理科　2008 年 前期 no.186　教科研究　理科

АНАЛИЗ ЗАВИСИМОСТИ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ПРОСТОЯ РОТОРА ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА ОТ ДЛИНЫ ОТРЕЗКА ТЕРМИНАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ СЕРВОПРИВОДОМ

Капля Е.В. – канд. физ.-мат. наук, доцент
филиала МЭИ в г. Волжском

Терминальное управление – управление, цель которого заключается в переводе объекта управления в заданное конечное состояние в заданный момент времени [1-3]. Временной отрезок терминального управления может задаваться в явном виде либо определяться моментом выполнения заданных краевых условий на координаты траектории движения объекта. При заданных энергетических ресурсах исполнительных элементов системы минимально-допустимое значение T длины отрезка зависит от начальных и конечных условий на концах назначенной траектории движения. От величины T зависят требуемые значения управляющих сил, осуществляющих движение.

В основе известной [2, 4] математической модели сервопривода постоянного тока – система дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} J\dfrac{d^2\alpha(t)}{dt^2} = k_m \cdot i(t) - M_c(t); & (1) \\ L\dfrac{di(t)}{dt} + R\cdot i(t) = u(t) - k_\omega \dfrac{d\alpha(t)}{dt}, & (2) \end{cases}$$

где J – суммарный момент инерции якоря ДПТ и механизма; $\alpha(t)$ – угол поворота якоря ДПТ; $i(t)$ – ток в цепи якоря; k_m – коэффициент пропорциональности, связывающий ток в цепи якоря и развиваемый двигателем вращающий момент; $k_m \cdot i(t) = M_{\text{ВР}}(t)$ – вращающий момент, создаваемый ДПТ; n – передаточное число редуктора сервопривода; $M_c(t)$ – момент сопротивления нагрузки, приведенный к валу двигателя; $u(t)$ – напряжение питания обмотки возбуждения (управляющее напряжение); L – индуктивность цепи якоря; R – активное сопротивление цепи якоря; k_ω – коэффициент противоЭДС; $\omega(t)$ – угловая скорость вала ДПТ.

При жёсткой механической связи вала двигателя и ведомого вала нагрузки посредством зубчатых колёс редуктора можно принять:

$$\theta(t) = \alpha(t)/n; \quad \psi(t) = \omega(t)/n; \quad \xi(t) = \varepsilon(t)/n,$$

где $\theta(t)$, $\psi(t)$, $\xi(t)$ – угол поворота, угловая скорость, угловое ускорение вала нагрузки соответственно; $\varepsilon(t)$ – угловое ускорение якоря ДПТ.

Структурная схема автоматизированной системы управления сервоприводом с блоком терминального управления (БТУ) представлена на рис. 1. На вход БТУ подаются заданные конечные значения фазовых координат вала нагрузки: $\theta_{\text{зад}}(T_0 + T) = \hat{\theta}$; $\psi_{\text{зад}}(T_0 + T) = \hat{\psi}$; $\xi_{\text{зад}}(T_0 + T) = \hat{\xi}$.

Измеренные значения фазовых координат сравниваются с заданными. БТУ вычисляет и формирует управляющий сигнал $u(t)$ на основе выбранного закона терминального управления.

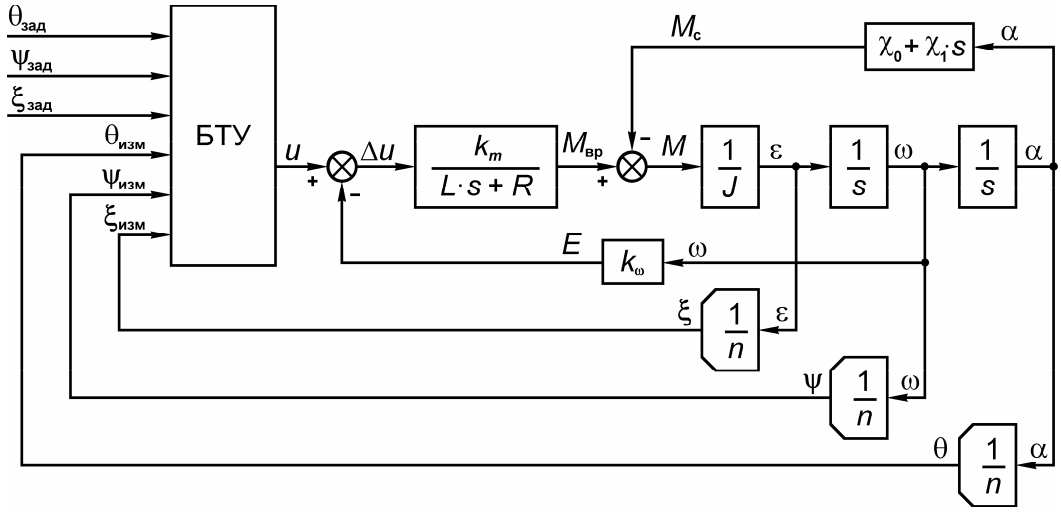


Рис. 1. Структурная схема терминальной системы управления сервоприводом

Закон терминального управления [5] при трёх конечных условиях применительно к сервоприводу на основе ДПТ представим в следующем виде:

$$u(t,T) = \begin{cases} k_u n\left(\dfrac{12\cdot\left(\widehat{\theta}-\theta(t)\right)}{\left(\widehat{T}-t\right)^2} - \dfrac{6\cdot\left(\widehat{\psi}+\psi(t)\right)}{\widehat{T}-t} + \widehat{\xi}\right) & \text{при } t\in\left[T_0;T_0+T\right], \\ 0 \quad \text{в остальных случаях,} \end{cases} \qquad (3)$$

где $\widehat{T} = T_0 + T + \Delta T$ – момент времени окончания переходного процесса; T_0 – момент времени начала процесса управления; T – длина отрезка терминального управления (продолжительность процесса управления); ΔT – жёсткость управления (временной интервал между ведущей и ведомой фазовыми точками); $\Delta T << T$; k_u – коэффициент пропорциональности между напряжением на обмотке ДПТ и угловым ускорением ротора; $k_u = J\cdot R/k_m$.

Введём обозначения: t_p – момент времени начала вращения ротора ДПТ; $t_p = T_0 + \tau$; τ – продолжительность простоя ротора ДПТ от начала управления до начала разгона; T_p – опорное значение длины отрезка терминального управления, являющееся границей области $T \le T_p$ запуска двигателя в момент времени T_0.

Вращение ротора ДПТ начинается при выполнении условия $\left|k_m\cdot i(t_p)\right| > \chi_0$, где χ_0 – момент трогания. Пусковой ток определяется из равенства пускового вращающего момента и момента трогания χ_0. Пусковому току соответствует пусковое напряжение U_p. В момент начала разгона якоря $\left|u(t_p,T)\right| \ge U_p$ пусковое напряжение ДПТ параллельного возбуждения равно $U_p = R\cdot\chi_0/k_m$.

При $T \le T_p$ выполняется условие $\left|u\left(T_0, T \le T_p\right)\right| \ge U_p$. В частности, $\left|u\left(T_0, T_p\right)\right| = U_p$. Полярность напряжения при пуске ДПТ определяется знаком разности угла поворота: $\operatorname{sign}(u(T_0, T)) = \operatorname{sign}\left(\hat{\theta} - \theta(T_0)\right)$, следовательно,

$$\operatorname{sign}\left(\hat{\theta} - \theta(T_0)\right) \cdot u\left(T_0, T_p\right) = U_p. \tag{4}$$

Уравнение (4) можно записать с учётом формулы (3) при $\psi(T_0) = 0$:

$$\operatorname{sign}\left(\hat{\theta} - \theta(T_0)\right) k_u n \left(\frac{12 \cdot \left(\hat{\theta} - \theta(T_0)\right)}{\left(T_p + \Delta T\right)^2} - \frac{\hat{\psi}}{T_p + \Delta T} + \hat{\xi} \right) = U_p. \tag{5}$$

Решив уравнение (5) относительно T_p, получаем формулу

$$\left(T_p\right)_{1,2} = \frac{b_p \pm \sqrt{b_p^2 - 48 a_p \left(\hat{\theta} - \theta(T_0)\right)}}{2a_p} - \Delta T, \tag{6}$$

где $a_p = \hat{\xi} - \operatorname{sign}\left(\hat{\theta} - \theta(T_0)\right)\xi_{sp}$; $b_p = 6\hat{\psi}$; $\xi_{sp} = \dfrac{U_p}{k_u n} = \dfrac{\chi_0}{Jn}$.

Наличие двух положительных корней $\left(\left(T_p\right)_1 > 0\right) \cap \left(\left(T_p\right)_2 > 0\right)$ физически означает существование двух типов фазовых траекторий в пространстве текущих фазовых координат $\{\theta, \psi, \xi\}$ при заданных граничных условиях и характеристиках сервопривода. Причём оба типа траекторий начинаются в заданной начальной точке $(\theta(T_0); \psi(T_0); \xi(T_0))$ и заканчиваются в заданной конечной точке $\left(\hat{\theta}; \hat{\psi}; \hat{\xi}\right)$, отличаясь направлением движения в начальный момент времени. Траектории первого типа имеют начальное направление движения на конечную точку. Таким траекториям соответствует равенство

$$\operatorname{sign}(u(T_0, T)) = \operatorname{sign}\left(\hat{\xi} - \xi(T_0)\right) = \operatorname{sign}\left(\hat{\theta} - \theta(T_0)\right),$$

и они получаются при $T \le \min\left(T_p\right)_{1,2}$. Траектории второго типа имеют противоположное начальное направление движения. Таким траекториям соответствует другая полярность напряжения в момент запуска ДПТ и равенство

$$\operatorname{sign}(u(T_0, T)) = \operatorname{sign}\left(\hat{\xi} - \xi(T_0)\right) = -\operatorname{sign}\left(\hat{\theta} - \theta(T_0)\right).$$

Эти траектории получаются при $T > \min\left(T_p\right)_{1,2}$.

Область фазового пространства конечных условий $\left\{\hat{\theta}, \hat{\psi}, \hat{\xi}\right\}$, в которой существует только один положительный корень $\left(\left(T_p\right)_1 > 0\right) \oplus \left(\left(T_p\right)_2 > 0\right)$, ограничена условиями: $\left(\hat{\theta} > \theta(T_0)\right) \cap \left(\hat{\xi} < \xi_{sp}\right) \cup \left(\hat{\theta} < \theta(T_0)\right) \cap \left(\hat{\xi} > -\xi_{sp}\right)$. В частности, этим условиям удовлетворяет $\hat{\xi} = 0$ при любых значениях $\hat{\psi}$, $\hat{\theta}$, $\theta(T_0)$, χ_0, J, n.

В той области, где $(T_p)_1$ и $(T_p)_2$ – положительны, в качестве T_p примем минимальное из них. Численные эксперименты проведены с моделью сервопривода, обладающего характеристиками: $L = 0{,}01\,\text{Гн}$; $R = 2\,\text{Ом}$; $k_m = 0{,}08\,\text{Н}\cdot\text{м/А}$; $k_\omega = 0{,}2\,\text{В}\cdot\text{с/рад}$; $J = 1{,}5\,\text{кг}\cdot\text{м}^2$; $n = 10$; $\chi_1 = 0{,}1\,\text{Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с/рад}$; $\chi_0 = 0{,}2\,\text{Н}\cdot\text{м}$ при следующих начальных и конечных условиях: $\psi(T_0) = \omega(T_0) = 0$; $\theta(T_0) = 1°$; $\hat{\theta} = 4°$; $\hat{\psi} = \hat{\omega} = 0$; $\hat{\xi} = \hat{\varepsilon} = 0$. При моделировании были приняты: $t_0 = 0$; $T_0 = 1\,\text{с}$; $\Delta T = 0{,}01\,\text{с}$; $\Delta t = 10^{-3}\,\text{с}$. Указанным характеристикам сервопривода и граничным условиям соответствует $T_p \approx 6{,}855\,\text{с}$.

В результате численного решения системы уравнений (1)-(3) получено семейство кривых, соответствующих закону терминального управления (3). Графический вид сигналов $u(t)$ управления при различных значениях T представлен на рис. 2. Семейство кривых соответствует множеству решений системы уравнений (1)-(3) для $T = 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10$.

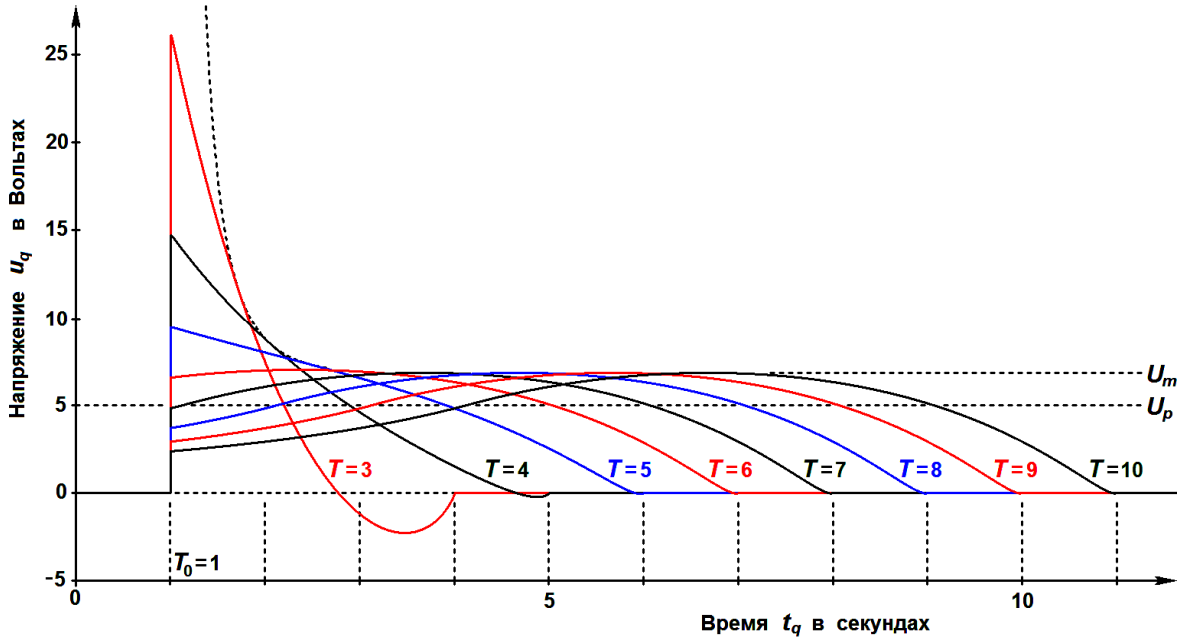


Рис. 2. Графики зависимости напряжения от времени

Зависимость $\tau(T)$ продолжительности простоя ротора от длины отрезка терминального управления представлена на рис. 3.

При любом значении T ток в цепи якоря ДПТ в момент времени T_0 меньше пускового тока: $i(T_0, T) < i_p$ из-за электромагнитной инерционности обмоток и полюсов ДПТ. Поэтому при любом значении T существует некоторая продолжительность $\tau(T) > 0$ простоя ротора ДПТ.

При $T \le T_p$ выполняется условие: $|u(T_0 \le t \le T_0 + \tau(T), T)| \ge U_p$. Следовательно, при $T \le T_p$ простой ротора полностью обоснован электромагнитной инерционностью ДПТ. Электромагнитная постоянная времени $T_L = L/R$ цепи

якоря ДПТ гораздо меньше механической постоянной времени $T_M = J / \chi_1$ якоря и гораздо меньше T_p. Пренебрегая продолжительностью намагничивания полюсов, зависимость $\tau(T)$ можно приближённо аппроксимировать кусочно-линейной функцией $\tau''(T)$:

$$\tau''(T) = \left| \begin{array}{ll} 0, & \text{если} \quad T \le T_p; \\ T - T_p, & \text{если} \quad T > T_p. \end{array} \right. \qquad (7)$$

На самом деле: $0 < \tau(T) << T$ при $T \le T_p$. При любом T величина $\tau(T)$ больше величины $\tau''(T)$, то есть выражение (7) занижает продолжительность простоя ротора.

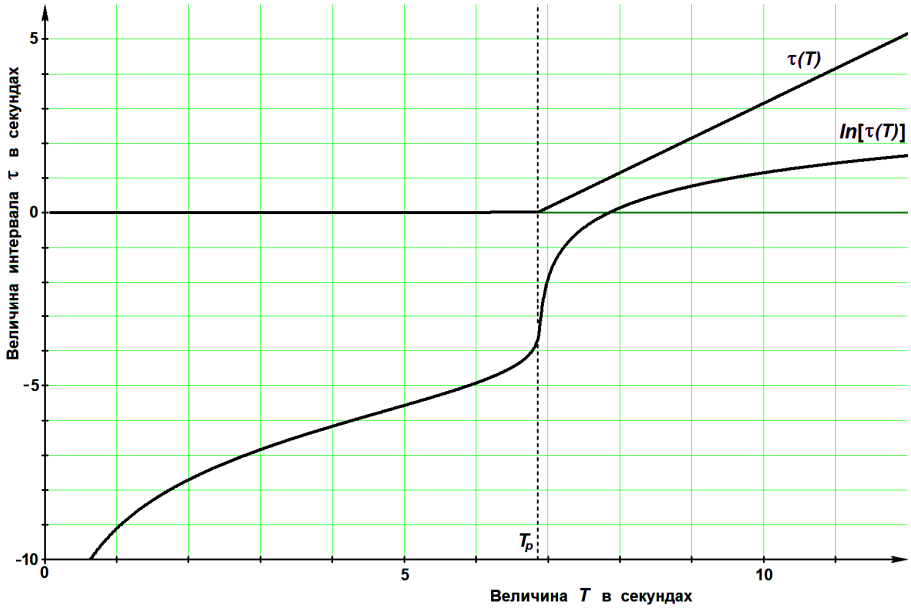


Рис. 3. Графики зависимости $\tau(T)$ и $\ln[\tau(T)]$

Заключение

Зависимость $\tau(T)$ продолжительности простоя ротора от длины отрезка терминального управления сервоприводом на основе ДПТ имеет монотонно-возрастающий вид. Если $T \to 0$, то $\tau \to 0$. При $T \to \infty$ наблюдается равномерное увеличение τ. Найденная величина T_p является правой границей области пренебрежимо малых значений $\tau(0 < T \le T_p)$ и левой границей области линейно-возрастающей зависимости $\tau(T > T_p)$. Полученную формулу (6) можно использовать для вычисления T_p, а формулу (7) – для оценки величины τ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Батенко, А.П.* Системы терминального управления / А.П. Батенко. – М.: Радио и связь, 1984. – 160 с.

2. *Крутько, П.Д.* Обратные задачи динамики в теории автоматического управления / П.Д. Крутько. – М.: Машиностроение, 2004. – 576 с.

3. *Крутько, П.Д.* Терминальное управление движением лагранжевых систем / П.Д. Крутько // Известия академии наук. Теория и системы управления. – 2002. – № 6. – С. 7-25.

4. *Зенкевич, С.Л.* Основы управления манипуляционными роботами / С.Л. Зенкевич, А.С. Ющенко. – М.: МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2004. – 480 с.

5. *Батенко, А.П.* Управление конечным состоянием движущихся объектов / А.П. Батенко. – М.: Советское радио, 1977. – 256 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ МИКРОКЛИМАТОМ ТЕПЛИЦЫ

Мокичева Ю.В. – канд. техн. наук, доцент
филиала МЭИ в г. Волжском
Кузнецов А.А. – студент филиала МЭИ в г. Волжском

В настоящее время существует большое количество теплиц, в которых выращиваются различные овощные, ягодные, цветочные культуры. Это делает необходимым искусственное создание определённых климатических условий, называемых микроклиматом, и поддержание их на заданном уровне в независимости от ночных и сезонных изменений условий внешней среды. Для организации непрерывного контроля и управления параметрами, определяющими микроклимат, требуется создание автоматизированной системы, выполняющей данные функции.

Для поддержания заданного микроклимата в теплице требуется контролировать и регулировать несколько параметров, а именно: температуру и влажность воздуха, концентрацию углекислого газа. Схема процесса управления микроклиматом представлена на рис. 1. Повышение температуры до требуемого значения осуществляется с помощью электрокалориферов (поз. 9, 10). Распыляемая вода (поз. 11, 12) непосредственно в теплице увеличивает влажность воздуха. Вытяжные вентиляторы (поз. 13, 14) служат для уменьшения уровня углекислого газа, а также для уменьшения температуры. Контроль и регулирование параметров в теплице ведётся в двух частях с помощью регуляторов (поз. 1, 2). На рис. 1 представлена схема процесса управления.

Объектом управления является теплица, состоящая условно из двух частей. В данном объекте управления, структурная схема которого представлена на рис. 2, шесть входных параметров (расходы воды $Q_{в1}$ и $Q_{в2}$, мощности нагревательных элементов $N_{н.э1}$ и $N_{н.э2}$, мощности вентиляторов $N_{вент1}$ и $N_{вент2}$ в первой и во второй частях соответственно) и 6 выходных параметров (относительные влажности воздуха M_1 и M_2, температуры воздуха T_1 и T_2, концентрации углекислого газа $C_{у.г1}$ и $C_{у.г2}$ в первой и во второй частях соответственно).

После проведения анализа объекта управления были построены 32 канала управления.

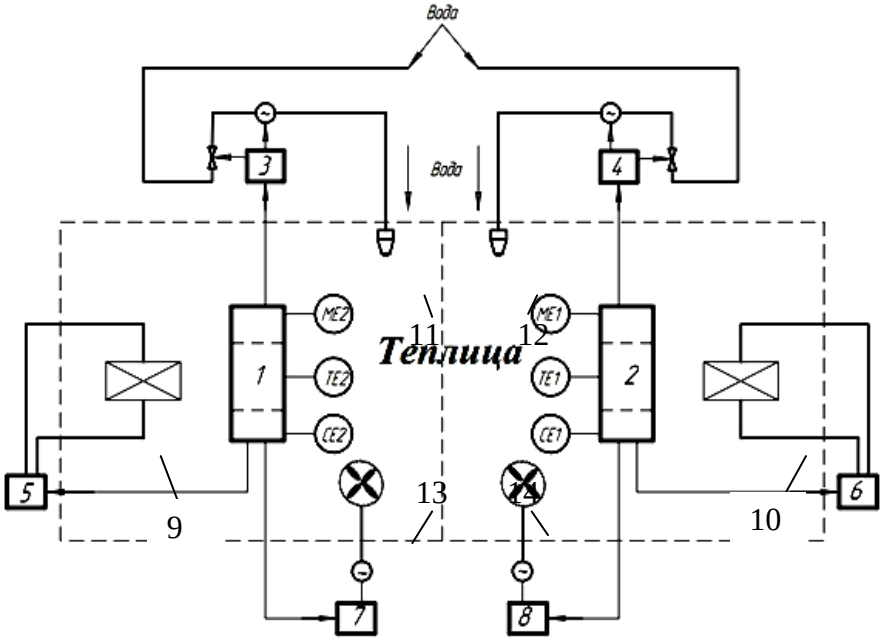


Рис. 1. Схема процесса управления:
1, 2 – регуляторы; 3, 4, 5, 6, 7, 8 – блоки питания задвижек, электродвигателей и нагревательных элементов; 9, 10 – электрокалориферы; 11, 12 – распылители; 13, 14 – вытяжные вентиляторы; *ME* – датчик влажности; *TE* – датчик температуры; *CE* – датчик концентрации углекислых газов

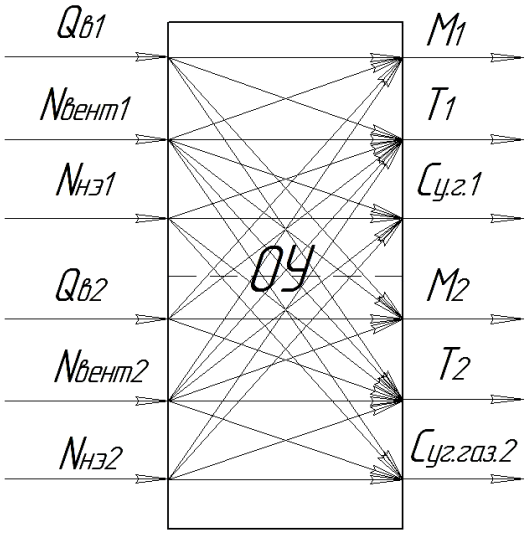


Рис. 2. Структурная схема объекта управления:
$Q_{в1}$, $Q_{в2}$ – расходы воды; $N_{н.э1}$, $N_{н.э2}$ – мощности нагревательных элементов; $N_{вент1}$, $N_{вент2}$ – мощности вентиляторов; M_1, M_2 – относительные влажности воздуха; $C_{у.г1}$, $C_{у.г2}$ – концентрации углекислых газов; T_1, T_2 – температуры воздуха

На рис. 3 представлена структурная схема системы управления микроклиматом теплицы. В системе текущие значения регулируемых параметров сравниваются с заданными значениями; соответствующие сигналы рассогласования поступают на вход ПИ-регуляторов, которые в свою очередь изменяют

управляющие воздействия. Для расчёта настроек ПИ-регуляторов была рассмотрена устойчивость системы при ограничении на частотный показатель колебательности.

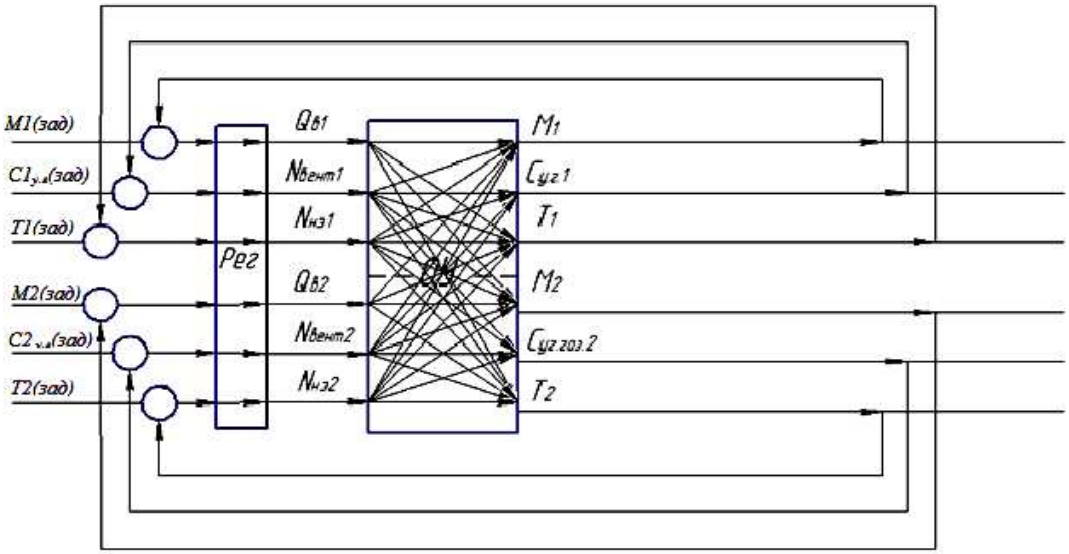


Рис. 3. Структурная схема САУ теплицей

В таблице приведены результаты математического моделирования объекта управления и системы регулирования.

Таблица

Результаты математического моделирования

КАНАЛЫ	Коэффициенты ОУ			Коэффициенты регуляторов	
	k_{mod}	T_{mod}	τ_{mod}	kr	Tu
Q1-M1	223,0	9,5	4,7	0,004	17,6
Nнаг1-M1	–0,0015	37,9	44,2	–	–
Nвен1-M1	–0,01	13,5	0,7	–	–
Q2-M1	56,0	17,6	0,9	–	–
Nнаг2-M1	–0,0008	40,6	55,1	–	–
Nвен2-M1	–0,067	18,9	5,3	–	–
Nнаг1-C1	0,00015	64,9	110,4	–	–
Nвен1-C1	–0,014	13,5	3,4	78,0	25,1
Nнаг2-C1	0,00014	70,4	159,6	–	–
Nвен2-C1	–0,012	14,9	3,5	–	–
Q1-T1	–33,0	11,1	7,4	–	–
Nнаг1-T1	0,001	83,9	26,2	923,4	155,4
Nвен1-T1	–0,03	67,7	42,3	–	–
Q2-T1	–27,0	11,1	11,6	–	–
Nнаг2-T1	0,001	94,7	4,5	–	–
Nвен2-T1	–0,04	10,8	13,5	–	–

Для упрощения синтеза системы воздействия по неосновным каналам управления были представлены в виде возмущений на объект управления, в результате чего схема на рис. 3 была преобразована в схему с компенсацией возмущений, изображённую на рис. 4 (схема для первой половины теплицы).

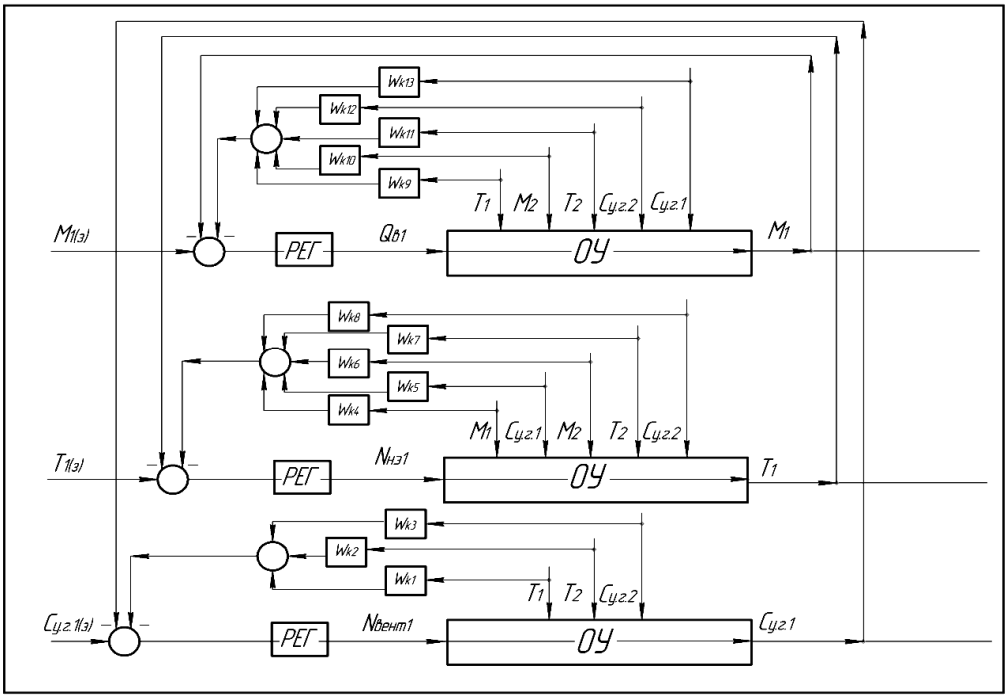


Рис. 4. Структурная схема с компенсацией по отклонению

На рис. 5 представлены графики переходных характеристик системы управления (1 – без учета возмущения; 2 – с компенсацией возмущений).

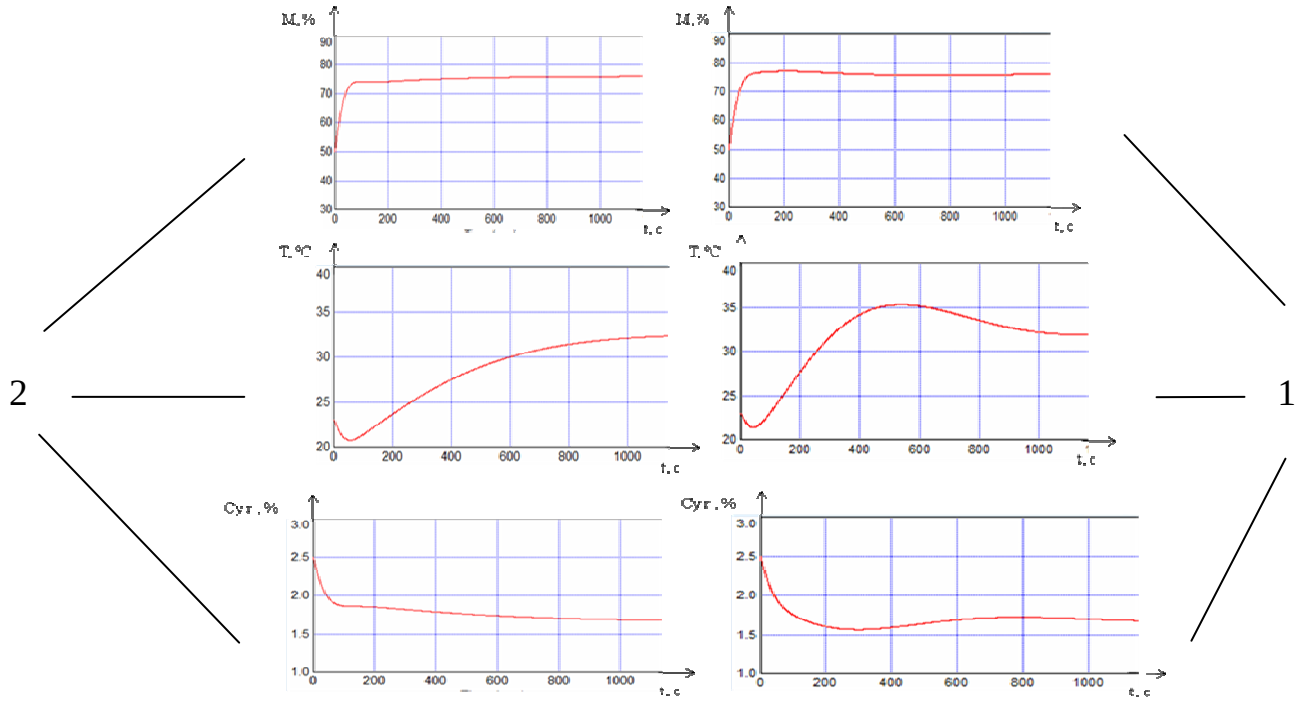


Рис. 5. Графики переходных характеристик

АНАЛИЗ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭНДОГАЗОГЕНЕРАТОРОМ

Мокичева Ю.В. – канд. техн. наук, доцент
филиала МЭИ в г. Волжском
Стружинская Ю.А. – студентка филиала МЭИ в г. Волжском

В большинстве случаев проектирование системы управления производится в предположении, что статические и динамические свойства объекта управления и всех элементов системы известны, не зависят от изменений внешних условий и постоянны во времени. Однако в действительности характеристики объекта и некоторых элементов системы бывают известны лишь приближенно, так как они изменяются в результате физического старения и под действием внешних условий. Благодаря запасам устойчивости система управления, спроектированная для определенных расчетных характеристик, может удовлетворительно управлять объектом и в том случае, когда его фактические характеристики несколько отличны от расчетных. Однако если статические и динамические свойства системы изменяются в широком диапазоне, то управление объектом с помощью простейшей системы с постоянными параметрами и структурой может оказаться неудовлетворительным, либо вообще невозможным вследствие потери устойчивости. Для таких случаев необходимы системы управления с изменяющимися свойствами.

Процесс изменения свойств системы, позволяющий ей достигнуть наилучшего или, по крайней мере, удовлетворительного функционирования в изменяющихся условиях, называется адаптацией. Системы, осуществляющие процесс адаптации, называются адаптивными (самонастраивающимися) системами.

Примером самонастраивающейся системы является система управления эндогазогенератором, структурная схема которой представлена на рис. 1.

Основной задачей обеспечивающего алгоритма управления (блок 1) является подбор такого управляющего воздействия, то есть расхода газа и расхода воздуха, чтобы разогрев реторты до необходимой температуры и установление нужной влажности происходили за минимально короткое время.

В блоке 2 реализуется канал управления температурой реторты. Передаточная функция канала «расход газа – температура реторты» показывает динамику эндогазогенератора при изменении расхода газа и имеет вид:

$$W_{11}(p) = \frac{114{,}82}{4{,}6p+1} e^{-0{,}858p},$$

где k = 114,82 ч°С/м^3 – коэффициент усиления; T = 4,6 ч – постоянная времени; τ = 0,858 ч – время чистого запаздывания.

Блок 3 включает в себя канал управления влажностью и канал возмущения. Передаточная функция канала возмущения описывается усилительным звеном с коэффициентом усиления k = 4,467 и имеет вид:

$$W_{12}(p) = -4{,}467 \cdot 10^{-4}\ \%/°\text{C}.$$

Передаточная функция канала управления влажностью имеет вид:

$$W_{22}(p) = \frac{0{,}042}{1{,}3p+1} e^{-0{,}239p},$$

где k = 0,042 ч°С/м^3 – коэффициент усиления; T = 1,3 ч – постоянная времени; τ = 0,239 ч – время чистого запаздывания.

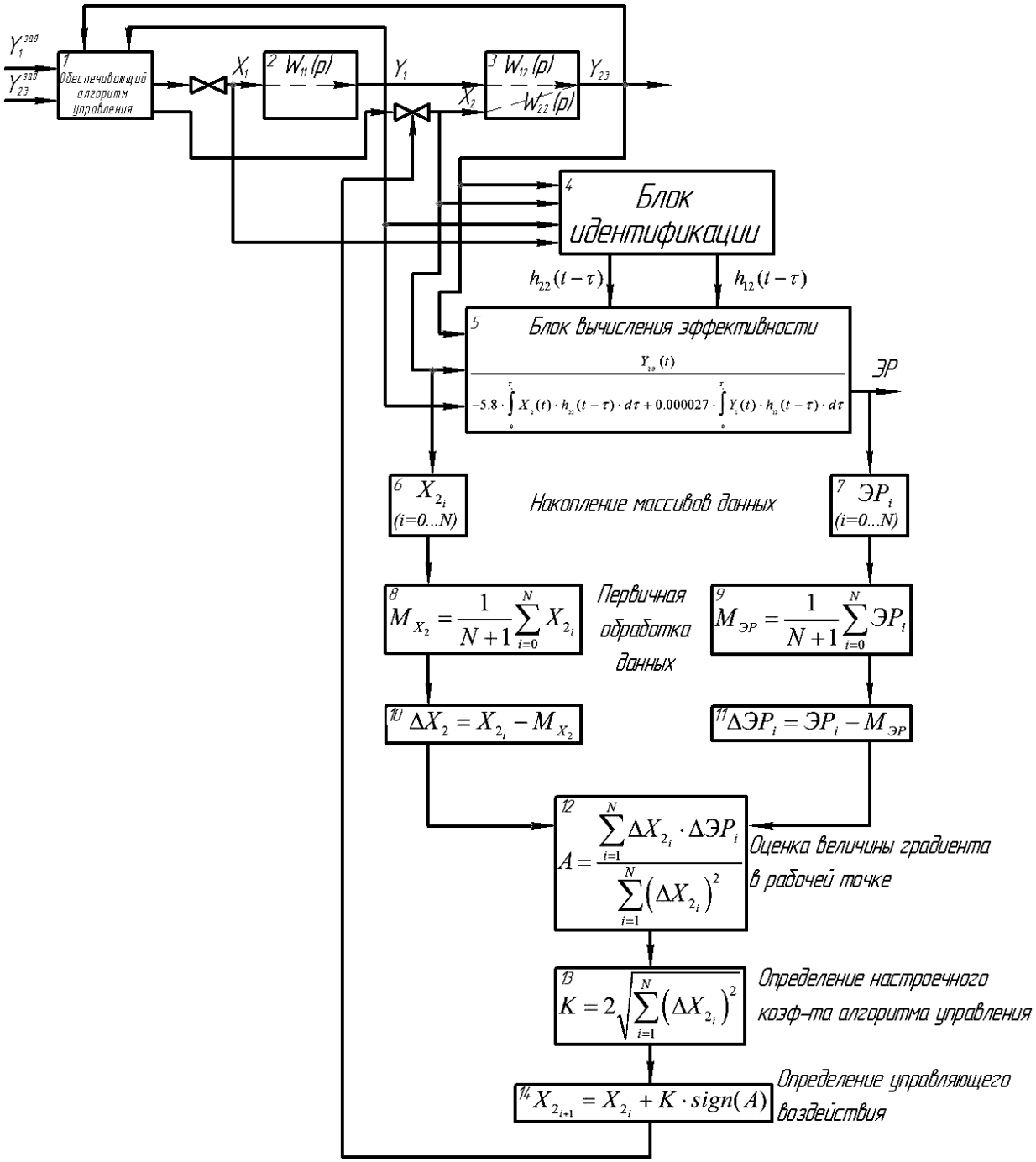


Рис. 1. Структурная схема алгоритма управления эндогазогенератором

Текущая идентификация динамических свойств объекта управления осуществляется в блоке идентификации 4.

В блок вычисления эффективности 5 поступает информация от датчиков температуры, расхода воздуха и влажности, идентификатора, по которой производится расчет эффективности работы. В блоках 6 и 7 накапливаются массивы значения расхода воздуха X_2 и эффективности *ЭР*. По этим данным в блоках 8 и 9 оцениваются величины математического ожидания по выражениям:

$$M_{X_2} = \frac{1}{N+1}\sum_{i=0}^{N} X_{2_i}; \qquad M_{ЭР} = \frac{1}{N+1}\sum_{i=0}^{N} ЭР_i,$$

где M_{X_2}, $M_{ЭР}$ – оценки величин математических ожиданий значения расхода воздуха и эффективности; X_{2_i}, $ЭР_i$ – значения экспериментальных данных; N – длина массивов данных.

В блоках 10 и 11 производится центрирование:

$$\Delta X_{2i} = X_{2_i} - M_{x_2}; \qquad \Delta ЭР_i = ЭР_i - M_{ЭР},$$

где ΔX_{2_i}, $\Delta ЭР_i$ – центрированные значения параметров.

Вычисление оценки величины градиента в рабочей точке осуществляется в блоке 12 с использованием выражения

$$A = \frac{\sum_{i=1}^{N} \Delta X_{2_i} \cdot \Delta ЭР_i}{\sum_{i=1}^{N} (\Delta X_{2_i})^2}.$$

Совершается шаг по переменной управления в направлении движения к экстремуму. В блоке 14 определяется направление движения по знаку градиента:

$$X_{2_{i+1}} = X_{2_i} + K \cdot \mathrm{sign}(A),$$

где $X_{2_{i+1}}$, X_{2_i} – значения управляющего воздействия на (i + 1)-м и i-м интервале идентификации; K – настроечный коэффициент алгоритма управления; sign (A) – функция, определяющая знак производной.

Настроечный коэффициент алгоритма управления K выбирается пропорционально оценке дисперсии управляющего воздействия и в блоке 13 вычисляется по выражению

$$K = 2 \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^{N} (\Delta X_{2_i})^2}.$$

где подкоренное выражение есть не что иное, как оценка величины дисперсии входного параметра.

Алгоритм позволяет отслеживать дрейф оптимального режима и наносить управляющее воздействие, компенсирующее этот дрейф. Однако данный алгоритм не позволяет точно попасть в оптимум, а только следит за его перемещением.

На рис. 2 представлена функциональная схема алгоритма адаптивного управления.

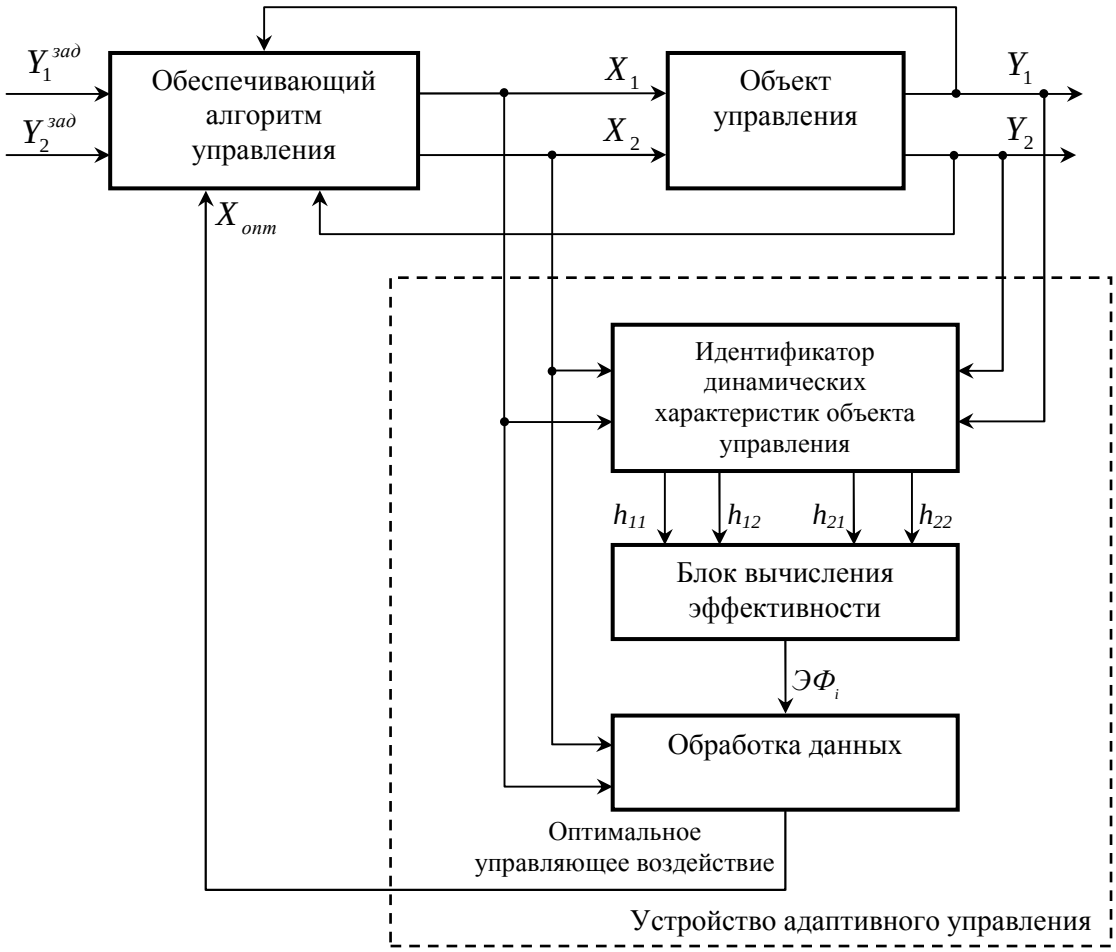


Рис. 2. Функциональная схема алгоритма адаптивного управления

На схеме выделено устройство адаптивного управления, включающее идентификатор динамических характеристик объекта, блок вычисления эффективности и блок обработки данных и выработки оптимального управления.

СПОСОБ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫМ ПРОФИЛЕМ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА

Шаровина С.О. – студентка филиала МЭИ в г. Волжском
Шевчук В.П. – д-р техн. наук. профессор
филиала МЭИ в г. Волжском

В данной работе исследуется работоспособность способа автоматического управления температурным профилем, заключающегося в адаптивном управлении положением средней точки профиля, робастной стабилизации положения нижней точки профиля и адаптивном управлении положением верхней точки профиля [1, 2]. Работоспособность и эффективность способа управления исследуется методами имитационного моделирования по методикам из работы [3].

Устройство состоит из: ректификационной колонны 1, оснащенной датчиками температур 2; дефлегматора 3; регулятора расхода хладагента 4; блока формирования задания 5; компенсатора возмущений 6; теплообменника 7, расположенного на линии отвода кубового остатка 23; регулятора температуры низа колонны 8; регулятора расхода перегретого пара 9; регулятора концентрации целевого продукта в нижней части колонны 10; блока идентификации текущего значения эффективности работы ректификационной колонны 11; регулятора расхода греющей смеси 12; теплообменника 13, расположенного на линии подачи питающей смеси 19; регулятора температуры верха колонны 14; регулятора расхода флегмы 15; регулятора расхода целевого продукта 16; регулятора уровня кубовой жидкости в колонне 17; регулятора температуры питающей смеси 18; хроматографов 20 и 21, расположенных на линии подачи питающей смеси 19 и на линии отвода целевого продукта 22 соответственно; компенсатора 24 (рисунок).

Устройство работает следующим образом. Информация о текущем значении профиля температур ректификационной колонны 1 от датчиков температуры 2, расположенных по всей ее высоте, поступает на блок идентификации текущего значения эффективности работы ректификационной колонны 11 [1], который предназначен для адаптивного управления температурой питающей смеси на тарелке питания колонны. Адаптивное управление осуществляется путем изменения задания регулятору температуры питающей смеси 18, который предназначен для формирования задания регулятору расхода греющего пара 12 посредством теплообменника 13, расположенного на линии подачи питающей смеси в колонну 19.

Положение нижней точки профиля температур жестко фиксируется с помощью хроматографа, расположенного на линии отвода целевого продукта 22. Сигнал от хроматографа формирует сигнал задания для регулятора температуры низа колонны 8.

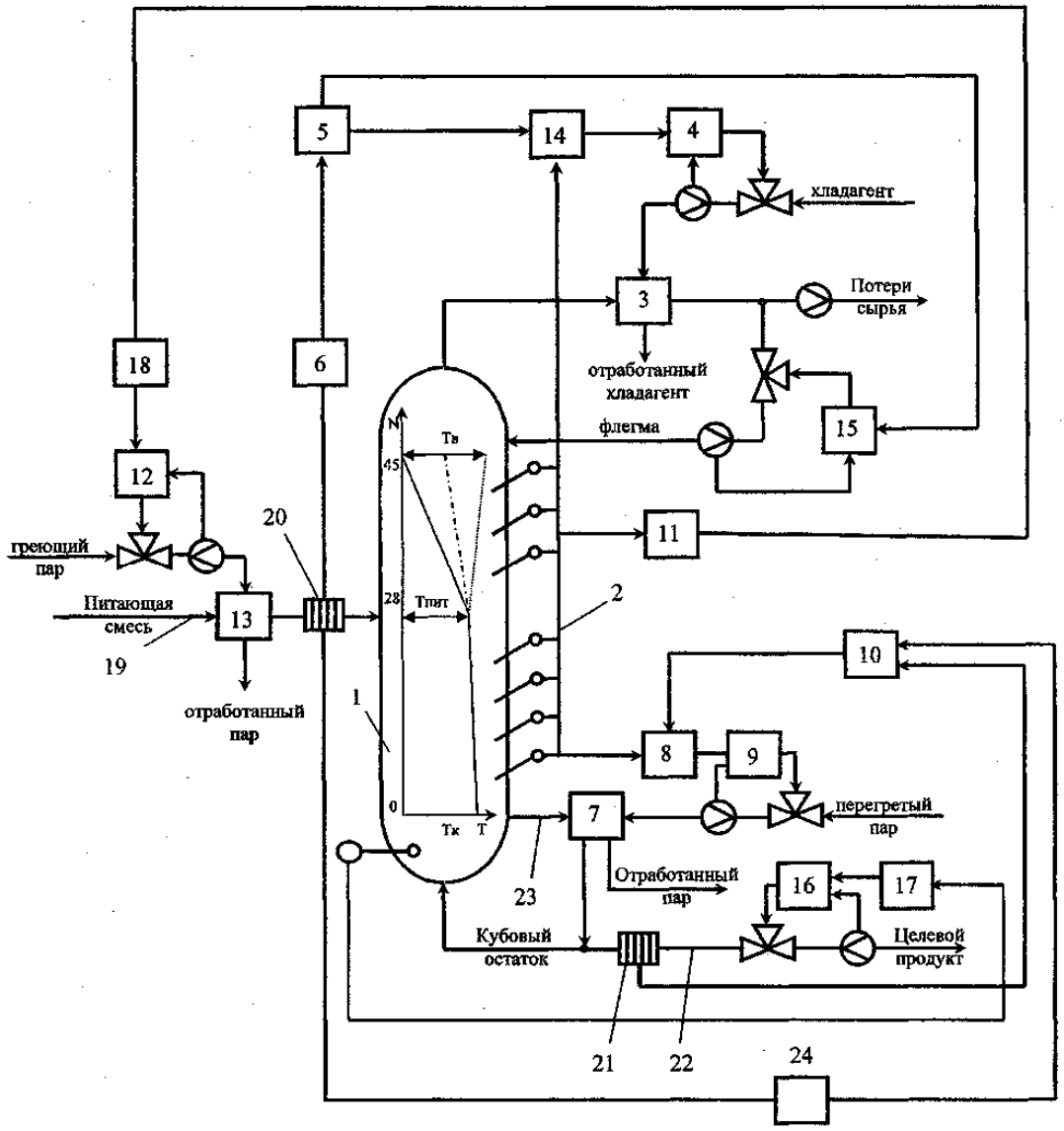
Робастная стабилизация нижней точки профиля температур осуществляется путем изменения перегретого пара, подаваемого в теплообменник 7, регулятором расхода перегретого пара 9. В качестве задания регулятору расхода перегретого пара 9 поступает сигнал от регулятора температуры низа колонны 8, заданием которому служит сигнал от регулятора концентрации целевого продукта 10.

Адаптивное управление верхней точкой профиля температур осуществляется посредством изменения расхода хладагента, подаваемого в дефлегматор 3, регулятором расхода хладагента 4. Заданием для блока 4 служит выходной сигнал регулятора температуры верха колонны 14. Входным параметром блока 14 является прогноз приращения текущего значения концентрации сырья по верху колонны, который формируется в блоке формирования задания 5 по пропорциональному алгоритму.

Выходной сигнал компенсатора возмущений $C_K(jT_S)$ формируется в блоке 6 по алгоритму

$$T_a \frac{\Delta C_K(jT_S)}{\Delta t} + C_K(jT_S) = -T_\partial k_a \frac{\Delta C_u(jT_S)}{\Delta t},$$

где $\Delta C_u(jT_S) = C_u((jT_S) - C_u((j-1)T_S)$ – входной сигнал компенсатора; $C_u((jT_S)$, $C_u((j-1)T_S)$ – текущее и предыдущее значения концентрации сырья в питающей смеси соответственно; $\Delta C_K(jT_S) = C_K((jT_S) - C_K((j-1)T_S)$ – выходной сигнал компенсатора; $C_K((jT_S)$, $C_K((j-1)T_S)$ –текущее и предыдущее значения концентрации сырья по верху колонны, прогнозируемые компенсатором возмущений 6, соответственно; j – порядковый номер хроматографической циклограммы; T_S – длина циклограммы промышленного хроматографа (в секундах); $T_д$ – настроечный коэффициент дифференциальной части компенсатора; k_a – настроечный коэффициент пропорциональной части компенсатора; T_a – настроечный коэффициент интегральной части компенсатора; Δt – настроечный коэффициент модуля ввода аналоговых сигналов, равный 1 секунде.



Рисунок

Компенсация возмущающего воздействия со стороны питающей смеси за счет применения компенсатора возмущений (блока 6) и прогноз концентрации

по математической модели компенсатора верха колоны позволяют решить поставленную задачу адаптивного управления верхней точкой профиля температур путем изменения расхода флегмы.

Осуществляются такие управляющие воздействия, как: управление расходом поступающего в теплообменник перегретого пара, посредством которого осуществляется робастная стабилизация температуры низа колонны; управление расходом подаваемого в дефлегматор хладагента и регулирование температуры тарелки питания посредством изменения расхода греющего пара, проходящего через теплообменник, который расположен на линии подачи питающей смеси в колонну. При этом реализуется адаптивное управление верхней точкой профиля температур путем изменения расхода флегмы в зависимости от величины текущих потерь сырья по верху колонны, определяемых по соотношению

$$\Delta J_{в}(jT_S) = f_u(jT_S) - K_{др} f_n(jT_S),$$

где $f_n(jT_S) = M\{Q_{о.д}(kT_C)\}\cdot C_n(jT_S)$ – прогноз количества сырья (потери) в отбираемом дистилляте; $Q_{о.д}(kT_C)$ – расход отбираемого дистиллята, измеренный расходомером; $M\{Q_{о.д}(kT_C)\}$ – математическое ожидание расхода отбираемого дистиллята на периоде одной циклограммы; $C_n(jT_S) = M\{C_n(kT_C)\}$ – текущее значение (среднее) концентрации сырья по верху колонны, вычисляемое по математической модели колонны; $K_{др}$ – адаптивный (настроечный) коэффициент; $f_u(jT_S) = Q_{пит}(jT_S)\cdot C_u(jT_S)$ – количество сырья (потери) в линии питания; $Q_{пит}(jT_S)$ – расход питания, измеряемый расходомером;$\cdot C_u(jT_S)$ – концентрация сырья в линии питания, измеренная хроматографом; T_C – время опроса датчиков; j – порядковый номер хроматографической циклограммы; k – порядковый номер элемента в массиве (k = 0, 1…N – 1); $T_S = NT_C$ – длина циклограммы промышленного хроматографа (в секундах); N – число элементов в массиве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент на изобретение № 2449827. Устройство автоматического регулирования процессом ректификации //Авторы: Шевчук В.П., Агринская С.А., Филатова С.О. Бюл. № 13 от 10.05.2012.

2. Патент на полезную модель № 122033. Устройство автоматического управления процессом ректификации //Авторы: Шевчук В.П., Агринская С.А., Шаровина С.О. Бюл. № 32 от 20.11.2012.

3. *Шевчук, В.П.* Моделирование метрологических характеристик интеллектуальных измерительных приборов и систем / В.П. Шевчук. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. – 320 с.

О КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЯХ ПРОЦЕССА РАЗЛИВКИ СТАЛИ В ЛИТЕЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Грошев А.И. – канд. техн. наук, доцент
филиала МЭИ в г. Волжском
Васильева И.Л. – доцент филиала МЭИ в г. Волжском
Реснянская А.А. – ассистент филиала МЭИ в г. Волжском

Современный период развития металлургической технологии характеризуется постепенным выносом операций, обеспечивающих получение металла высокого качества, непосредственно из плавильного агрегата во вспомогательный агрегат или в специально оборудованный ковш. Сталь из электропечи выпускают по желобу в сталеразливочный ковш, а затем разливают по изложницам в зависимости от принятого метода и условий разливки.

Надежность ковшей – непременное условие нормальной работы сталеплавильного цеха.

Сталеразливочный ковш выполняет следующие функции:

1) служит емкостью для транспортировки металла от сталеплавильного агрегата до места разливки;

2) является устройством, с помощью которого сталь распределяется по изложницам или по кристаллизаторам установки непрерывной разливки;

3) выполняет роль агрегата, в котором осуществляется ряд металлургических процессов (раскисление, легирование, обработка вакуумом, продувка инертным газом, обработка жидкими синтетическими шлаками или твердыми шлаковыми смесями и т.п.);

4) служит емкостью, в которой металл выдерживается при требуемой температуре в течение всего времени разливки плавки.

Соответственно, к ковшу предъявляются следующие требования:

1) ковш (без металла) должен быть возможно более легким, компактным и надежным;

2) ковш должен иметь футеровку, обеспечивающую возможно более длительную его эксплуатацию от ремонта до ремонта;

3) конструкция и футеровка ковша должны обеспечивать минимальные потери тепла (минимальное охлаждение металла) в течение периода разливки.

Сталеразливочный ковш представляет собой открытую футерованную емкость, позволяющую в течение небольшого промежутка времени сохранять жидким металл и разливать его в слитки. С учетом способа разливки слитки могут отливаться в изложницы непосредственно из ковша (рис. 1) или с помощью дополнительного оборудования и приспособлений, например, промежуточных ковшей, рис. 2.

Жидкий металл поступает в промковш из сталеразливочного ковша через открытый шиберный затвор. При этом температура стали оказывает существенное влияние на процесс литья, а потери тепла на этом участке движения должны иметь минимальные значения.

Промковш выполняет следующие основные функции:

– принимает сталь, истекающую из сталеразливочного ковша;

– накапливает металл в объемах, необходимых для стабильного процесса литья в течение всего периода разливки;

– обеспечивает минимальные потери тепла металла в промковше;

– обеспечивает рафинирование металла за счет всплытия неметаллических включений.

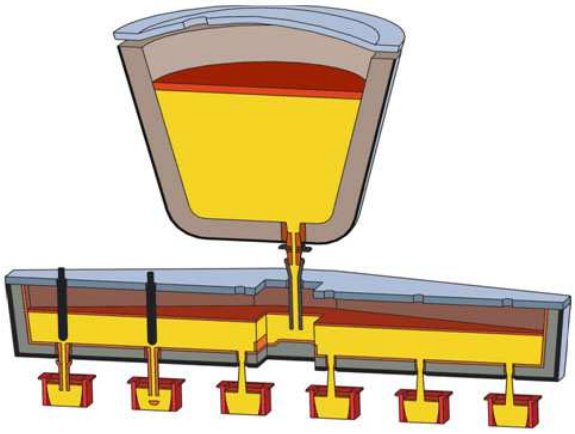


Рис. 1. Схема разливки стали из сталеразливочного ковша в формы

Геометрическая форма промковша выбирается по возможности наиболее простой и приближенной к параллелепипеду. Это упрощает процесс изготовления футеровки промковша и его эксплуатации (например, извлечения остатка металла после разливки). Для удобства эксплуатации также выполняются технологические уклоны стенок (сужение) промковша сверху вниз.

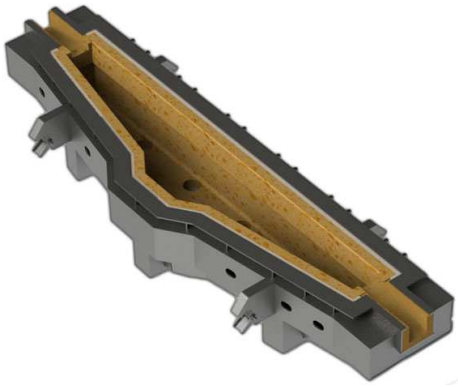


Рис.2. Общий вид промежуточного ковша

В качестве огнеупорной футеровки используют шамотный кирпич. Общая толщина футеровки ковша слагается из двух рядов кирпича – арматурного и рабочего. Швы между ними не должны совпадать во избежание прорывов металла. Также не допускается совпадение вертикальных швов рабочего ряда. К ковшовому кирпичу предъявляются требования сохранения постоянства объема при его нагревании или допускается небольшое изменение размеров, обеспечивающих достаточную плотность всей кладки.

Дополнительные потери тепла металлом наблюдаются при разливке, что объясняется необходимостью прогрева футеровки промковша при попадании в него жидкой стали. Промковш подается на МНЛЗ (машина непрерывного литья заготовок) уже разогретым.

Внутренний арматурный ряд футеруют нормальным кирпичом, укладываемым на плашку с использованием огнеупорной массы, состоящей из огнеупорной глины и шамотного порошка, замешанных на воде. Футеровку днищ выполняют из стандартного ковшового кирпича.

На стойкость футеровки ковшей влияют их размеры (высота, диаметр, конусность); условия горячей обработки (длительность оборота, способ охлаждения, число ремонтов днища); сортамент стали; условия выпуска жидкой стали; количество и состав шлака в ковше; скорость разливки (низкая скорость приводит к высокому износу футеровки); продолжительность слива шлака после окончания разливки.

Функционально важным и аварийно опасным элементом футеровки ковша является его днище. Характерной особенностью эксплуатации футеровки днища сталеразливочного ковша является ее контакт с падающей при выпуске струей стали, которая интенсивно размывает футеровку в месте контакта.

Стойкость футеровки ковшей, изготовленных из обычных шамотовых кирпичей, 10-15 плавок (наливов). Футеровка изнашивается неравномерно, наибольший износ наблюдается в том месте, куда падает струя металла (так называемая «боевая стенка» ковша), и в районе шлакового пояса. В случаях, когда металл в ковше подвергается различным методам обработки, включая методы, связанные с энергичным перемешиванием металла, стойкость шамотовой футеровки резко снижается; в этих случаях футеровка ковша делается из высокоогнеупорных материалов. В зависимости от качества огнеупорных материалов технологии обработки стали в ковше расход ковшовых огнеупоров колеблется от 3 до 5 кг/т стали.

Периодичность работы ковша обусловливает резкий нагрев и охлаждение огнеупорной футеровки. Разница температур наливаемой стали и подогретой до 300-800 °С футеровки составляет 800-1 350 °С. Иногда охлаждение ковша ускоряют обдувкой воздухом и даже поливом водой, что создает весьма жесткие условия службы огнеупоров.

Из описанных условий эксплуатации ковшей вытекает комплекс требований к рабочим свойствам огнеупоров, включающий хорошую устойчивость против коррозионного и эрозионного разрушения расплавленным металлом и шлаком, достаточную термическую стойкость, отсутствие значительной усадки при высоких температурах эксплуатации.

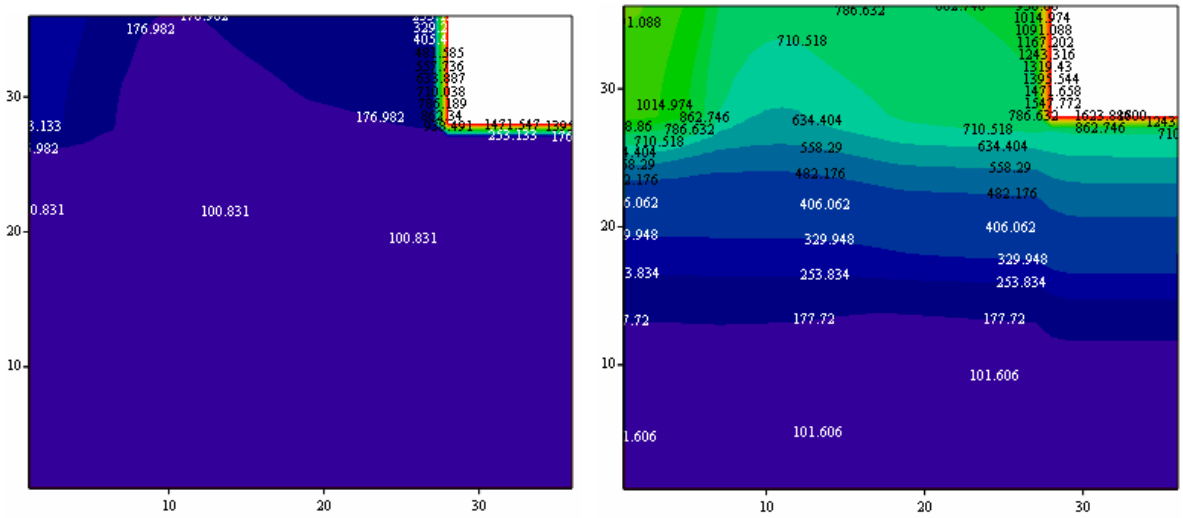
В [1] представлена математическая модель теплового процесса разогрева футеровки промежуточного ковша.

В [2] была подобрана плотность теплового потока на каждом технологическом участке, уточнены параметров модели (зависимость плотности теплового

потока от времени, коэффициент теплоотдачи) и режимы работы горелок при начальной температуре футеровки 20 °С.

Ввиду возможного не остывания футеровки ковша до рассматриваемых ранее значений, в данной статье приведены результаты моделирования разогрева промежуточного ковша при начальной температуре футеровки 150 °С.

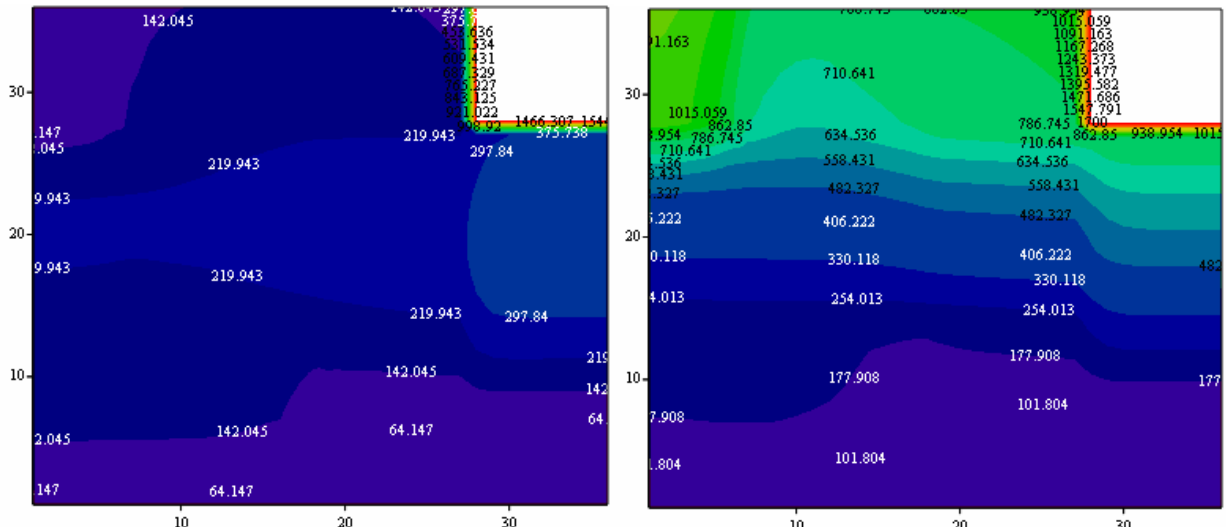
На рис. 3 представлено температурное поле в районе стакана-дозатора через 2,6 часа и через 5,4 часа после начала разогрева.



а б

Рис. 3. Температурное поле в районе стакана-дозатора:
а) через 2,6 часа после начала разогрева. Тепловой поток q_s = 13,9 кВт/м^2;
б) через 5,4 часа после начала разогрева. Тепловой поток q_s = 21,7 кВт/м^2

На рис. 4 представлено температурное поле в районе стакана-дозатора через 7,8 часа и 9,8 часа после начала разогрева.



а б

Рис. 4. Температурное поле в районе стакана-дозатора:
а) через 7,8 часа после начала разогрева. Тепловой поток q_s = 13,4 кВт/м^2;
б) через 9,8 часа после начала разогрева. Тепловой поток q_s = 21,7 кВт/м^2

На рис. 5 представлено температурное поле в районе стакана-дозатора через 15 часов после начала разогрева.

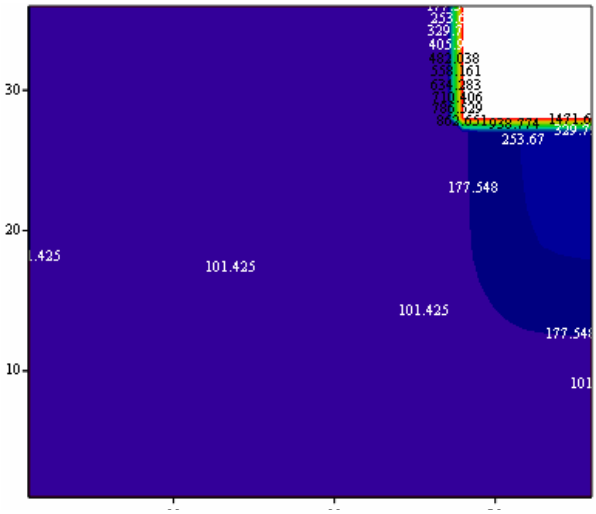


Рис. 5. Температурное поле в районе стакана-дозатора через 15 часов после начала разогрева. Тепловой поток q_s = 11,5 кВт/м^2

По полученным результатам можно численно оценить величину теплового потока на каждом временном промежутке всего технологического цикла разогрева и оценить ресурсосберегающий эффект.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Реснянская, А.А., Васильева, И.Л.* Математические моделирование процесса разогрева футеровки промежуточного ковша / А.А. Реснянская, И.Л. Васильева // Известия ВолГТУ: межвуз. сб. науч. ст. № 12 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2013. – (Серия «Процессы преобразования энергии и энергетические установки», вып. 5).

2. *Реснянская, А.А., Васильева, И.Л.* Повышение энерго-ресурсоэффективности термической подготовки промежуточного ковша на основе численного моделирования процессов тепломассообмена / А.А. Реснянская. И.Л. Васильева // Ресурсо-энергосбережение и эколого-энергетическая безопасность промышленных городов: Третья всероссийская научно-практическая конференция. г. Волжский, 28-30 сентября 2010 г.: Сборник материалов конференции. – Волжский: Филиал «МЭИ (ТУ)» в г. Волжском, 2010.

СЕКЦИЯ № 3

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

Председатель: ***Раменский П.П.*** – советник ген. директора ООО «ЛУКОЙЛ-Волгоградэнерго»
Сопредседатель: ***Кузеванов В.С.*** – д-р техн. наук, профессор филиала МЭИ в г. Волжском
Секретарь: ***Курьянова Е.В.*** – зав. лабораторией кафедры ТЭиТТ филиала МЭИ в г. Волжском

МЕХАНИЗМЫ ОБРАЗОВАНИЯ БЕНЗ(А)ПИРЕНА ПРИ СЖИГАНИИ ТОПЛИВА В ТОПКАХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОТЛОВ

Иваницкий М.С. – ст. преподаватель
Грига А.Д.– д-р техн. наук, профессор
Васильева Ю.В. – канд. физ.-мат. наук, доцент
Филиал МЭИ в г. Волжском

При сжигании углеводородного топлива в котельных установках образуется сильно загрязняющее окружающую среду вещество, относящееся к канцерогенной группе, – бенз(а)пирен (БП). Актуальная задача экологии среды обитания – это изучение и моделирование механизмов образования БП с целью значимого сокращения выбросов вредных веществ в окружающую среду.

Теоретические исследования закономерностей образования БП при горении углеводородных топлив в основном проводились по двум направлениям. С одной стороны, на основе отдельных экспериментальных результатов и общих представлений о механизмах протекания химических реакций были предложены гипотетические схемы образования БП [1-5]. С другой стороны, с помощью термодинамического расчета анализировались равновесные значения концентраций отдельных компонентов продуктов сгорания, участие которых в синтезе БП считалось наиболее вероятным [1]. Следует отметить, что наиболее детально рассматривались процессы горения алифатических углеводородов. Применительно к сжиганию топлив, содержащих ароматические углеводороды, механизмы образования БП рассмотрены только в самом схематичном виде.

В работе [4] Н.В. Лавровым с соавторами высказано предположение, что БП (и другие ПАУ) могут быть рассмотрены как один из этапов образования сажи. Аналогичные схемы процессов, включающих образование ПАУ с последующей их коагуляцией в сажевые частицы, предложены в работе [7]. Алифатические углеводороды при горении распадаются в процессе пиролиза на фрагменты, имеющие характер радикалов, и устойчивые углеводороды. В дальнейшем, если соблюдаются определенные условия по составу смеси, времени пребывания, температуре и другим параметрам рабочего процесса горения, из продуктов

пиролиза в результате реакций циклизации и полимеризации синтезируется БП. При горении ароматических углеводородов образование БП может идти двумя путями: как посредством прямой конденсации бензольных колец, так и в результате распада ароматических структур на углеводородные фрагменты, которые затем полимеризуются с образованием БП. Рассмотрим более подробно предложенные различными авторами механизмы синтеза БП из алифатических углеводородов.

В одной из первых работ по данной проблеме Г.М. Беджер выделяет следующие предпосылки для образования БП [2]. При температурах порядка 1 000 К обычные углерод-углеродные (С-С) и углерод-водородные (С-Н) связи могут разрываться с образованием свободных радикалов, в то время как ароматическое кольцо остается относительно устойчивым. В результате насыщенные углеводороды с длинной цепью и их радикалы распадаются на фрагменты, способные к последующему синтезу. На основе этих выводов в работе [2] предложена схема синтеза БП, в которой на первом этапе непредельные алифатические углеводороды с наличием двойных или тройных связей, являющихся либо непосредственно топливом, либо продуктами пиролиза исходного топлива, претерпевают процесс удлинения цепи, приводящий к образованию промежуточного соединения с углеродным скелетом С6-С4. Два таких фрагмента могут образовываться в результате циклизации и дегидрирования молекулы БП.

В работе [3] описана схема образования БП, предложенная С.К. Рейем и Р. Лонгом. Она основана на превращении ацетилена в бирадикал ацетилена, с последующим удлинением цепи, реакциями циклизации и полимеризации. Приведенная схема не дает последовательной физико-химической картины сложного механизма синтеза БП, поэтому авторы работы [4], рассматривая БП как один из начальных этапов процесса сажеобразования, предлагают следующую кинетическую схему синтеза данного канцерогенного ПАУ. Вначале из ацетилена по радикально-цепному механизму образуется молекула триацетилена. Одновременно, в процессе реагирования, ацетилен превращается в бирадикал ацетилена и сложный радикал с тремя свободными валентностями, что объясняет его высокую реакционную способность. Далее, триацетилен, легко вступающий в реакцию полимеризации, может образовать полирадикал, представляющий собой зародыш сажи.

Развивая представления Г.М. Беджера, Н.В. Лавров с соавторами [4] предлагают одну из возможных схем синтеза БП, суммарное уравнение которой записывается в виде

$$C_6H_2 + 3C_2H_2 + 4C_2H \rightarrow C_{20}H_{12}; \qquad (1)$$

тогда балансовое уравнение процесса образования БП из ацетилена можно представить следующим образом [29]:

$$10C_2H_2 \rightarrow C_{20}H_{12} + 4H_2, \qquad (2)$$

то есть с двумя свободными связями атомов углерода, обладающих высокой реакционной способностью.

Анализ указанной схемы синтеза ПАУ, с учетом принятых допущений, позволил сформулировать дифференциальное уравнение для концентрации БП [5, 6]:

$$\frac{dc}{d\tau} = k_1[C_2H_2]^m - k_2[C_2H_2]^n[C_{20}H_{12}], \quad (3)$$

где первое слагаемое правой части описывает образование БП из ацетилена; второе слагаемое – переход БП в более тяжелые ПАУ; константы k_1 и k_2 определяются из эксперимента, а показатели степени имеют порядок: m = 5, n = 2 и уточняются на основании опытных данных.

В работе [5] сделана попытка рассмотрения условий образования БП на базе термодинамических расчетов равновесных составов. Во внимание приняты компоненты реакций, участвующие как в механизме Н.В. Лаврова [4], так и Г.М. Беджера [2]. В результате расчетов авторами [1] делается вывод о преобладающей роли ацетилена и этилена в образовании БП в низкотемпературной области горения в соответствии с реакцией образования дивинила, которая может протекать при относительно низких температурах (до 1 650 К).

Для высокотемпературной зоны становится вероятным образование БП по механизмам Г.М. Беджера или Н.В. Лаврова. На основании анализа отдельных экспериментальных данных и результатов термодинамических расчетов в работе [1] предложена схема синтеза БП на примере сжигания метана. Авторы работы [1] отмечают, что протекание реакций по данной схеме вероятно лишь в низкотемпературной зоне горения. Не отрицая важности полученных в работе [1] результатов, заметим, что анализ равновесных составов справедлив для условий сжигания топлив в области составов смеси, близких к стехиометрическим ($\alpha = 1$), с достаточно большими временами пребывания топлива в зоне горения.

В реальных условиях горения концентрация углеводородных и других соединений существенно отличается от равновесной, поэтому выводы, сделанные на основе термодинамических расчетов, становятся недостаточно корректными.

Таким образом, анализ предлагаемых различными авторами схем и механизмов синтеза БП при горении углеводородных топлив показывает, что образование БП определяется концентрацией продуктов пиролиза исходного топлива, среди которых важную роль играет ацетилен. Вместе с тем, предложенные модели описывают механизмы синтеза БП на качественном уровне, так как не включают в себя константы химических реакций. По-видимому, наиболее реальным шагом в решении проблемы моделирования процессов образования БП является описание кинетики синтеза данных соединений на основе совместного использования детальных кинетических схем горения углеводородов и глобальных реакций, описывающих синтез конкретных ПАУ. Для разработки адекватной структуры кинетических схем и образования бенз(а)пирена, определения соответствующих констант химических реакций требуется проведение детальных экспериментальных исследований в модельных и промышленных условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ахмедов, Р.Б.* Технология сжигания горючих газов и жидких топлив / Р.Б. Ахмедов, Л.М. Цирульников. – Л.: Недра, 1984. – 283 с.

2. *Беджер, Г.М.* Химические основы канцерогенной активности / Г.М. Беджер. – М.: Медицина, 1966. – 124 с.

3. *Лавров, Н.В.* Процессы горения топлива и защита окружающей среды / Н.В. Лавров, Э.И. Розенфельд, Г.П. Хаустович. – М.: Металлургия, 1981. – 240 с.

4. *Лавров, Н.В.* О механизме образования бенз(а)пирена / Н.В. Лавров, Н.Л. Стасевич, Г.М. Комина // Докл. АН СССР. – 1972. – Т. 206, № 6. – С. 1363-1366.

5. *Матвеев, С.Г.* Обоснование модели синтеза ПАУ на основе карбенного механизма пиролиза ацетилена / С.Г. Матвеев, И.В. Чечет // Проблемы и перспективы развития двигателестроения в Поволжском регионе: Докл. Междунар. научн.-техн. конференции. – Самар. гос. аэрокосм. ун-т. – Самара, 1997. – Т. 2. – С. 218-224.

6. *Лукачев, С.В.* О моделировании процесса образования бенз(а)пирена на основе глобальных реакций / С.В. Лукачев, С.Г. Матвеев, А.Ф. Урывский // Изв. вузов. Сер. Авиационная техника. – 1996. – № 1. – С. 62-64.

7. Mechanism of soot formation in acetylene-oxygen mixtures / M. Frenklach, D.W. Clary, T. Yuan et al. // Combustion Science and Technology. – 1986. – V. 50, № 13, P. 79-115.

УТИЛИЗАЦИЯ ТЕПЛОТЫ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ ВЫБРОСОВ В СПОРТИВНОМ КОМПЛЕКСЕ С БАССЕЙНОМ

Криуля А.О. – студентка филиала МЭИ в г. Волжском
Гриценко А.Н. – канд. техн. наук, доцент
филиала МЭИ в г. Волжском

Для повышения эффективности систем принудительной вентиляции в зданиях целесообразно использовать теплоту удаляемого воздуха.

В настоящей статье рассматривается вопрос утилизации теплоты вентиляционных выбросов в холодный период года на примере спортивного комплекса с открытым бассейном. В этот период температура удаляемого из помещения воздуха превышает температуру наружного воздуха, поступающего в помещение бассейна. Так как воздухообмен в плавательном бассейне достаточно велик (20 000 м^3/ч), то с удаляемым из помещения влажным воздухом теряется большое количество теплоты. Для утилизации теплоты сбросов удаляемого воздуха предложено использовать её регенерацию для подогрева свежего наружного воздуха, подаваемого в приточные системы принудительной вентиляции. Для этой цели используется теплообменник-утилизатор (ТУ) с вращающимся ротором-регенератором (рис. 1). Такой выбор теплообмена объясняется лучшей эффективностью его в регенеративном ТУ, чем в рекуперативном через разделительную стенку [1].

Водяные пары, содержащиеся во влажном удаляемом из помещения воздухе, при теплообмене охлаждаются ниже точки росы и выпадают в виде конденсата на поверхности теплообмена. При температурах наружного воздуха, поступающего

в теплообменник-утилизатор, ниже –15 °С температура поверхности теплообмена становится ниже 0 °С. В эти периоды выпавшая на поверхность теплообмена ТУ влага замерзает, и теплообменный аппарат выводится из работы. Поэтому режим работы ТУ выбирается таким, чтобы на входе в него температура наружного воздуха $t_{н1}$ не была меньше расчетной температуры $t_{н.р.у}$ = –15 °С. При расчетной температуре $t_{н.р.у}$ температура поверхности теплообмена ТУ со стороны удаляемого вытяжного воздуха, $t^{п}_{у_2}$ = 26 °С, уменьшается до 0 °С.

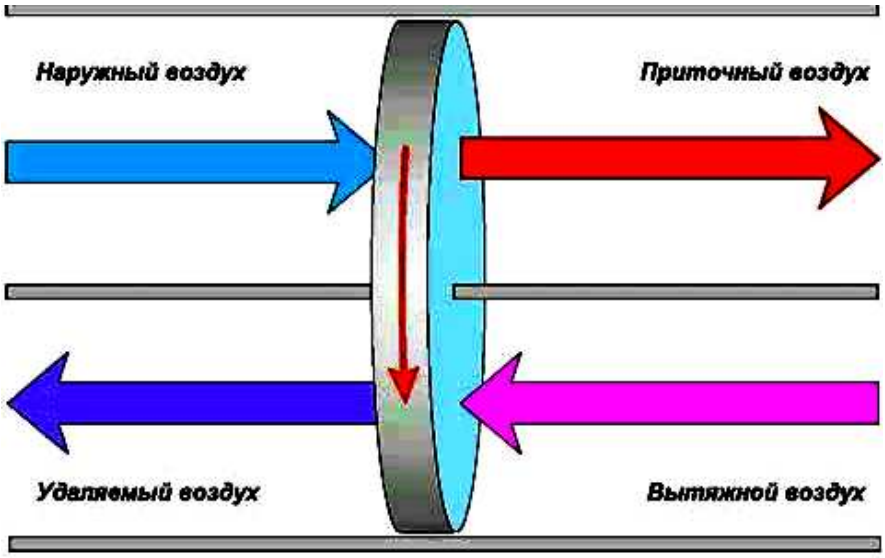


Рис. 1. Принцип действия регенеративного теплообменника-утилизатора с вращающимся ротором

При температурах наружного воздуха ниже $t_{н.р.у}$ теплообменник-утилизатор необходимо выводить из работы или осуществлять предварительный подогрев холодного наружного воздуха. Для подогрева наружного воздуха в таком случае используется воздухоподогреватель.

Воздух, поступающий с улицы при температурах ниже $t_{н.р.у}$, сначала проходит через воздухоподогреватель, после чего поступает в теплообменник-утилизатор с вращающимся ротором, где забирает тепло от воздуха, удаляемого из бассейна, далее нагретый наружный воздух направляется на калорифер, где подогревается до температуры $t_{п}$ = 29 °С, и подается в зал бассейна [2].

На рис. 2 показана предлагаемая схема теплоснабжения спортивного комплекса с утилизацией теплоты вентиляционных выбросов.

На схеме имеется два контура воды, нагретой в котле, которая расходуется на ГВС и на систему отопления административного здания и помещения бассейна. Нагрузка линии ГВС дополнительно включает в себя затраты тепла на подогрев бассейна. Подогретая вода, пройдя через систему подогрева бассейна, направляется в смесительный бак, где поддерживается необходимый уровень её запаса. Расход воды в системе ГВС подпитывается сетевой холодной водой. При этом холодная вода предварительно проходит через водяной теплообменник регенерации тепла от душевых сбросов и водоразборов системы ГВС, направляемой

в канализацию. Подогретая таким образом питательная вода направляется в смесительный бак и далее в котёл.

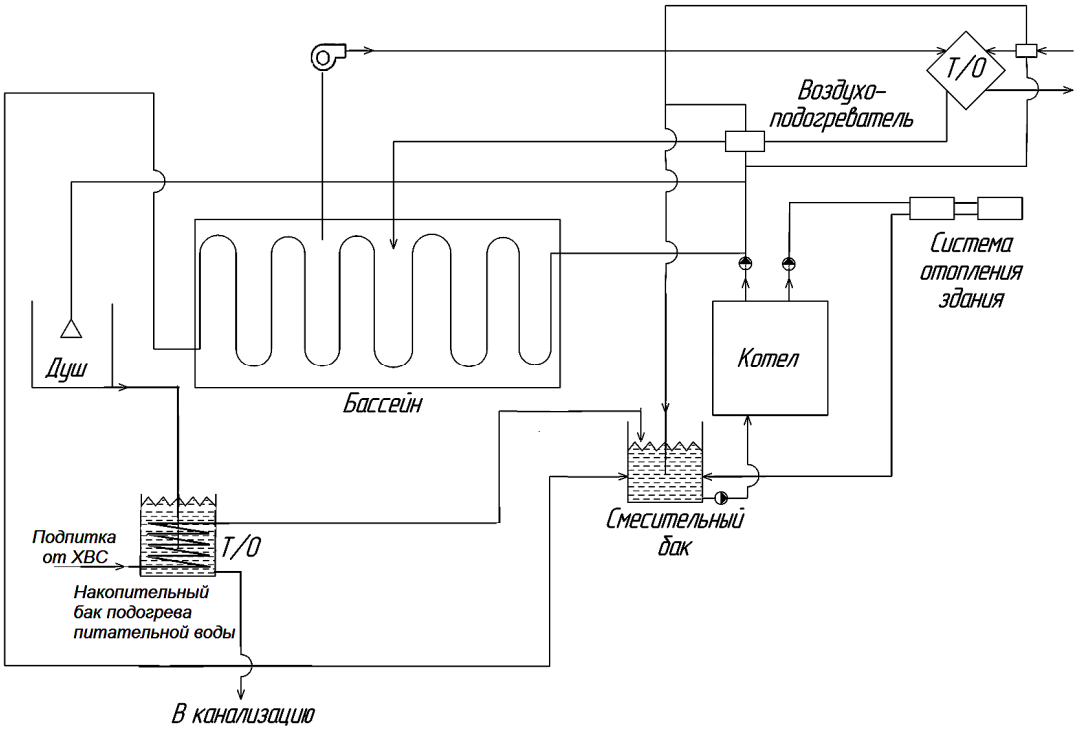


Рис. 2. Предлагаемая схема системы теплоснабжения спортивного комплекса с бассейном при утилизации теплоты вентиляционных выбросов

Утилизация теплоты удаляемого из помещения воздуха и канализационных сбросов системы ГВС позволяет значительно сократить расход тепловой энергии на нужды спортивного комплекса с бассейном. По предварительно проведённым расчётам расход тепловой мощности на вентиляцию и отопление помещения бассейна размером 60 × 40 м без использования схемы утилизации теплоты составил 300 кВт, а с использованием схемы по рис. 2 необходимый расход тепла составит 120 кВт.

По данным источника [3] при организации эффективных схем теплоснабжения экономия тепловой энергии может составить до 40 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Соколов, Е.Я.* Теплофикация и тепловые сети / Е.Я. Соколов. – М.: Издательство МЭИ, 1999.

2. СНиП 2.04.05-91 «Отопление, вентиляция, кондиционирование воздуха». – М.: Стройиздат, 1997.

3. *Щеглинский, А.Я.* Тепловые схемы и оборудование энергоэффективных систем теплоснабжения / А.Я. Щеглинский, А.Л. Ефимов. – М.: Издательство МЭИ, 2008.

4. *Сканави, А.Н.* Конструирование и расчет систем водяного и воздушного отопления зданий / А.Н. Сканави. – М.: Стройиздат, 1983.

5. *Богословский, В.Н.* Отопление и вентиляция / В.Н. Богословский, В.П. Щеглов, Н.Н. Разумов. – М.: Стройиздат, 1980.

6. Теплоэнергетика и теплотехника. В 4-х т. Т. 4 / Под общей редакцией А.В. Клименко, В.М. Зорина. – М.: Издательство МЭИ, 2004.

7. *Чайковский, Г.П.* Отопление и вентиляция здания / Г.П. Чайковский, А.В. Путько. – Хабаровск: Издательство ДВГУПС, 2003.

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕМБРАННЫХ ПРОЦЕССОВ ФИЛЬТРОВАНИЯ

Гришин С.С. – доцент филиала МЭИ в г. Волжском

Принцип мембранного разделения основан на преимущественной проницаемости одного или нескольких компонентов жидкой, газовой смеси коллоидной системы через разделительную перегородку – мембрану. Фаза, прошедшая через неё, называется пермеатом (фильтратом), задержанная – концентратом. Мембранные процессы, обусловленные градиентом давления по толщине мембраны, получили название – баромембранные процессы.

В рамках баромембранных процессов фильтрации принято различать обратный осмос (гиперфильтрацию) и ультрафильтрацию, которые отличаются от обычного фильтрования тем, что на поверхности фильтра не откладывается осадок, а образуются два раствора, один из которых обогащён растворённым веществом. Увеличение концентрации последнего у поверхности мембраны недопустимо, так как приводит к снижению её фильтрационных свойств.

Обратный осмос – разделение растворов низкомолекулярных соединений благодаря различной подвижности компонентов в порах мембран. Если имеет место самопроизвольный переход растворителя через мембрану, то через некоторое время в растворе наступает равновесие, и процесс перехода прекращается. Давление, которое при этом устанавливается в растворе, называется осмотическим. Если со стороны раствора приложить давление, превышающее осмотическое, растворитель будет переноситься в обратном направлении (отсюда название процесса). Поскольку мембраны не идеальны, через них всё же проникает и некоторое количество растворенного вещества.

В отличие от обратного осмоса ультрафильтрацией называют разделения веществ, в которых молекулярная масса растворенных компонентов намного больше молекулярной массы растворителя. Закономерности ультрафильтрации и обратного осмоса в основном совпадают.

Микрофильтрация (мембранная фильтрация) – разделение коллоидных систем и осветление растворов отделением от них взвешенных микрочастиц. Микрофильтрация занимает промежуточное положение между ультрафильтрацией и фильтрованием и отличается от других баромембранных процессов возможностью образования на поверхности мембраны твердой фазы (осадка солей).

В настоящее время баромембранные процессы активно используются в промышленности и быту. Обратный осмос – для подготовки питьевой воды (процесс экономичен, так как проводится при невысоком давлении), опреснения солёных и очистки сточных вод, для обработки сточных вод в пищевой, химической,

целлюлозно-бумажной, атомной промышленности, при этом происходит концентрация ценных компонент, содержащихся в сточных водах. Ультрафильтрация – для очистки сточных вод от высокомолекулярных соединений; концентрирования тонких суспензий; выделения и очистки биологически активных веществ, вакцин, вирусов, очистки крови; концентрирования и фракционирования растворов (молока, соков, электролитов, реактивов в фото- и кинопромышленности). Микрофильтрация – для очистки технологических растворов и воды от тонкодисперсных веществ; разделения эмульсий; предварительной подготовки жидкостей, например морской и солоноватых вод перед опреснением.

Высокие требования также предъявляются к воде, которая используется для промывки деталей при изготовлении изделий микроэлектроники, и к питательной воде, подаваемой в паровые котлы, для производства пара. При этом подразделения, занимающиеся химводоочисткой, нуждаются в компьютерных тренажёрах для обучения персонала, которым, в свою очередь, необходимы программы, моделирующие процессы мембранной очистки.

В данной статье рассматривается задача о фильтрации раствора, содержащего примесь, до необходимой степени очистки путем его пропускания через минимально необходимое количество ступеней очистки.

Пусть дан раствор, например водный, содержащий примесь. K % – начальная концентрация примеси в нём. После каждой ступени мембранной очистки количество примеси в растворе уменьшается на q %. Какое минимальное количество ступеней очистки должен пройти раствор, чтобы концентрация примеси в нём стала не больше заданной величины f %?

Сделаем следующие допущения: пусть q % = const и одинакова для всех мембран, а масса концентрата m, отводимого от каждой мембраны в единицу времени, также одинакова и постоянна (m = const). Последнее условие необходимо для того, чтобы концентрация примеси перед мембраной не повышалась со временем. Это необходимое условие для нормальной работы мембраны. Схема, иллюстрирующая процесс, представлена на рисунке.

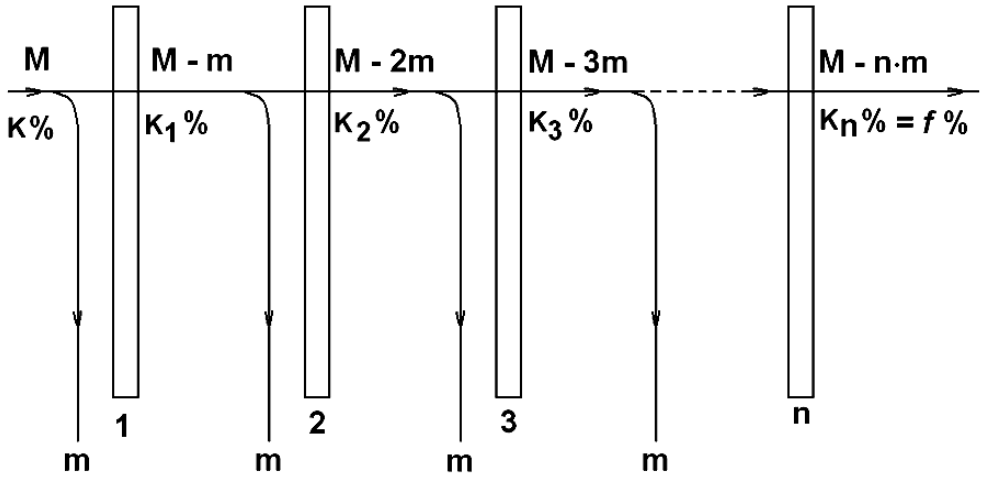


Рисунок. Схема процесса мембранной очистки

Пусть M – масса исходного раствора (растворитель + примесь), подаваемого в единицу времени на мембранный аппарат, состоящий из n мембран, тогда $M\frac{K}{100}$ – масса примеси в растворе, а $M - M\frac{K}{100} = \frac{M(100-K)}{100}$ – масса растворителя. После 1-й мембраны масса фильтрата составила $M - m$, а масса концентрата m. Масса примеси в растворе до фильтрации составляла $(M-m)\frac{K}{100}$.

Рассматривая дальнейший процесс понижения концентрации раствора после последовательного прохождения n мембран, получили формулу (1), которая позволяет определить минимальное необходимое число мембран, позволяющее добиться в конечном растворе концентрации примеси не выше заданного значения f %. В этом выражении φ – селективность мембраны.

$$n \geq \frac{\ln\frac{f}{K}}{\ln\left(\frac{100-\varphi}{100}\right)}. \qquad (1)$$

Селективность современных ацетатцеллюлозных мембран может составлять φ = 80 ÷ 90 % и выше (в зависимости от вида и концентрации растворённого вещества), тогда при начальной концентрации раствора K = 5 %, селективности φ = 80 % и при конечной концентрации f = 0,1 % количество ступеней очисти составляет

$$n \geq \frac{\ln\frac{f}{K}}{\ln\left(\frac{100-\varphi}{100}\right)} = \frac{\ln\frac{0{,}1}{5}}{\ln\left(\frac{100-80}{100}\right)} = 2{,}4 \approx 3.$$

Для более тонкой очистки, например до f = 0,01 %, при тех же условиях число ступеней возрастёт до 4.

Соответственно, при начальной концентрации раствора K = 20 % и селективности φ = 80 % для f = 0,1 % n = 4, а для f = 0,01 % n = 5.

Так как формула (1) не содержит массу концентрата, то полученный результат справедлив и для случая, когда масса отводимого от каждой мембраны концентрата m не одинакова.

Если каждая мембрана имеет свою селективность, то есть $q_1 \neq q_2 \neq \ldots \neq q_n$, то концентрацию раствора после каждой мембраны и число ступеней очистки можно производить машинными методами, учитывая селективность каждой мембраны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Мулдер, М.* Введение в мембранную технологию / М. Мулдер. – М.: Мир, 1999.

2. *Дытнерский, Ю.И.* Мембранные процессы разделения жидких смесей / Ю.И. Дытнерский. – М.: Химия, 1975.

3. *Дытнерский, Ю.И.* Обратный осмос и ультрафильтрация / Ю.И. Дытнерский. – М.: Химия, 1978.

4. *Дытнерский, Ю.И.* Баромембранные процессы. Теория и расчёт / Ю.И. Дытнерский. – М.: Химия, 1986.

5. *Свитцов, А.А.* Введение в мембранные технологии / А.А. Свитцов. – М.: ДеЛи Принт, 2008.

6. *Кочаров, Р.Г., Каграманов, Г.Г.* Расчет установок мембранного разделения жидких смесей / Р.Г. Кочаров, Г.Г. Каграманов. – М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2001.

7. *Кочаров, Р.Г.* Теоретические основы обратного осмоса / Р.Г. Кочаров. – М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2007.

8. *Орлов, Н.С.* Промышленное применение мембранных процессов / Н.С. Орлов. – М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2007.

КОНВЕРСИЯ ПРОДУКТОВ НЕПОЛНОГО СГОРАНИЯ ПО ГАЗОВОМУ ТРАКТУ КОТЛА

Иваницкий М.С. – ст. преподаватель
Грига А.Д.– д-р техн. наук, профессор
Васильева Ю.В. – канд. физ.-мат. наук, доцент
Филиал МЭИ в г. Волжском

При сжигании органического топлива в топках котлов ТЭЦ в атмосферу выбрасывается большое количество токсичных веществ. В состав продуктов сгорания входят оксиды азота, серы, углерода. Оксиды углерода относятся к продуктам химического недожога топлива. Полнота сгорания топлива в основном регулируется количеством воздуха, подаваемого в топочную камеру энергетического котла. При этом в качестве контролирующего показателя полноты сжигания топлива принимают значение концентрации монооксида углерода (CO) в дымовых газах. В этом случае не учитывают долю, вносимую недожогом бенз(а)пирена (БП), который относится к полициклическим ароматическим углеводородам и используется в практике оценки канцерогенной нагрузки на окружающую среду. Это вызвано высоким уровнем токсичности БП, свойствами мутагенности и способностью накапливаться в окружающей среде и организме человека. Эффективность процесса сжигания топлива можно повысить, если обеспечить контроль за содержанием CO и БП в продуктах сгорания.

Процессы конверсии продуктов сгорания вдоль газового тракта энергетических котлов достаточно полно описаны в работе [3]. Авторами этой работы показано, что процесс догорания бенз(а)пирена при работе котла ТПЕ-430 на природном газе происходит в широком диапазоне температур и завершается при температурах дымовых газов 120-130 °С. При этом указывается, что более полное догорание БП наблюдается при температурах 170-200 °С, что связано с переходом БП из аэрозольного в твердое состояние.

В свою очередь, процессы образования и догорания CO происходят при существенно более низких температурах, что объясняет наличие максимумов

концентраций монооксида углерода в любом сечении газового тракта котла. Характер изменения концентрации кислорода и СО по длине газового тракта зависит от начального значения α. Концентрация БП в процессе выгорания имеет большее значение в рассечке водяного экономайзера, чем в сечении за дымососом, из-за незавершенности процесса конверсии [3].

Результаты проведенных экспериментов [3] выявили уменьшение выхода БП на всех режимах работы котла ТПЕ-430, в зависимости от условий оно составляло 25-40 %. Максимальное снижение концентрации БП выявлено на участке газового тракта между сечениями РВЭ и за РВП. Это указывает на протекание процессов догорания БП и СО до CO_2, что подтверждается наличием максимумов содержания монооксида углерода в исследуемом сечении. Для сечений газового тракта, удаленных от поворотной камеры котла, зависимость содержания БП от эмиссии СО в значительной степени определяется основными условиями сжигания топлива. Поэтому для таких сечений прямопропорциональной зависимости может не существовать.

Проведенные эксперименты [3] показали, что за дымососом большему содержанию СО в уходящих газах обычно соответствует меньшее содержание БП. Это объясняется тем, что БП частично догорает до оксида углерода на участке газового тракта между экономайзером и дымососом. Разные условия в газовом тракте не всегда позволяют СО догореть до CO_2. При этом наблюдаются режимы с недожогом, сопровождающиеся в режимном сечении котла малыми значениями концентраций СО и большим содержанием БП [3, 4].

Отмечено, что при проведении экспериментов во всех режимах сжигания природного газа большим концентрациям СО в режимном сечении экономайзера всегда соответствовали большие концентрации БП. При минимальной степени недожога происходит резкий скачок содержания БП и других ПАУ при увеличении содержания СО. При дальнейшем повышении степени недожога природного газа наблюдается рост выхода СО при незначительном увеличении содержания БП (не более 15 %). В этом случае большие концентрации СО в области значительного недожога объясняются недостатком атомарного кислорода [3, 4].

Измерение концентрации в уходящих газах БП связано с большими сложностями, поэтому его содержание в дымовых газах часто пытаются оценивать по концентрациям СО, так как оба эти вещества являются продуктами неполного сгорания топлива [2, 3].

Анализ зависимости концентрации СО от содержания БП в сечении водяного экономайзера (рис. 1) позволяет заключить, что содержание СО косвенно характеризует содержание БП в дымовых газах, при этом количественную связь концентраций СО и БП установить сложно. Косвенная связь между этими показателями эффективности сгорания топлива возможна лишь для сечений, максимально приближенных к поворотной камере котла [3, 4].

Предлагается концентрацию бенз(а)пирена в зависимости от содержания монооксида углерода определять при помощи формулы

$$C_{БП} = \left[k_1 + k_2\sqrt{C_{CO}}\right]^2 \frac{k_3}{\exp(\alpha - 1)}, \qquad (1)$$

где $C_{БП}$ – концентрация бенз(а)пирена, нг/м^3; C_{CO} – концентрация оксида углерода, мг/м^3; $k_1 = 4{,}1$; $k_2 = 0{,}02\frac{м^3}{мг}$; $k_3 = 2{,}6\frac{нг}{м^3}$ – эмпирические коэффициенты в зависимости от типа котла, условий сжигания и вида топлива; α – коэффициент избытка воздуха в топке котла. Эмпирические коэффициенты k_1, k_2, k_3 получены с использованием положений теории планирования эксперимента (ТПЭ). Адекватность уравнения проверена с помощью критерия Фишера. Доверительная вероятность P = 0,95.

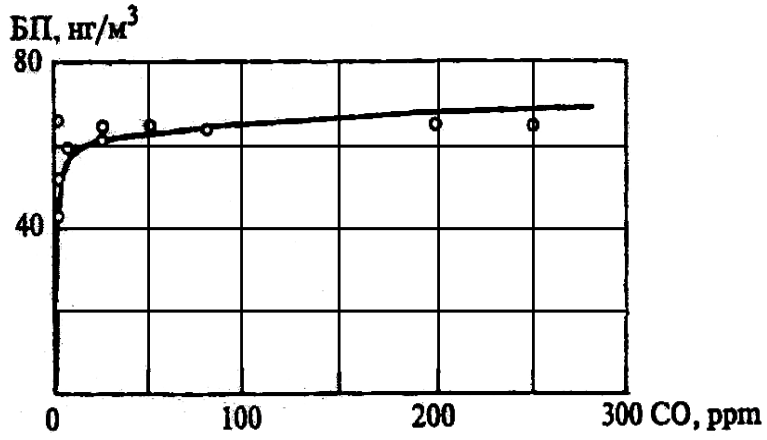


Рис. 1. Зависимость содержания СО от концентрации БП в сечении РВЭ котла ТПЕ-430, $D = 365 \div 375$ т/ч [3]

Использование данной зависимости возможно для определения концентрации БП в сечении за дымососом котла из-за отсутствия приборов контроля и сложности проведения лабораторно-инструментального анализа. При этом использовано выражение (1).

Предлагается определять концентрацию БП по содержанию СО в сечении за дымососом или непосредственно в канале дымовой трубы. Монооксид углерода – надежный параметр для определения БП, так как СО и БП являются продуктами неполного сгорания топлива.

Зависимость между концентрациями БП полученной по монооксидоуглеродной модели и СО в дымовых газах представлена на рис. 2. При минимальной степени недожога (СО = 20 мг/м^3) происходит резкий скачок содержания БП до 35-43 нг/м^3.

Рост концентрации СО от 50-150 мг/м^3 способствует повышению содержания БП на 2-4 %. Дальнейшее повышение степени недожога природного газа сопровождается ростом выхода СО при незначительном увеличении содержания БП (менее 10 %). Максимальная концентрация бенз(а)пирена – 50 нг/м^3 при значении СО – 300 мг/м^3.

Зависимость, представленная на рис. 3, позволяет определить диапазон пропорциональной зависимости экспериментальных данных [3, 4] и расчетных значений концентрации БП, полученных по монооксидоуглеродной модели, при содержании СО в пределах 35-60 мг/м^3. Это выявило возможность применимости модели образования БП по монооксидоуглеродной модели в области значений СО = 40-50 мг/м^3. Показано, что основной рост образования БП происходит при значениях СО, близких к минимальному химическому недожогу CO_{min} = 10-20 мг/м^3.

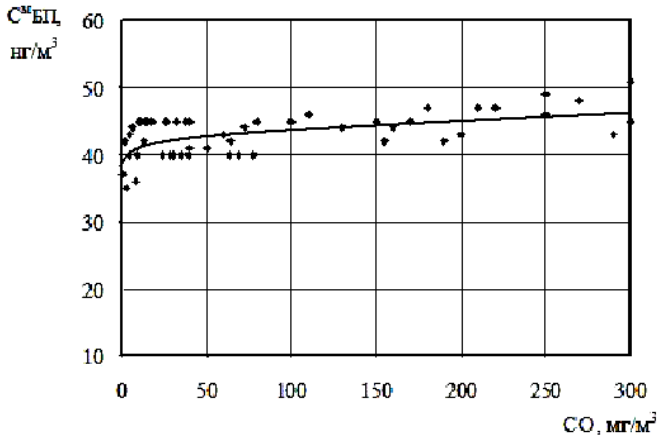


Рис. 2. Зависимость концентрации БП, полученной по монооксидоуглеродной зависимости, от концентрации СО в продуктах сгорания

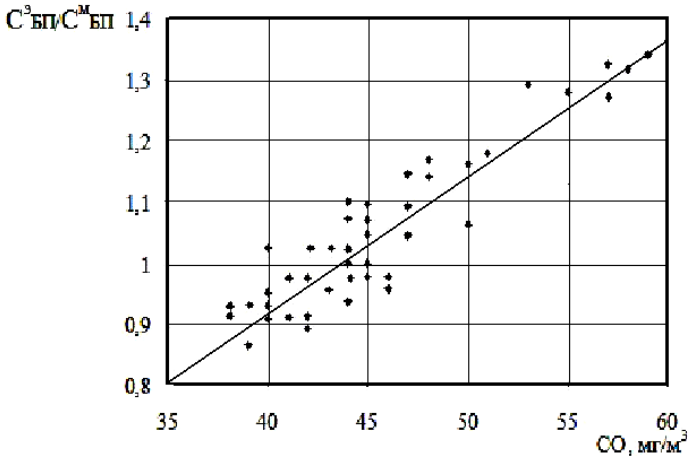


Рис. 3. Отношение эмиссии БП, полученной по экспериментальным данным, к эмиссии БП, полученной по монооксидоуглеродной модели, в зависимости от концентрации СО в продуктах сгорания топлива

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иваницкий, М.С.* Негативное воздействие объектов теплоэнергетики на окружающую среду / М.С. Иваницкий, А.Д. Грига, С.А. Грига // Сборник материалов Межрегиональной научно-практической конференции «Моделирование и создание объектов энерго- и ресурсосберегающих технологий». г. Волжский 20-23 сентября 2011 г. – Волжский: Филиал МЭИ в г. Волжском, 2011. – С. 135-137.

2. *Гаврилов, А.Ф.* Расчет содержания бенз(а)пирена в продуктах сгорания котлов ТЭС / А.Ф. Гаврилов, С.М. Аничков // Теплоэнергетика. – 1988. – № 7. – С. 72-73.

3. Исследование процессов конверсии оксида углерода и бенз(а)пирена вдоль газового тракта котельных установок / П.В. Росляков, И.А. Закиров, И.Л. Ионкин, Л.Е. Егорова / Теплоэнергетика. – 2005. – № 4. – С. 44-50.

4. *Росляков, П.В.* Методы защиты окружающей среды: Учебник для вузов / П.В. Росляков – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 336 с., ил.

5. Физико-химические процессы механизмов образования бенз(а)пирена при сжигании углеводородного топлива / М.С. Иваницкий, А.Д. Грига, С.А. Грига, В.М. Фокин / Вестник ВолгГАСУ. – Вып. 27(46). – С. 28-33.

СБОР И ВОЗВРАТ КОНДЕНСАТА

Котовский В.А. – магистрант
филиала МЭИ в г. Волжском

Актуальным для повышения эффективности энергоиспользования на промышленном предприятии является решение вопроса об уменьшении потерь энергии с конденсатом.

Конденсат обычно направляется в деаэратор (питательный бак) промышленной котельной для подпитки котлов. Уменьшение возврата конденсата (или его не возврат) приводит к тому, что происходят значительные материальные и энергетические затраты для приготовления подпиточной воды на химводоочистке промышленной котельной. С другой стороны, температура возвращаемого конденсата в промышленную котельную или теплосеть города должна быть ниже температуры парообразования.

Эффективность работы конденсатного хозяйства промышленного предприятия определяется следующими основными факторами: количеством возвращаемого конденсата, температурой возвращаемого конденсата, стоимостью очистки конденсата, стоимостью электрической энергии (на перекачку конденсата).

При обследовании энергохозяйства промышленного предприятия важное значение с точки зрения выявления резервов экономии энергоресурсов имеет оценка организации сбора, возврата и использования тепла конденсата от паропотребляющего оборудования, состояние эксплуатации конденсатоотводящих устройств и конденсаторопроводов промышленного предприятия.

Неисправное техническое состояние конденсатоотводчиков или их отсутствие у паропотребляющего оборудования приводят к значительным потерям тепловой энергии с пролетным паром, перерасходу пара и, как следствие, к увеличению удельного расхода тепловой энергии на единицу продукции. С другой стороны, это приводит к ухудшению работы конденсатных линий предприятия, не рассчитанных на работу со значительным содержанием пролетного пара в конденсате. При этом гидравлическое сопротивление в конденсатных линиях возрастает, возникает противодавление, что приводит к возникновению гидроударов.

Положение зачастую усугубляется еще и тем, что сбор конденсата на предприятиях происходит в баки открытого типа. При этом происходят большие потери с паром вторичного вскипания, который сбрасывается в атмосферу.

Следует подчеркнуть, что установка конденсатоотводчика после паропотребляющего оборудования обязательна. Отсутствие его должно быть отражено в отчете по обследованию энергохозяйства. Необходимо обратить внимание на способ установки конденсатоотводчика, а именно, нужна обводная линия, а перед конденсатоотводчиком должен быть установлен обратный клапан, предотвращающий передавливание конденсата в теплообменный аппарат из конденсатной линии. Для точной оценки количества тепла, теряемого с конденсатом, процентное содержание пролетного пара в конденсате можно определить путем его калориметрирования (весовым или мерным способом).

На промышленных предприятиях в эксплуатации находится большое количество разнообразных по конструкции конденсатоотводящих устройств, разделяющихся на устройства периодического и непрерывного действия. К ним относится широкий класс конденсатоотводчиков с открытым и закрытым поплавком, термодинамические, термостатические, подпорные шайбы, гидравлические затворы и т.п. Каждый из типов конденсатоотводящих устройств имеет свои определенные границы применимости по давлению, пропускной способности.

В процессе проведения обследования конденсатного хозяйства возникает практическая задача оценки не только работоспособности конденсатоотводчиков основного паропотребляющего оборудования, но и проверка соответствия установленного типа конденсатоотводчика фактической производительности и давлению.

В конденсате, направляемом в питательные баки котельной или теплосеть города, должны полностью отсутствовать отравляющие и ядовитые вещества, окислители, механические примеси, масла и органические вещества, вызывающие вспенивание котловой воды. Кроме того, конденсат может содержать не только масла, но и различные соли. Разрушающее действие на оборудование и конденсатопроводы оказывают главным образом кислород и углекислота, которые устраняются методами дегазации. В каждом конкретном случае при выдаче рекомендации по дегазации и обезмасливанию конденсата должны учитываться содержание растворенных газов на литр конденсата, содержание масла, примесей. Способы дегазации конденсата, которые могут быть рекомендованы на промышленном предприятии, – механический, термический, химический и адсорбционный.

Вопрос использования теплоты конденсата от паропотребляющего оборудования на промышленном предприятии решается в каждом конкретном случае с учетом специфики производства на основе технико-экономических расчетов рассматриваемых альтернативных вариантов.

Наиболее типичными решениями могут быть:

– установка на конденсатной линии теплообменных аппаратов, предназначенных для приготовления горячей воды для технологических и хозяйственно-бытовых нужд предприятия;

– использование тепла выпара от баков сбора конденсата путем установки либо теплообменника для приготовления горячей воды на технологические и хозяйственно-бытовые нужды, либо пароструйного эжектора, предназначенного для повышения потенциала давления пара путем подачи для подмешивания свежего пара;

– использование ступенчатой схемы сбора возврата конденсата с установкой сепараторов;

– более глубокое использование тепла конденсата в технологических процессах и установках.

КОМБИНИРОВАННАЯ СИСТЕМА ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ТЕПЛИЧНОГО ХОЗЯЙСТВА

Мантуленко А.С. – студентка филиала МЭИ в г. Волжском
Горчаков А.М. – доцент филиала МЭИ в г. Волжском

Потребность населения в круглогодичном потреблении свежих и качественных растительных продуктов, реализуемых через торговые сети и заведения общественного питания, определяет актуальность организации тепличного хозяйства. Особую значимость эта проблема имеет в регионах с суровым и продолжительным холодным периодом.

Теплица – это строение с прозрачным или частично прозрачным наружным ограждением из пленки, стекла или пластика, внутри которого создается необходимый микроклимат. Качеству поддержания микроклимата в тепличных предприятиях с каждым годом уделяется все большее внимание. Правильно выбранная технология поддержания микроклимата – одна из важных составляющих повышения урожайности. При этом удельные энергетические затраты в создании необходимого микроклимата определяют эффективность хозяйства и дополнительную возможность существенного уменьшения себестоимости производимой продукции.

Средний уровень рентабельности инвестиций в тепличные хозяйства составляет в России 30 %. Многие тепличные хозяйства выращивают такие культуры, как редис, кабачки, баклажаны, помидоры, огурцы, зеленый лук, салат листовой, укроп и петрушку. Большую прибыль тепличному хозяйству приносят цветочные культуры и овощная рассада. Каждое тепличное хозяйство по-своему уникально, так, например, удельный вес энергоносителей в структуре затрат при выращивании овощей и цветов в каждом хозяйстве имеет свои показатели и зависит от климатических условий, применяемых технологий и многих других факторов. Авторами произведен расчет теплоснабжения теплицы ангарного типа из поликарбоната площадью 2 500 м^2 в селе Гусёвка Волгоградской области. Теплица была разработана для выращивания роз в зимний период со средней температурой окружающей среды минус 13,5 °С. Для возделывания выбранной культуры оптимальный температурный режим должен быть в пределах 20-22 °С.

С учетом исходных данных расчётом определено, что суммарные тепловые потери в данной теплице в зимнее время составляют 511 кВт. Это достаточно большая тепловая нагрузка. Решено было подобрать два газовых котла мощностью по 300 кВт марки RS-D300. Использование газа в этих котлах экономически выгодно, что обусловлено КПД агрегата и сокращением расхода топлива. Наличие двух котлов меньшей мощности предоставляет возможность обогревать часть площади теплицы, в то время как во второй части теплицы почва может отдыхать или подготавливаться к посадке следующей партии. Наличие одного котла большей мощности снижало бы КПД агрегата при регулировании тепловой производительности и не способствовало бы экономии топлива.

Проблемой при ведении тепличного хозяйства обычно являются неоправданно большие затраты на традиционные энергоресурсы. Резервом дальнейшего повышения экономической эффективности в этом производстве в современных условиях может служить широкое использование нетрадиционных экологически чистых источников энергии: энергии солнца, ветра, тепла земли, гейзеров и т.д. Поэтому было предложено оценить использование солнечной энергетики для поддержания тепловой потребности котла хотя бы для обеспечения горячим водоснабжением на бытовые нужды теплицы.

Для этого подобрана система из солнечных коллекторов с вакуумными трубками серии SR 58/1800-R1, с минимумом расходов на эксплуатацию, экологически безвредные, а также в значительной степени экономящие топливные ресурсы. По данным проведённого расчета для представленной теплицы необходим персонал из 10 человек, а расход теплоты на горячее водоснабжение такого количества людей составляет 0,65 кВт. Учитывая, что село Гусёвка находится на широте 47°, а также технические характеристики приведенных солнечных коллекторов, определили, что необходимая площадь для их размещения составила 127,4 м^2. Такая площадь соответствует 26 секциям по 30 трубок в каждой. Их расположение выполняется в три секции последовательно и девять – параллельно. КПД такой солнечной установки составляет 38,3 %. Предлагаемая теплица является самостоятельным и автономным объектом. Однако громоздкость сооружения солнечной установки, невысокий КПД её в зимний период, высокие затраты на себестоимость, монтаж и эксплуатацию определили нерентабельность данного предложения. Например, стоимость одной только вакуумной трубки солнечной установки составляет порядка полутора тысяч рублей.

В заключение хотелось бы отметить, что в таком климатическом регионе, как Волгоградская область, возможно использование других видов альтернативной энергии в организации тепличного хозяйства. Использование теплового насоса или энергии ветра будут более выгодным, а использование установки солнечных коллекторов является нецелесообразным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Теплицы и парники СНиП 2.10.04-85. Минрегион России, 2012. – 19 с.
2. Курс лекций «Источники систем теплоснабжения». – 163 с.

3. Краткая энциклопедия домашнего хозяйства «Сделай ЭТО САМ». Строительство теплицы (конструкции, материалы, эксплуатация, отопление, вентиляция) / Составитель: Б. Дюмин, редактор: С. Зиновьева. – М.: Астрель • АСТ, 2005. – 160 с.
4. http://www.alternenergy.ru/
5. http://TEPLITSA – UROJAY.RU

ВЫБОР ВАРИАНТА РАСЧЕТА ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ СЛОЖНЫХ СХЕМ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ

Султанов М.М. – канд. техн. наук, доцент
филиала МЭИ в г. Волжском
Перевозчиков Ю.И., Осипова С.С. – магистранты
филиала МЭИ в г. Волжском

Управление сложными схемами тепловых сетей в соответствии с типовой инструкцией по эксплуатации тепловых сетей и правил технической эксплуатации тепловых электрических станций и сетей предполагает обеспечение качества поставляемой продукции.

Для тепловых сетей качество поставки тепловой энергии определено в поддержании давления и температуры теплоносителя (в подающей и обратной магистрали).

К проблемам обеспечения качества поставки тепла потребителям могут быть отнесены:

– неравномерная загрузка трубопроводов теплосети по зонам распределения потребителей;

– превышение нормативных потерь тепла в связи с неэффективным теплогидравлическим режимом теплосети.

Решение вопроса равномерной загрузки трубопроводов теплосети является сложным по той причине, что договорные нагрузки потребителей не всегда соответствуют максимальной мощности тепловой магистрали.

Например, при отпуске тепла от Волжской ТЭЦ для коммунально-бытовых нужд населения города Волжского максимальная мощность (расчетная) тепловой магистрали ТМ-1 составляет 886 МВт (D_y подающей и обратной тепловой сети равен 1 200 мм), тогда как договорная (присоединенная) нагрузка равна 453 МВт. Согласно этому определенно имеется резерв пропускной способности ТМ-1 для условий температурного графика 145/70.

Такие же несоответствия можно зафиксировать и на других участках тепловой сети (например, ТМ-2, ТМ-4, ТМ-12 и др.).

Если имеются участки тепломагистралей с резервом мощности, то выбор эффективного режима эксплуатации может находиться в диапазоне количественного регулирования. Результаты расчета при переходе на количественное регулирование нагрузки для других температурных графиков представлены в таблице.

Таблица

Результаты расчета предельной мощности ТМ-1 для вариантов температурного графика

Наименование	Размерности	Температуры		
		145/70	130/70	110/70
Количество тепла	т/ч	10 173,6	10 173,6	10 173,6
Количество теплоты	МВт	886	708	472
Договорная нагрузка	МВт	453	453	453
Резерв предельной мощности	МВт	100	80	53

Таким образом, можно проводить оценку эффективной работы тепловой магистрали по пропускной способности.

Проблему по не превышению нормативных значений потерь тепла и электроэнергии при транспортировке теплоносителя организацией, эксплуатирующей тепловые сети, авторы предполагают решать внедрением расчетно-наладочной модели поиска оптимального гидравлического режима как одного участка теплосети, так и всей схемы теплоснабжения.

Снижение общего объема теплоносителя через существующую тепловую сеть до значений, обеспечивающих надежную поставку тепловой энергии потребителям по договорным нагрузкам возможно за счет регулирования заданного потока теплоносителя (шайбирование, установка регуляторов расхода и т.д.).

Расчет эффективных значений расхода сетевой воды и диаметра расчетного сечения осуществляется по формулам:

$$G_{эф} = \frac{Q_{пред} - Q_{рез}}{C_p \Delta t}; \quad (1)$$

$$d_{эф} = \sqrt{\frac{4G_{эф}}{\pi \rho \omega}}, \quad (2)$$

где $Q_{пред}$ – предельное количество теплоты, МВт; $Q_{рез}$ – резервное количество теплоты, МВт; C_p – удельная теплоемкость, кДж/кг·К; Δt – разность температур, К; ρ – плотность, кг/м^3; ω – скорость, примем $\omega = 2{,}5$ м/с.

Для значения тепловых нагрузок, приведенных в таблице, согласно формулам (1) и (2) получаем эффективное сечение ТМ-1 мм.

Авторы считают, что практическая проработка предлагаемой модели поиска оптимального гидравлического режима с помощью используемых пакетов программ гидравлического расчета тепловой сети (на базе ZuluThermo) и ее апробация в условиях схемы теплоснабжения города Волжского обеспечат эффективную загрузку тепловых сетей и снижение эксплуатационных затрат организаций, эксплуатирующих тепловые сети.

ЭФФЕКТИВНАЯ СИСТЕМА ОБОГРЕВА ФУТБОЛЬНОГО ПОЛЯ

Фомичева Ю.И. – студентка филиала МЭИ г. Волжском
Горчаков А.М. – доцент филиала МЭИ г. Волжском
Гриценко А.Н. – канд. техн. наук, доцент
филиала МЭИ г. Волжском

Футбол уже давно превратился в круглогодичный вид спорта. Поэтому для стран, климатические условия которых осложняют поддержание футбольных газонов в холодный период в должном состоянии, использование системы обогрева полей является актуальным требованием. К числу таких стран относится и Россия. Наличие системы обогрева давно стало необходимым условием сертификации стадиона для игр, проводимых в рамках российской футбольной Премьер Лиги, а также под эгидой ФИФА и УЕФА. Переход российского футбола на систему «осень-весна» привело к тому, что все домашние футбольные поля команд Премьер Лиги, первого и второго дивизионов должны стать обогреваемыми [1].

Система почвенного подогрева газона игрового поля предназначена для уменьшения влияния неблагоприятных погодных условий и поддержания приемлемых характеристик газона для проведения игр в условиях отрицательных температур, что существенно увеличивает продолжительность игрового сезона. Система почвенного подогрева газона состоит из (рис. 1):

– системы греющих трубопроводов, уложенных непосредственно под газоном в основание игрового поля;

– распределительного коллектора, уложенного в грунте вдоль одной из сторон газона игрового поля;

– теплотрассы, связывающей распределительный коллектор с индивидуальным тепловым пунктом системы;

– индивидуального теплового пункта [2].

На натуральном земляном поле система подогрева используется для продления футбольного сезона в холодный период года. Систему подогрева включают осенью при среднесуточной температуре ниже 2 °С, и её работа эффективна до температуры минус 10 °С. В весенний период систему обогрева включают за 2-3 недели до начала футбольного сезона для размораживания и сушки газона, с последующим созданием благоприятных условий для роста травы. Зимой, в период сильных морозов, систему подогрева на натуральных земляных полях отключают, и газону предоставляется биологический отдых, продолжительность которого зависит от климатических условий и составляет в среднем три месяца [3].

В качестве теплоносителя в системе обогрева футбольного поля используется раствор этиленгликоля. Отопительные трубы, прокладываемые в открытом грунте, выполняют из морозостойкого сшитого полиэтилена (PEX-c).

Для оценки теплового потребления и утилизации сбросной теплоты канализационных стоков по известной методике [3; 4] проводился расчет системы обогрева футбольного поля, расположенного в Волгоградской области.

Тепловые полиэтиленовые трубы с толщиной стенки 2 мм и наружным диаметром 18 мм уложены на грунте поля, как показано на рис. 1.

При расчёте за характерную скорость ветра для стадионов и поверхностей с травяным покровом, имеющую технико-экономическое обоснование, необходимо принимать скорость ω = 0,5 м/с, а температуру на поверхности поля $t_{пов}$ = 1 °С [4]. Размеры подогреваемого газона: a = 115 м; b = 72 м [5; 6].

Трубы уложены под поверхностью на глубину 250 мм с шагом 200 мм.

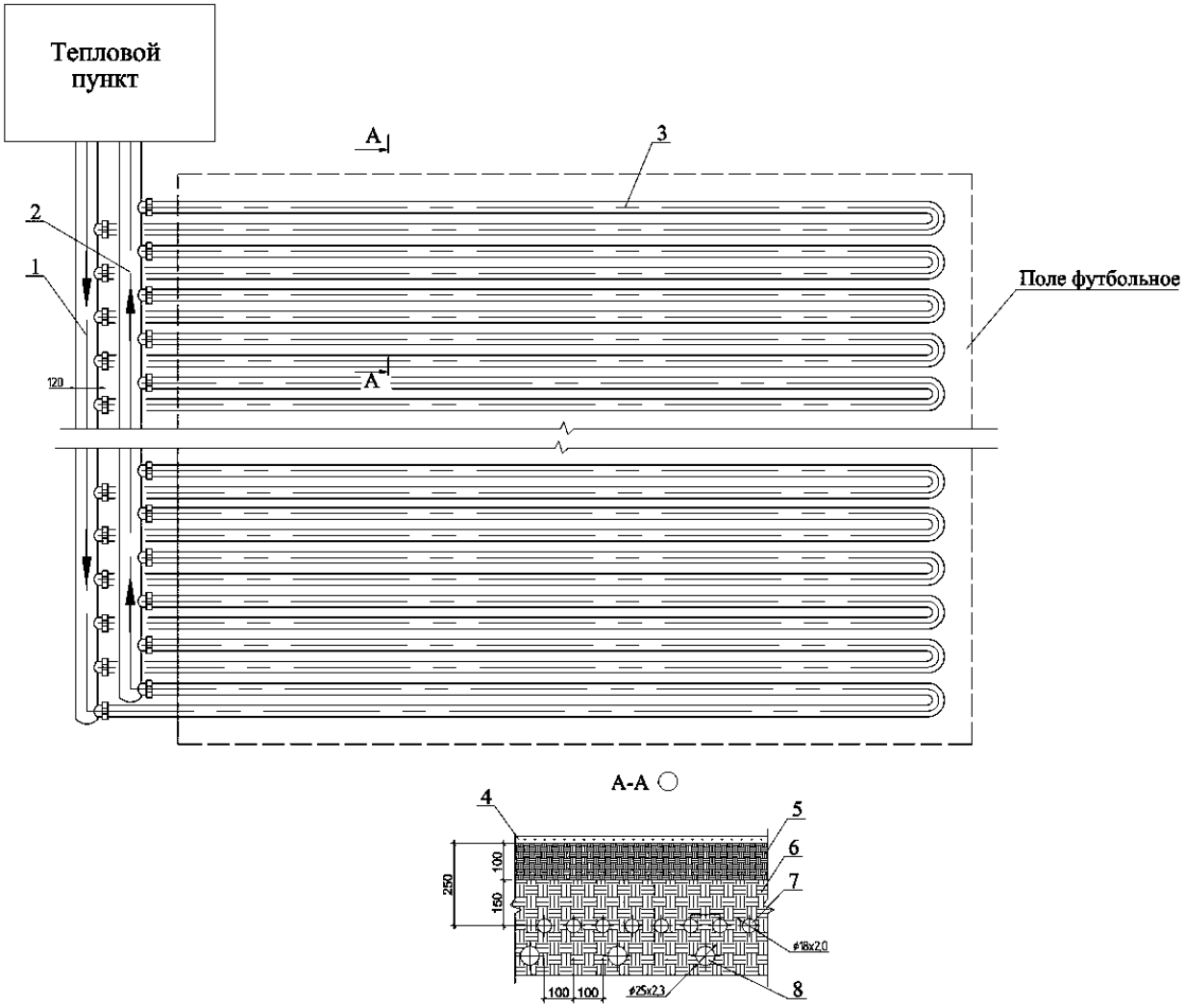


Рис. 1. Система обогрева футбольного поля:
1 – коллектор подающий; 2 – коллектор обратный; 3 – трубопровод подогрева;
4 – покров земляной; 5 – газон заменяемый; 6 – грунт; 7 – трубопровод подогрева;
8 – трубопровод дренажа

По расчётным данным получилось, что общие тепловые потери на футбольном поле при минимально допустимой температуре воздуха минус 10 °С составляют $Q_{общ}$ = 574,86 кВт.

На рис. 2 приведена применяемая ранее схема системы подогрева и теплового пункта. Первичный теплоноситель – вода с температурой $t_{в1}$ = 85 °С

($t_{в2}$ = 50 °С) из автономного теплоисточника (котла) проходит через пластинчатый теплообменник с расходом $G_в$ = 3,58 кг/с и нагревает водный раствор этиленгликоля с входной первоначальной температурой $t_{э.г1}$ = 13 °С до требуемой $t_{э.г2}$ = 43 °С. После этого раствор направляется в трубы обогрева газона футбольного поля с расходом $G_{э.г}$ = 4,81 кг/с.

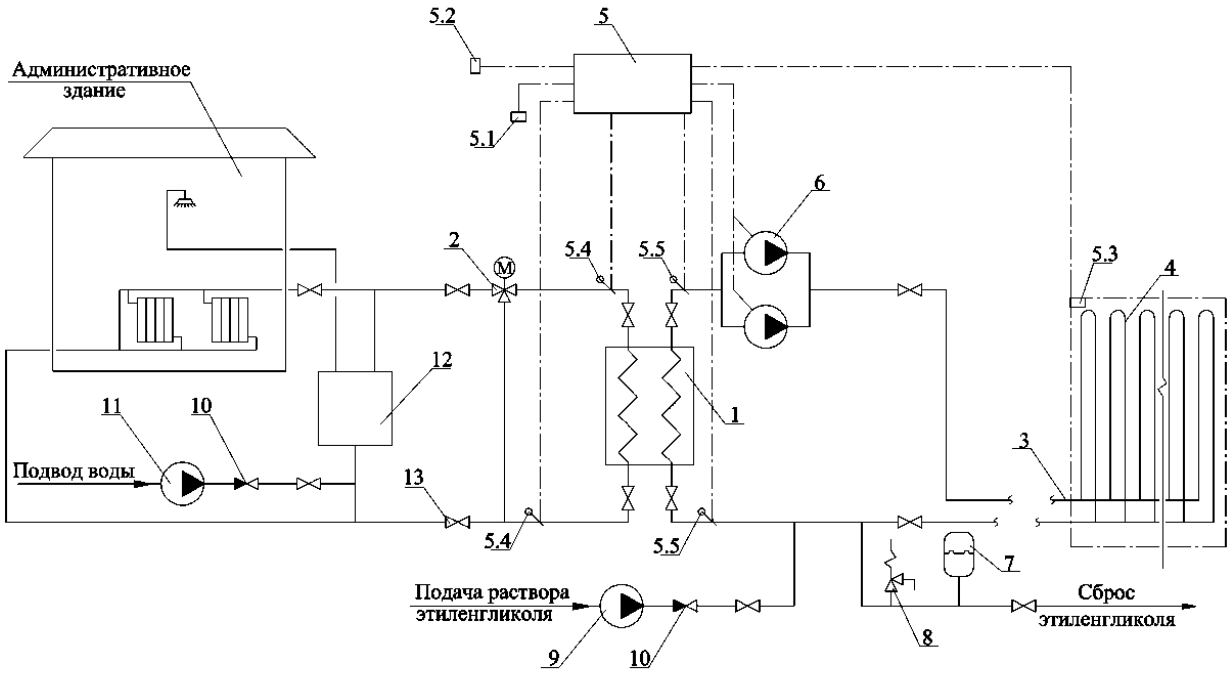


Рис. 2. Схема теплового пункта и системы подогрева:
1 – пластинчатый теплообменник; 2 – трехходовой клапан с электроприводом; 3 – коллекторы; 4 – трубопроводы подогрева; 5 – блок автоматического управления: 5.1 – электронный регулятор; 5.2 – датчик температуры наружного воздуха; 5.3 – датчик температуры грунта; 5.4 – датчики температуры воды; 5.5 – датчики температуры раствора этиленгликоля; 6 – сдвоенный насос (рабочий и резервный); 7 – мембранный расширительный бак; 8 – предохранительный клапан; 9 – насос для заполнения системы подогрева раствором этиленгликоля; 10 – обратный клапан; 11 – насос; 12 – котел; 13 – вентиль

Так как обогрев футбольного поля является низкотемпературным, то для уменьшения нагрузки или тепловой производительности на котёл предложено использование грунтового теплового насоса в системе обогрева поля. На рис. 3 показана предлагаемая схема системы подогрева, в циркуляционный контур раствора этиленгликоля которой включен тепловой насос. Такая реконструкция схемы теплового пункта позволит повысить температуру раствора перед пластинчатым теплообменником примерно на 10 °С. Расчётом показано, что это в свою очередь снизит нагрузку котла на 175,08 кВт, а, соответственно, расход первичного теплоносителя – воды – на 1,19 кг/с. При этом экономия выработки тепловой энергии на котле составит

$$\Delta\% = 175{,}08 \cdot 100\ \%/574{,}86 = 30{,}5\ \%.$$

Это и определяет эффективность предложенного решения.

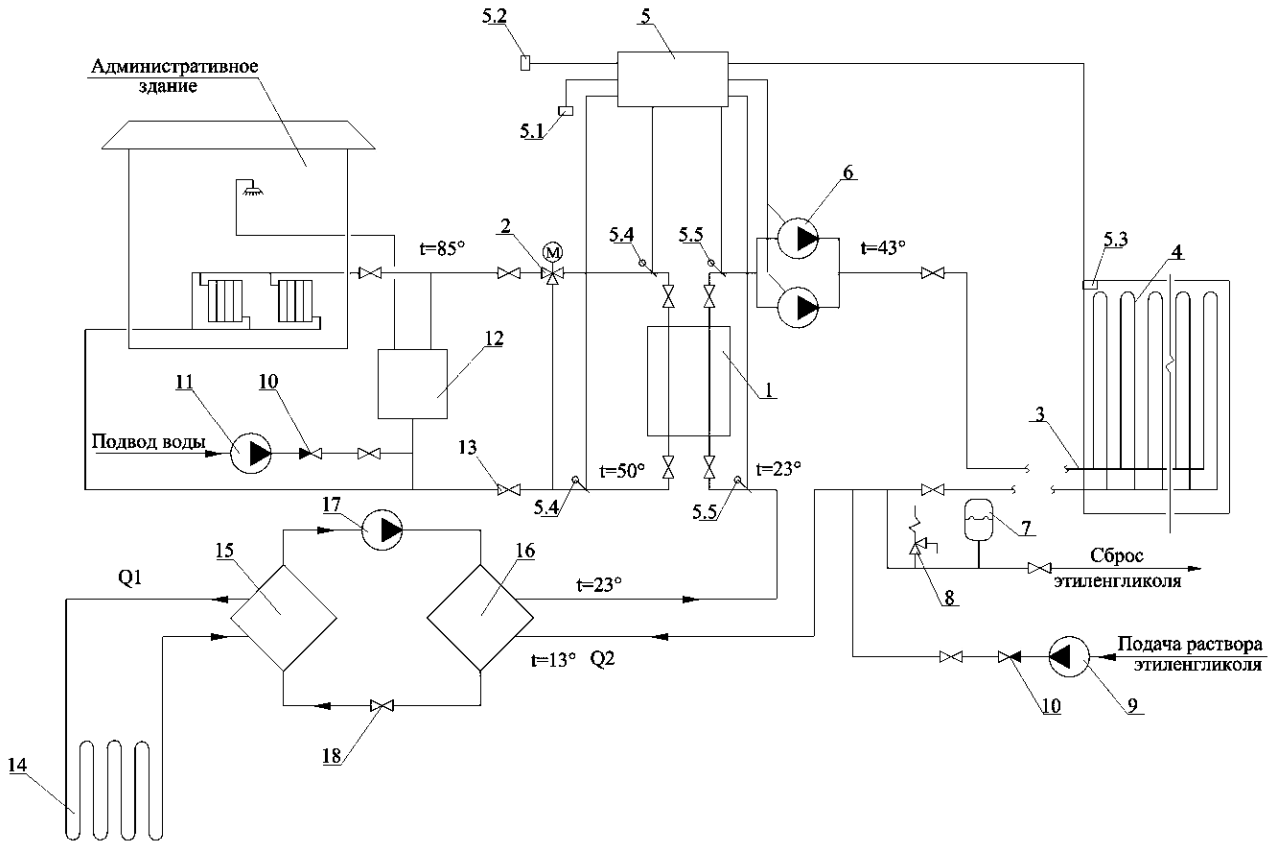


Рис. 3. Схема теплового пункта и системы подогрева с грунтовым тепловым насосом:
1 ÷ 13 – те же обозначения, что и на рис. 2; 14 – грунтовый теплообменник;
15 – испаритель; 16 – конденсатор; 17 – компрессор; 18 – дроссель

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. http://www.iskraten.ru – Обогрев футбольных полей.
2. http://www.megastadion.ru – Жидкостный подогрев газона футбольного поля.
3. *Тарабанов, М.Г.* Системы подогрева футбольных полей / М.Г. Тарабанов, В.Ф. Сергеев, С.В. Буров // Журнал «АВОК». – № 7. – 2003.
4. *Сеньковский, К.* Справочник по подогреву открытых поверхностей / К. Сеньковский, Я. Юхницкий. – Варшава, 2004.
5. СП 31-115-2006. Открытые плоскостные физкультурно-спортивные сооружения. – М.: Издательство стандартов, 2006.
6. *Алескер, Я.Б.* Воздушная система подогрева спортивных полей и площадок / Я.Б. Алескер, Н.Н. Кузнецова // Журнал «АВОК». –№ 8. – 2011.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ

Шамигулов П.В. – канд. техн. наук, доцент
филиала МЭИ в г. Волжском
Замятина Д.А. – студентка филиала МЭИ в г. Волжском

При эксплуатации теплоэнергетических объектов нередко встречаются ситуации, когда технологический процесс требует осуществления глубоких изменений режима работы, которые сопровождаются существенными изменениями регулируемых параметров. Минимизировать энергетические затраты на осуществление таких переходов можно максимальным сокращением времени переходного процесса. Классический алгоритм регулирования, например ПИД, с этой задачей не справляется, так как имеет ограниченное быстродействие в силу ограничений на колебательность процесса регулирования. Определение управляющего воздействия в этом случае осуществляется на основе подходов теории оптимального управления. В частности, для линейных неколебательных объектов, к которым можно отнести большинство теплоэнергетических объектов, можно воспользоваться теоремой А.А. Фельдбаума о решении задачи о максимальном быстродействии [1].

Решение задачи максимального быстродействия для линейного неколебательного объекта n-го порядка представляет собой кусочно-непрерывную функцию времени $u(t)$, принимающую значения только с границы области допустимых управлений. При этом количество интервалов, на которых u сохраняет свое значение, равно n.

Теорема Фельдбаума позволяет определить качественный вид управляющего воздействия, но не дает ответа на вопрос, в какие именно моменты времени необходимо переключать управляющее воздействие, а также, сколько будет длиться оптимальное управление.

Аналитическое решение задачи о максимальном быстродействии возможно только для простых объектов. В более общем случае требуется численное решение. В данной работе предложена эффективная методика решения задачи, представляющая собой комбинацию аналитических и численных методов. Текущее состояние объекта определяется по аналитической зависимости [2]. Определение моментов времени переключения управляющего воздействия производится путем численного решения систем уравнений, связывающих исходное и требуемое состояния объекта управления:

$$\vec{z}(T0_2, \vec{z}(T0_1, \vec{z}(T0_0, \overrightarrow{z_0}, U_{\max}), U_{\min}), U_{\max}) = \vec{z}(T),$$

где $U_{\min}$, $U_{\max}$ – минимальное и максимальное воздействие; $\vec{z}$ – вектор переменных состояния объекта в произвольный момент времени; T – время оптимального управления; $T0$ – длительность интервалов оптимального управления; $\overrightarrow{z_0}$ – вектор

начальных условий; $\vec{z}(T)$ – вектор-функция, определяющая значения вектора состояния объекта в произвольный момент времени.

Для определения функции $\vec{z}(T)$ необходимо определить вспомогательные функции [2].

Найдем матрицу Вандермонда вектора состояния объекта:

$$\mathrm{Won}(A) := \left| \begin{array}{l} n \leftarrow \mathrm{rows}(A) \\ \lambda \leftarrow \mathrm{eigenvals}(A) \\ \text{for } i \in 0..(n-1) \\ \quad \text{for } j \in 0..(n-1) \\ \quad\quad w_{j,i} \leftarrow (\lambda_j)^i \\ w \end{array} \right.$$

$$\mathrm{a}(A) := \mathrm{Won}(A)^{-1} \cdot \exp(\mathrm{eigenvals}(A));$$

$$\exp A(A) := \sum_{k=0}^{rows(A)-1} (a(A)_k \cdot A).$$

Тогда можно записать систему уравнений состояния объекта:

$$z(t, z0, x) := \exp A(A \cdot t) \cdot z0 + A^{-1} \cdot (\exp A(A \cdot t) - \mathrm{identity}(\mathrm{rows}(A))) \cdot Bx,$$

которая решается численным способом.

Решим задачу на примере объекта 3-го порядка, передаточная функция которого имеет вид:

$$W(p) = \frac{2{,}28}{(6{,}6p+1)(6{,}8p+1)(6{,}9p+1)}.$$

Для данного объекта уравнения состояния в векторно-матричной форме можно записать:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{310} & -\frac{20{,}3}{310} & -\frac{137}{310} \end{pmatrix}; \quad \vec{B} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{2{,}28}{310} \end{pmatrix}.$$

Зададим начальное приближение промежутков времени и решим систему из уравнений, связывающих начальные условия с требуемым конечным состоянием zT (рис. 1).

Полученное время регулирования приближенно равно 8 секундам.

Построим график моментов времени оптимального управления и переходную характеристику объекта (рис. 2).

Сравним переходную характеристику, полученную с помощью метода оптимального управления, с управлением с помощью ПИД-регулирования (рис. 3).

$$z0 := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \qquad zT := \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \qquad T0 := \begin{pmatrix} 10 \\ 5 \\ 3 \end{pmatrix}$$

Given

$$ku\left(ku\left(ku\left(z0, xmax, T0_0\right), xmin, T0_1\right), xmax, T0_2\right) = zT$$

$$0 = 0 \qquad 0 = 0$$

$$T0 > \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$TR := Re(Find(T0))$$

$$TR = \begin{pmatrix} 2.525 \\ 4.857 \\ 0.975 \end{pmatrix}$$

Рис. 1. Программное вычисление моментов времени оптимального управления

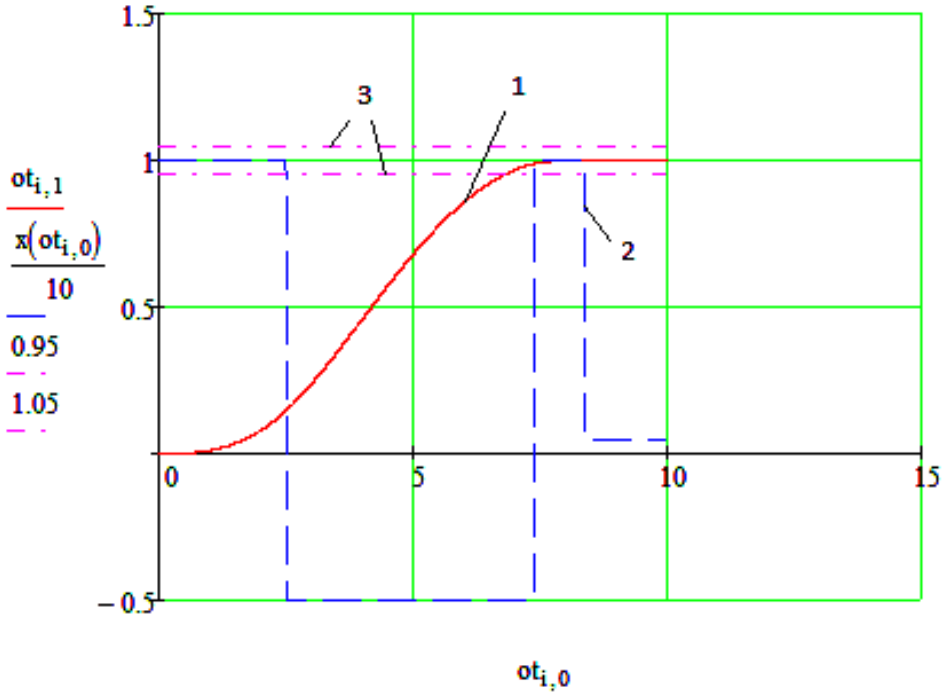


Рис. 2. График моментов времени оптимального управления
и переходная характеристика объекта:
1 – регулируемая величина; 2 – оптимальное управляющее воздействие;
3 – допустимые границы конечного состояния

Из рис. 3 видно, что время управления равно приблизительно 45 секундам.

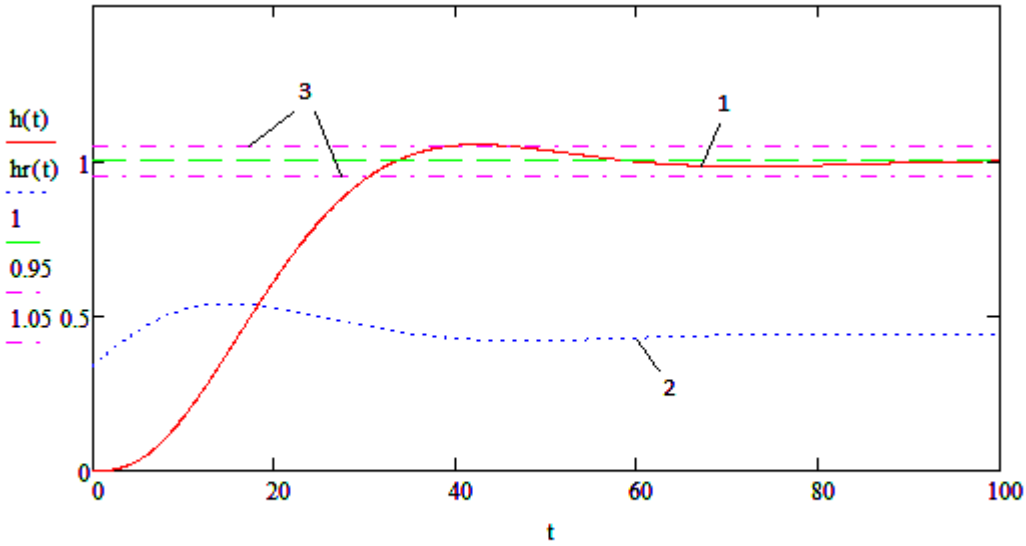


Рис. 3. Графики переходных характеристик, полученные с помощью метода оптимального управления и с помощью ПИД-регулирования:
1 – переходная характеристика объекта, управляемого ПИД-регулятором;
2 – управляющее воздействие, формируемое ПИД-регулятором;
3 – допустимые границы конечного состояния

Из сопоставления результатов видно, что предлагаемая методика позволяет достаточно эффективно решать задачу о максимальном быстродействии и может применяться в управлении теплоэнергетическими объектами для более эффективного управления объектами в переходных режимах. Она позволяет существенно уменьшить время переходного процесса, а также, как следствие, сократить энергетические затраты на управление.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Фельдбаум, А. А.* Основы теории оптимальных автоматических систем / А.А. Фельдбаум / – М.: Книга по Требованию, 2012. – 553 с. – ISBN 978-5-458-43797-4.

2. *Замятина, Д.А.* Общее решение уравнений состояния линейных объектов в задачах оптимального управления / Д.А. Замятина, П.В. Шамигулов // Девятнадцатая межвузовская научно-практическая конференция молодых ученых и студентов. г. Волжский, 27 мая – 31 мая 2013 г.: Тезисы докладов. – Волжский: Филиал МЭИ в г. Волжском, 2013.

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА КАК ФОРМА МЫШЛЕНИЯ
(Логико-методологический анализ)

Ломиворотов М.М. – канд. филос. наук, доцент
филиала МЭИ в г. Волжском
Шевцова С.Б. – ст. преподаватель
филиала МЭИ в г. Волжском

Обязанность мыслить – удел современного человека;
обо всем, что попадает в орбиту науки,
он должен мыслить не иначе,
как в форме строгих логических суждений.

Х. Ортега-и-Гассет,
испанский философ (1883-1955)

Промышленная теплоэнергетика – это фундаментальная и прикладная наука, специальная учебная дисциплина, имеющая свой объект и предмет исследования. По мнению авторов, это еще и форма мышления.

В научной и учебной литературе под мышлением понимается процесс познания человеком предметов, явлений окружающего мира. Мышление осуществляется в формах. Фома мышления – это определенный способ связи элементов мыслей [2]. Алгоритмы мышления формируются на логической ступени познания. Дело в том, что механизм познания – это сложный процесс, который включает следующие основные элементы:

1) субъект познания. Это человек, познающий мир (обозначается символом «S»);

2) объект познания. Это предметы, явления, процессы, окружающие исследователя (обозначаются символом «О»);

3) отражение, как взаимодействие между субъектом (S) и объектом (О).

Отражение включает чувственную и логическую ступени познания и их материализацию в терминах.

На чувственной ступени познания человек отражает многообразие мира в ощущениях, восприятиях, представлениях. На логической ступени – познает мир в формах мышления: понятиях, суждениях, умозаключениях. Осмысленную информацию, полученную в чувственных и логических формах, человек закрепляет (материализует) в словах, предложениях, устной или письменной речи (терминах).

О	Взаимодействие →	S	Понятие Суждение Умозаключение	}	Логическая ступень
			Ощущение Восприятие Представление	}	Чувственная ступень
			Слово Предложение Речь	}	Термины

Рис. 1. Общий механизм процесса познания

В данном механизме познания можно выделить три уровня отношений.

Отношение между языковым и концептуальным уровнем, которое обозначается как отношение десигнации, – это отношение между термином и понятием антисимметричное и, как правило, не взаимооднозначное из-за возможности многозначных терминов. Отношение указания, или референции – это отношение между термином и предметом или понятием и предметом. Наконец, композиция отношений десигнации и референции дает отношение денотации.

<table>
<tr><td colspan="3"></td><td rowspan="5">Десигнация</td><td rowspan="2">Понятие «ТЭЦ»</td></tr>
<tr><td></td><td colspan="2">Референция</td></tr>
<tr><td>Предмет «ТЭЦ»</td><td>Денотация =</td><td>Референция
+
Десигнация</td><td></td></tr>
<tr><td></td><td colspan="2">Референция</td><td rowspan="2">Термин «ТЭЦ»</td></tr>
<tr><td colspan="3"></td></tr>
</table>

Рис. 2. Уровни отношений познания

Данные отношения прослеживаются во всех областях научного исследования, в том числе и в промышленной теплоэнергетике. Вместе с тем, в теплоэнергетике последние имеют свои особенности, которые, прежде всего, обусловлены предметом науки (исследования), специальной терминологией, содержанием форм мышления.

Эти особенности глубоко проанализированы в современной научной и учебной литературе. Однако в исследованиях не учитываются личностные особенности мышления. Насколько это важно, авторы попытались доказать исходя из анализа референции и денотации. Последние различаются как виды отношений. Референция осуществляется непосредственно, а денотация – через способ выделения объекта, указанный в понятии, суждении, умозаключении. Такого рода различие приводит к выявлению различных признаков, характеристик содержания форм мышления, носящих личностный характер.

Первой основной формой мышления в промышленной теплоэнергетике является научное понятие, которое имеет содержание и объем.

Например, содержание понятия «энергосбережение» составляет множество признаков, характеризующих вид деятельности: по экономии ресурсов, эколого-энергетической безопасности, распределению энергии, полезному использованию энергии и т.д.

Объем этого понятия включает все виды деятельности по энергосбережению, имевшиеся в прошлом, настоящем, и те, что появятся в будущем. Однако на самом деле это не так. Объем понятия не должен меняться от времени его употребления.

Далее, содержанием понятия, как уже отмечалось, считается множество признаков, связываемых с термином и присущих предметам их объема. Однако и здесь нужно привести некоторое различие. Дело в том, что с тем или иным

термином может связываться субъективное содержание в процессе коммуникации. Субъективное содержание – это множество признаков, которые отдельный ученый приписывает предметам их объема. Субъективное содержание по этой причине неустойчиво, оно изменяется от человека к человеку и от времени употребления.

Наиболее подходящим видом содержания понятия «энергосбережение» будет, по-видимому, так называемое конвенциональное по соглашению, или лексическое содержание множества признаков, связываемых с понятием по принятому определению. Иными словами, дефиниция «энергосбережение» должна быть согласована между исследователями.

Следующей, более сложной после научного понятия, формой мышления является научное суждение. Так, в промышленной теплоэнергетике широко используют два научных суждения: «$E = mc^2$» и «$Q = mr$». С одной стороны, они имеют общую структуру «*S* есть *P*», где «*S*» – субъект суждения, «*P*» – предикат суждения, слово «есть» – связка. С другой стороны, в данных формулах есть личностные особенности мышления. А именно, А. Эйнштейн считал, что формула $E = mc^2$ показывает не просто связь между материей и энергией, а равнозначность материи и энергии.

Энергетикам известна и другая формула: $Q = mr$, где Q – количество теплоты, m – масса, r – теплота фазового перехода. Любые фазовые (агрегатные) переходы (плавление, кристаллизация, испарение, конденсация и т.п.) описываются этой формулой.

Но тепло – это разновидность энергии. С точки зрения традиционной логики содержание тепла формулы $Q = m$r должно подчиниться формуле А. Эйнштейна $E = mc^2$.

	A	Контрарность	E	
Подчинение				Подчинение
	I	Подконтрарность	O	

Рис. 3. Логический квадрат отношений основных видов суждений

Согласно правилам логического квадрата данные два суждения, выраженные формулами, находятся в отношении подчинения. Однако эксперименты, проведенные в теплоэнергетике по формуле $Q = mr$, показали, что при подводе тепла в количестве Q (или его отводе) в новое фазовое состояние переходит

такое количество вещества, которое прямо пропорционально количеству тепла Q и обратно пропорционально теплоте фазового перехода r. Данные результаты отличаются от вывода А. Эйнштейна о том, что $E = mc^2$.

Следующей, более высшей по происхождению формой мышления, является научное умозаключение. Все умозаключения (дедуктивные) имеют общую структуру, выраженную одной из фигур силлогизма $P – M$:

$$\frac{\boldsymbol{M – S}}{S – P},$$

где S – меньший термин; P – больший термин; M – средний термин.

Это относится и к умозаключениям промышленной теплоэнергетики. Тем не менее, они носят и личностный характер. Например, возьмем проблему источников энергии. Так, во второй половине XX века ученый Рудольф Клаузиус утверждал, что все процессы во вселенной текут только в одну сторону, в сторону рассеяния и обесценения энергии при ее использовании, что ведет к неизбежной «тепловой смерти» Вселенной [3].

Вопреки постулату Клаузиуса К.Э. Циолковский писал: «Обратимость явлений подтверждает вечную юность вселенной и дает великие технические перспективы сосредоточения энергии» [4]. Со всей очевидностью данные умозаключения носят противоположные личностные точки зрения относительно источников энергии.

Итак, приведенные выше аргументы, по мнению авторов, заслуживают внимания и вызывают размышление о возможности выделения в формах мышления теплоэнергетики как науки личностных элементов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРА

1. Философский энциклопедический словарь. – М.: Советская энциклопедия, 1983. – С. 391.

2. *Кондаков, Н.И.* Логический словарь – справочник / Н.И. Кондаков. – М.: Наука, 1976. – С. 309.

3. *Гай, И.И.* О малоизвестной гипотезе Циолковского / И.И. Гай. – Калужское книжное издательство, 1959. – С. 21.

4. *Циолковский, К.Э.* Обратимость явлений вообще. Рукопись. Московское отделение Архива А.Н. СССР, ф. 5551, № 13 – В, 1935, стр. 1.

СЕКЦИЯ № 4

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

Председатель: ***Скопов С.А.*** – директор филиала ОАО «ФСК ЕЭС» МЭС Центра, Волго-Донское ПМЭС

Сопредседатель: ***Шамигулов П.В.*** – канд. техн. наук, доцент филиала МЭИ в г. Волжском

Секретарь: ***Реснянская А.А.*** – ассистент кафедры ЭОП филиала МЭИ в г. Волжском

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ЗАДАЧАХ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Арванитаки Н.В. – доцент
Коптелова И.А. – канд. техн. наук, доцент
Филиал МЭИ в г. Волжском

Проблемы энергосбережения на промышленных предприятиях. Основной задачей отечественной промышленности в настоящее время является повышение показателя энергоэффективности производства и снижение себестоимости выпускаемой продукции. Так, например, показатель энергоэффективности России почти в три раза ниже среднемирового. Поэтому одним из перспективных и актуальных направлений научных исследований в России является «Энергетика и энергосбережение».

Экономия единицы энергии на конечной стадии её потребления приводит к экономии 3-4 единиц первичного энергоресурса, а иногда и 10-15 единиц в зависимости от эффективности всех стадий преобразования, транспорта и распределения, которые проходят первичные энергетические ресурсы на пути от производства до конечных потребителей. Средние удельные капитальные вложения в энергосберегающие мероприятия, осуществляемые конечным потребителем энергоносителей, многократно ниже ожидаемых капитальных вложений в производство эквивалентного количества энергетических ресурсов. Системы теплоснабжения и прямого использования топлива в теплотехнологических системах промышленных предприятий, особенно таких, как чёрная и цветная металлургия, химическая и нефтехимическая промышленность, производство строительных материалов и т.д., а также жилищно-коммунальный комплекс являются крупнейшими потребителями органического топлива в России.

На реализацию всего многообразия теплотехнологических процессов (от низкотемпературного нагрева воды до высокотемпературной плавки металлов) непосредственно расходуется около 2/3 органического топлива, более 1/3 вырабатываемой электроэнергии и более 1/2 тепловой энергии. Коэффициент полезного

использования (КПИ) энергии на конечной стадии находится на уровне, редко превышающем 10 % [1].

Эффективное решение задач создания рациональных, с высокой энергоэкономической эффективностью энерготехнологических комплексов предприятий в значительной мере влияет на ускорение развития промышленности – основы экономического развития страны и на значительное сокращение энергопотребления в жилищно-коммунальном комплексе (ЖКК).

В то же время, основными потерями энергоресурсов на промышленных предприятиях и в ЖКК являются тепловые потери. Это связано с низкой степенью преобразования тепловой энергии в технологических процессах, несовершенством теплотехнологического оборудования, нерациональными тепловыми схемами теплотехнологических систем, слабым использованием избыточных внутренних энергоресурсов технологий во внешних системах. К примеру, в таком энергоёмком производстве, как производство минеральных удобрений средний коэффициент полезного использования энергоносителей (КПИ) составляет 2÷3 %.

На рис. 1 приводится структура промышленного производства России, на рис. 2 – отраслевая структура промышленного производства [1].

Рис. 1. Структура потребления электроэнергии по отраслям промышленности и секторам экономики

Рис. 2. Отраслевая структура промышленного производства

Анализируя приведенные диаграммы, можно сделать вывод, что наиболее электроемкая – продукция черной и особенно цветной металлургии, химической и нефтехимической промышленности. Совокупный объем выпускаемой продукции данных отраслей составляет 25 % от всей продукции российской индустрии. Отрасли «смешанных» переделов (ЛДЦБ и промышленность строительных материалов), часть продукции которых следует на дальнейшую переработку, а часть идет в сферу конечного потребления, производят вместе 7,5 % промышленной продукции. Прогрессивная отрасль – машиностроение – занимает в структуре промышленности 18,9 %. При этом конкурентоспособная продукция военно-промышленного комплекса (ВПК) и инновационные технологии занимают в машиностроении незначительную долю (около 1 %) [1].

На неэнергоемкие отрасли, которые выпускают в основном продукцию конечного потребления, – легкую и пищевую промышленность – приходится всего лишь 14,8 % промышленной продукции [1].

Из приведенного анализа следует, что во всех отраслях промышленности довольно высоки потери энергетических ресурсов.

Высокие потери энергетических ресурсов в этих отраслях промышленности обусловлены следующими причинами:

– несовершенство, моральный и физический износ технологических процессов и оборудования;

– несовершенство схем энергоснабжения;

– недостаточное внедрение новых энергосберегающих и безотходных технологий;

– низкий уровень утилизации вторичных энергоресурсов;

– малая единичная мощность технологических линий и агрегатов;

– применение нерегулируемого электропривода и неэкономичной осветительной аппаратуры;

– неэффективная загрузка энергетического оборудования;

– недостаточная оснащённость приборами учета, контроля и регулирования технологических и энергетических процессов;

– недостатки проектных решений при строительстве предприятий.

Поэтому для большинства отечественных промышленных предприятий необходима разработка мероприятий по повышению энергоэффективности технологических процессов.

Наибольшее влияние на энергоэффективность промышленных предприятий оказывает обоснованный выбор оборудования, поскольку именно современное оборудование позволяет сократить потери энергии. Так, например, внедрение частотно-регулируемых приводов позволяет сокращать потери, за исключением повторных включений оборудования с непрерывным циклом работы.

Для проектирования и модернизации энергетической системы необходимы методы проектирования, учитывающие большое количество на рынке отечественного и зарубежного электрооборудования. Основная проблема проектирования заключается в обоснованном выборе оборудования, которое отличается большим разнообразием как по функциональным возможностям, так и по стоимости.

Для решения этой задачи целесообразно использовать теорию принятия решений и в частности морфологический синтез, который основан на последовательном сравнительном анализе альтернативных вариантов.

Приведем краткий алгоритм морфологического синтеза.

1. Сужение области поиска за счёт неудовлетворения требования:

– выбираются требования, у которых тип свертки одинаков во всех вершинах;

– проводится проверка вершин, отобранных на первом шаге, на соответствие требованиям; если требования не выполняются, то вершина помечается как удаленная;

– перебираются все вершины от листьев к корню и проводится проверка двух правил: если имеем вершину «И» и один из приемников помечен как удаленный, то и она помечается как удаленная; если вершина «ИЛИ» и все приемники удаленные, то вершина помечается как удаленная.

2. Перебор вариантов и сравнение показателей:

– рассчитывается одно из поддеревьев;

– находится среди сгенерированных поддеревьев такое, у которого будет наилучший набор критериев;

– для использования морфологического синтеза должна быть проведена большая подготовительная работа; кроме того, перебор дерева может и не привести к результату или дать очевидное решение.

Достоинством метода является возможность его автоматизации. Данный метод позволяет осуществлять последовательный выбор по каждому определенному параметру без учета их весовых коэффициентов для каждого варианта технического решения. В то же время определенный вариант решения с различной степенью легкости может обеспечить необходимое свойство системы, а какие-то свойства этим вариантом вообще не могут быть обеспечены. Поэтому необходим метод, который учитывал бы не только приоритеты каждого свойства или критерия, но и степень легкости обеспечения этого свойства вариантом решения, то есть необходимо введение весовых коэффициентов для каждого варианта решения.

Для решения этой задачи целесообразно использовать метод расстановки приоритетов, предложенный В.А. Блюмбергом и В.Ф. Глущенко на основе задачи о лидере [2]. Оценка в соответствии с этим методом осуществляется с помощью комплексных приоритетов $B_{i\,\text{ком}}$ по формуле

$$B_{i\,\text{ком}} = \sum_{i=1}^{n} \beta'_j B'_{ij},$$

где β'_j – относительный приоритет (значимость) j-го критерия; B'_{ij} – относительный приоритет i-го варианта по j-му критерию; n – количество критериев.

На втором этапе строятся квадратные матрицы для каждого из критериев. В столбцах и строках пишется номер варианта, а на пересечении – коэффициенты (1,5; 1,0; 0,5), указывающие какой вариант предпочтительнее по данному критерию.

Следующий этап предусматривает последовательное определение абсолютных приоритетов B_{ij} вариантов, а затем – относительных B'_{ij}, которые вычисляются в долях единицы. Для расчета B_{ij} каждая строка в матрице умножается на вектор-столбец Σ. Нормированные значения, то есть относительные B'_{ij}, получаются делением B_{ij} на $\sum_{i=1}^{m} B_{ij}$. По этому правилу для каждой таблицы критерия вычисляются приоритеты B'_{ij}.

Далее определяются значимости критериев. Для этого также применяют метод расстановки приоритетов с той лишь разницей, что объектами сопоставления теперь являются не варианты решений, а критерии оценки d_j. Задача решается по приведенной выше схеме: составляется система сравнений и на ее основе – квадратная матрица смежности. Вычисленные относительные приоритеты β'_j и являются коэффициентами значимости критериев.

Вариант, получивший наибольшее значение $B_{i\text{ком}}$, может считаться лучшим из всех остальных.

С помощью этого метода были решены задачи для обоснованного выбора нагревательных печей, сушильных камер, электрических подстанций и др.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Башмаков, И.* Российская система учета повышения энергоэффективности и экономии энергии / И. Башмаков // Информационно-аналитический журнал «ЭНЕРГОАУДИТ и ЭНЕРГОСЕРВИС». – № 1 (25). – 2013. – С. 12-18.

2. *Шилин, А.Н.* Морфологический синтез оптико-электронных систем измерения размеров нагретых деталей / А.Н. Шилин, И.А. Шилина (И.А. Коптелова) // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – № 3. – 2003.

АНАЛИЗ МЕТОДИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРИБОРОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТ ПОВРЕЖДЕНИЯ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Шилин А.А. – канд. техн. наук, доцент ВолгГТУ
Артюшенко Н.С. – студентка филиала МЭИ в г. Волжском

Физические основы методов определения мест повреждений (ОМП)

При анализе методов ОМП и их потенциальных возможностей необходима информация о физических принципах действия, на которых основаны методы. Большинство методов ОМП используют математические модели линий с распределенными параметрами [1-3]. Нормальные и переходные режимы линий электропередачи характеризуются особенностями, которые обусловлены волновым характером распределения электромагнитной энергии и соотношением удельных параметров линии. Средствами, упрощающими представление о процессах, протекающих в энергетической системе, являются, в частности, схемы

замещения линии электропередачи. В зависимости от требуемой точности эти модели представляются в виде различных электрических схем, которые значительно упрощают задачу и вносят погрешность в модель средства контроля. Упрощение схемы может привести к неверным выводам об аварийных режимах. Поэтому для проведения анализа необходимы основные сведения о линиях с распределенными параметрами [4].

К первичным параметрам единицы длины двухпроводной линии относятся: C_0 – поперечная емкость между прямым и обратным проводами; L_0 – индуктивность петли, образованной прямым и обратным проводами; R_0 – продольное активное сопротивление прямого и обратного проводов; G_0 – поперечная активная проводимость утечки изоляции между прямым и обратным проводами. Для расчета этих параметров необходимы исходные данные: номинальное напряжение линии, количество цепей линии, марка и сечение провода, расположение проводов на опоре и расстояние между проводами.

К вторичным параметрам в операторной форме относятся волновое сопротивление

$$Z_C = \sqrt{\frac{R_0 + pL_0}{G_0 + pC_0}} \tag{1}$$

и коэффициент распространения

$$\gamma(p) = \sqrt{(R_0 + pL_0)(G_0 + pC_0)}\,. \tag{2}$$

Наиболее распространенная схема замещения бесконечно малого элемента двухпроводной линии показана на рисунке [4].

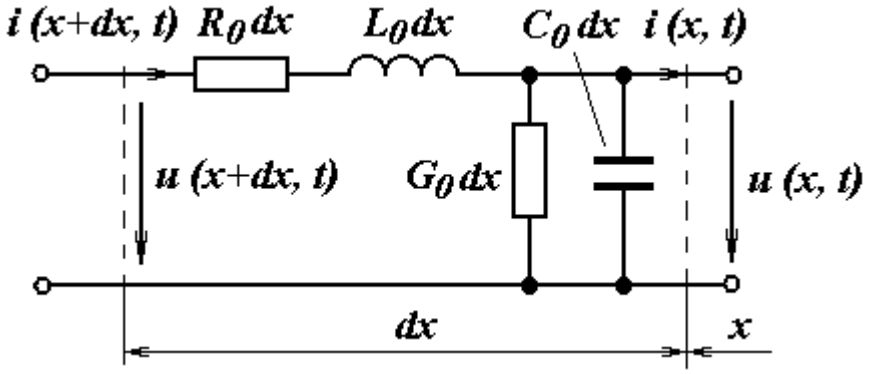


Рисунок. Схема замещения элементарного участка линии

Анализ установившихся и переходных режимов в однородных длинных линиях основан на решении дифференциальных уравнений в частных производных, полученных с помощью законов Кирхгофа для элемента линии длиной *dx* (рисунок):

$$\partial u/\partial x = R_0 i + L_0 \partial i/\partial t\,; \tag{3а}$$

$$\partial i/\partial x = G_0 u + C_0 \partial u/\partial t\,. \tag{3б}$$

Уравнения (3а, 3б) аналитически могут быть решены только для частного случая, а именно для гармонических воздействий. При более сложных, в том числе и ступенчатых воздействиях используются численные методы расчета и разработанные на их основе программы.

При синусоидальном напряжении источника питания однородной линии и постоянных параметрах уравнения (3а, 3б) записываются в комплексной форме:

$$d\dot{U}/dx = (R_0 + j\omega L_0)\dot{I} = Z_0\dot{I}\,; \qquad (4а)$$

$$d\dot{I}/dx = (G_0 + j\omega C_0)\dot{U} = Y_0\dot{U}\,, \qquad (4б)$$

где $Z_0 = R_0 + jX_0$, Ом/м; $Y_0 = G_0 + jB_0$, См/м – комплексные продольные и поперечные параметры линии на единицу длины.

Общее решение уравнений (4а, 4б) представляет собой сумму прямых и обратных бегущих волн с напряжением и током:

$$\dot{U} = \dot{A}_1 e^{\gamma x} + \dot{A}_2 e^{-\gamma x}; \qquad (5а)$$

$$\dot{I} = \frac{\dot{A}_2}{Z_В} e^{-\gamma x} - \frac{\dot{A}_1}{Z_В} e^{\gamma x}, \qquad (5б)$$

где $\dot{A}_1$ и $\dot{A}_2$ – постоянные интегрирования; $Z_В$ – волновое сопротивление. Постоянные интегрирования определяются с использованием граничных значений тока и напряжения.

Для гармонических сигналов выражение для коэффициента распространения (2) имеет следующий вид:

$$\gamma = \alpha + j\beta\,, \qquad (6)$$

где α – коэффициент затухания, характеризующий затухание падающей волны на единицу длины линии (на 1 км); β – коэффициент фазы, характеризующий изменение фазы падающей волны на единицу длины линии (на 1 км или м).

Отношение напряжения отраженной волны в конце линии к напряжению падающей волны в конце линии есть коэффициент отражения по напряжению

$$K_U = \frac{\dot{A}_1 e^{\gamma l}}{\dot{A}_2 e^{-\gamma l}} = \frac{Z_Н - Z_В}{Z_Н + Z_В}, \qquad (7)$$

где $Z_Н$ – сопротивление нагрузки; l – длина линии.

При согласованной нагрузке $K_U = 0$; при холостом ходе $K_U = 1$. Коэффициент отражения по току $K_i = K_U$.

Фазовая скорость волны

$$V = \omega / \beta\,. \qquad (8)$$

В практике инженерных расчетов каждая фаза линии электропередачи представляется в виде четырехполюсника, который в свою очередь заменяется простой схемой электрической цепи с сосредоточенными параметрами.

Следует отметить, что представление линии упрощенными схемами замещения позволяет учитывать искажение формы входного воздействия, но при этом не учитывается задержка сигнала во времени.

В настоящее время в энергетике широко используются приборы, принцип действия которых основан на локации контролируемого участка сети [1-3; 5].

Анализ методических погрешностей

Параметры линии не являются постоянными величинами, зависят от многих факторов и могут изменяться, особенно от погодных условий, поэтому являются источниками методической погрешности.

Проведем анализ методической погрешности для линии с заданными параметрами и их отклонениями (5 % от значений параметров):

R_0 = 7,5 Ом; ΔR_0 = 0,375 Ом;
L_0 = 91,8 Гн; ΔL_0 = 4,59 Гн;
$C_0 = 1{,}086 \cdot 10^{-3}$ Ф; $\Delta C_0 = 5{,}43 \cdot 10^{-5}$ Ф;
$G_0 = 6{,}9 \cdot 10^{-6}$ См; $\Delta G_0 = 6{,}9 \cdot 10^{-7}$ См.

Произведем расчет методической составляющей погрешности для частоты ω = 100 МГц. На этой частоте работает большинство современных цифровых приборов для ОМП.

Для расчета погрешностей используем формулу коэффициента фазы:

$$\beta = \sqrt{\frac{1}{2}\left[\omega^2 C_0 L_0 - G_0 R_0 + \sqrt{\left(R_0^2 + \omega^2 L_0^2\right)\left(G_0^2 + \omega^2 C_0^2\right)}\right]} = 3{,}157 \cdot 10^7. \quad (9)$$

По этой формуле может быть определена зависимость отклонения функции от отклонения параметров (доверительные интервалы) при отсутствии корреляционной связи между параметрами и одинаковых законах распределения отклонений параметров:

$$\Delta\beta(\omega) = \sqrt{\left(\frac{\partial}{\partial R_0}\beta(\omega)\cdot\Delta R_0\right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial C_0}\beta(\omega)\cdot\Delta C_0\right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial L_0}\beta(\omega)\cdot\Delta L_0\right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial G_0}\beta(\omega)\cdot\Delta G_0\right)^2}. \quad (10)$$

Фазовую скорость вычислим с помощью формулы (8):

$$V = \frac{\omega}{\sqrt{\frac{1}{2}\left[\omega^2 C_0 L_0 - G_0 R_0 + \sqrt{\left(R_0^2 + \omega^2 L_0^2\right)\left(G_0^2 + \omega^2 C_0^2\right)}\right]}} = 3{,}167. \quad (11)$$

С помощью частных производных определим отклонения скорости, вызванные отклонениями каждого параметра в отдельности:

$$\Delta V_R = \frac{\omega\left[\frac{G_0}{2} - \frac{R_0\left(C_0^2\omega^2 + G_0^2\right)}{2\sqrt{\left(C_0^2\omega^2 + G_0^2\right)\left(L_0^2\omega^2 + R_0^2\right)}}\right]}{2\cdot\left[\frac{\sqrt{\left(C_0^2\omega^2 + G_0^2\right)\left(L_0^2\omega^2 + R_0^2\right)}}{2} - \frac{G_0 R_0}{2} + \frac{C_0 L_0 \omega^2}{2}\right]^{\frac{3}{2}}}\cdot\Delta R_0. \quad (12)$$

$\Delta V_R \approx 0$.

$$\Delta V_L = \frac{\omega\left[\frac{C_0\omega^2}{2} + \frac{L_0\omega^2\left(C_0^2\omega^2 + G_0^2\right)}{2\sqrt{\left(C_0^2\omega^2 + G_0^2\right)\left(L_0^2\omega^2 + R_0^2\right)}}\right]}{2\cdot\left[\frac{\sqrt{\left(C_0^2\omega^2 + G_0^2\right)\left(L_0^2\omega^2 + R_0^2\right)}}{2} - \frac{G_0R_0}{2} + \frac{C_0L_0\omega^2}{2}\right]^{\frac{3}{2}}}\cdot\Delta L_0 = -0{,}079. \quad (13)$$

$$\Delta V_C = \frac{\omega\left[\frac{C_0\omega^2}{2} - \frac{C_0\omega^2\left(L_0^2\omega^2 + R_0^2\right)}{2\sqrt{\left(C_0^2\omega^2 + G_0^2\right)\left(L_0^2\omega^2 + R_0^2\right)}}\right]}{2\cdot\left[\frac{\sqrt{\left(C_0^2\omega^2 + G_0^2\right)\left(L_0^2\omega^2 + R_0^2\right)}}{2} - \frac{G_0R_0}{2} + \frac{C_0L_0\omega^2}{2}\right]}\cdot\Delta C_0 = -0{,}079. \quad (14)$$

$$\Delta V_G = \frac{\omega\left[\frac{R_0}{2} - \frac{G_0\left(L_0^2\omega^2 + R_0^2\right)}{2\sqrt{\left(C_0^2\omega^2 + G_0^2\right)\left(L_0^2\omega^2 + R_0^2\right)}}\right]}{2\cdot\left[\frac{\sqrt{\left(C_0^2\omega^2 + G_0^2\right)\left(L_0^2\omega^2 + R_0^2\right)}}{2} - \frac{G_0R_0}{2} + \frac{C_0L_0\omega^2}{2}\right]^{\frac{3}{2}}}\cdot\Delta G_0. \quad (15)$$

$\Delta V_G \approx 0$.

На основе полученных результатов (12) – (15) вычислим суммарную абсолютную методическую погрешность

$$\Delta V = \sqrt{(\Delta V_R)^2 + (\Delta V_C)^2 + (\Delta V_L)^2 + (\Delta V_G)^2} = 0{,}112. \quad (16)$$

Затем определим относительную методическую погрешность

$$\delta V = \frac{\Delta V}{V}\cdot 100 = 3{,}536\ \%. \quad (17)$$

Выводы

Из анализа полученных результатов следует, что методическая погрешность меньше погрешности отдельного параметра (5 %), что обусловлено использованием радикала в выражении (11). Активные параметры практически не оказывают влияние на методическую погрешность (12) – (15), и поэтому в практических расчетах целесообразно использовать упрощенную формулу для расчета:

$$\beta = \omega\sqrt{L_0C_0}.$$

Для повышения точности измерения расстояния до места аварии необходимо производить подстройку параметров, исходя из внешних факторов, например таких, как погодные условия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аржанников, Е.А.* Методы и приборы определения места короткого замыкания на линиях: учеб. пособие / Е.А. Аржанников, А.М. Чухин. – Иваново: Ивановский гос. энергетич. ун-т, 1998. – 74 с.

2. *Арцишевский, Я.Л.* Определение мест повреждения линий электропередачи в сетях с изолированной нейтралью: учеб. пособие / Я.Л. Арцишевский. – М.: Высш. школа, 1989. – 87 с.

3. *Арцишевский, Я.Л.* Определение мест повреждения линий электропередачи в сетях с заземленной нейтралью: учеб. пособие / Я.Л. Арцишевский. – М.: Высш. школа, 1988. – 94 с.

4. *Бессонов, А.А.* Теоретические основы электротехники: Электрические цепи / А.А. Бессонов. – М.: Высшая школа, 1978. – 528 с.

5. *Кузнецов, А.П.* Определение мест повреждения на воздушных линиях электропередачи / А.П. Кузнецов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 94 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОВИЗИОННОГО КОНТРОЛЯ В ЭНЕРГЕТИКЕ

Шилин А.Н. – д-р техн. наук, профессор ВолгГТУ
Мадаров А.Б. – аспирант ВолгГТУ

Основным инструментальным средством энергоаудита является тепловизор, который регистрирует распределение температуры по поверхности нагретых тел. Одной из основных характеристик средств измерения, в том числе и тепловизора, является погрешность измерения. Однако погрешность тепловизора, приведенная в паспорте, является инструментальной составляющей, и поэтому она не может полностью характеризовать результат контроля. Эта составляющая погрешности гарантирует погрешность измерения потока излучения нагретого объекта, но не температуры. Температура объекта зависит не только от потока излучения, но и от других факторов, которые являются источником второй составляющей погрешности – методической. Необходимо отметить, что методическая составляющая по значению может превышать инструментальную составляющую. Поэтому для повышения достоверности полученных результатов необходимо учитывать влияние этой составляющей на результат контроля. Для анализа этой составляющей предварительно приведем известные соотношения, поясняющие процесс формирования методической погрешности. Принцип действия основан на измерении потока излучения нагретого тела.

Теоретические основы пирометрии

Тепловые излучения всех реальных тел подчиняются закону излучения Кирхгофа, согласно которому отношение спектральной плотности излучаемости тела при определенных значениях длины волны и температуры к спектральному коэффициенту поглощения тела (при тех же значениях λ и T) есть величина

постоянная и равная спектральной плотности излучаемости абсолютно черного тела $r_0(\lambda, T)$ [1]:

$$\frac{r'(\lambda,T)}{a'(\lambda,T)} = \frac{r''(\lambda,T)}{a''(\lambda,T)} = \frac{r_0(\lambda,T)}{a_0(\lambda,T)} = r_0(\lambda,T), \quad (1)$$

где $r'(\lambda,T)$, $r''(\lambda,T)$ – спектральные плотности излучаемости произвольных температурных излучателей; $a'(\lambda,T)$, $a''(\lambda,T)$ – спектральные коэффициенты поглощения произвольных температурных излучателей.

Электромагнитный спектр излучений абсолютно черного тела определяется по формуле Планка [1]:

$$\frac{dR(\lambda,T)}{d\lambda} = \frac{2\pi hc^2\lambda^{-5}}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}, \quad (2)$$

где $\frac{dR(\lambda,T)}{d\lambda}$ – спектральная поверхностная плотность потока излучения, то есть мощность излучения, испускаемого единицей поверхности черного тела в единичном интервале длин волн, Вт/м^3; h = 6,6256·10^{-34} Дж·с или Вт·с^2– постоянная Планка; k = 1,38054·10^{-23} Дж/К – постоянная Больцмана; c = 2,998·10^8 м/с – скорость света; T – абсолютная температура черного тела, К.

Спектральная плотность потока излучения черного тела зависит от длины волны и температуры. Функция спектрального распределения величины $\frac{dR(\lambda,T)}{d\lambda}$ при заданном значении температуры T имеет максимум. Смещение максимума в функции температуры описывается законом смещения Вина [1]:

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}, \quad (3)$$

где b = 2,9·10^{-3}м·K –постоянная Вина; T – абсолютная температура черного тела, К.

Закон Стефана – Больцмана, получаемый интегрированием закона Планка по длине волны от нуля до бесконечности, определяет интегральную плотность потока излучения черного тела при температуре T [1]:

$$R = \sigma T^4, \quad (4)$$

где R – плотность излучения, Вт/м^2; T – температура абсолютно черного тела, K; σ = (5,6697 ± 0,0029)·10^{-12} Вт/(м^2·К^4). В инженерных расчетах принимают σ = 5,67·10^{-8} Вт/(м^2·К^4) = 5,67·10^{-12} Вт/(см^2·К^4).

Для реальных тел закон Стефана – Больцмана не применим, так как распределение плотности излучения по спектру у реальных тел и у абсолютно черного тела различны. Однако у большинства твердых тел с шероховатыми поверхностями, особенно у диэлектриков, полупроводников и окислов металлов, распределение энергии по спектру имеет такой же характер, как и у абсолютно черного

тела. Такие тела называют серыми. У этих тел отношение их энергетических яркостей к энергетической яркости абсолютно черного тела при той же температуре, называемое коэффициентом излучения, не зависит от длины волны.

Введение понятия «серого тела» расширяет возможности практического использования закона Стефана – Больцмана, который для серого излучателя имеет следующий вид:

$$R = \varepsilon_T \, \sigma \, T^4. \tag{5}$$

Коэффициент излучения ε_T является безразмерным и характеризует долю суммарного по спектру излучения данного материала от излучения абсолютно черного тела при той же температуре. Он зависит от материала, температуры, состояния излучающей поверхности и степени ее окисления.

Спектральный коэффициент излучения $\varepsilon(\lambda)$ некоторой поверхности определяется как отношение спектральной плотности потока излучения $dR(\lambda,T)/d\lambda$ этой поверхности к спектральной плотности потока излучения черного тела $dR_{\text{ч.т}}(\lambda,T)/d\lambda$ при той же температуре [2]:

$$\varepsilon(\lambda) = \frac{dR(\lambda,T)/d\lambda}{dR_{\text{ч.т}}(\lambda,T)/d\lambda}. \tag{6}$$

Величина $\varepsilon(\lambda)$ зависит от длины волны, температуры объекта, а также от угла наблюдения поверхности. Если угол между направлением излучения и нормалью к поверхности равен нулю, то излучательная способность называется нормальной. В общем случае спектральные коэффициенты излучения твёрдых тел относительно медленнее изменяются в функции от длины волны в отличие от коэффициентов излучения газообразных и жидких веществ, которые характеризуются резкими изменениями по спектру. Для материалов используются три вида оценки коэффициента излучения: спектральный $\varepsilon(\lambda)$, полный ε_T и интегральный ε в полосе длин волн $\lambda_1 \ldots \lambda_2$.

Интегральный коэффициент излучения обычно определяется для широко распространённых спектральных диапазонов работы терморадиометрической аппаратуры 3-5 и 8-12 мкм и равен [2]:

$$\varepsilon = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon(\lambda) R(\lambda,T)/d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda,T)/d\lambda}. \tag{7}$$

Чистые металлы без окисных пленок обычно имеют малый коэффициент излучения в инфракрасной области, который обычно увеличивается с ростом температуры металла. Известны выражения для аппроксимирования функций спектрального и полного коэффициентов излучения в функции температуры для различных металлов с полированной поверхностью в направлении нормали к поверхности металла [2]:

$$\varepsilon(\lambda) = 0{,}365\sqrt{\frac{\beta}{\lambda}} - 0{,}0667\frac{\beta}{\lambda} + 0{,}006\sqrt{\frac{\beta^3}{\lambda^3}}; \quad (8)$$

$$\varepsilon_T = 0{,}5737\sqrt{\beta T} - 0{,}1769\beta T; \quad (9)$$

$$\beta = \rho[1 + \alpha(T - 293)] \cdot 10^4, \quad (10)$$

где ρ – удельные сопротивления металлов при 20 °С, Ом·см; α – коэффициент теплового изменения удельного сопротивления.

Эти выражения справедливы только при определенных ограничениях. Например, для вольфрама необходимо выполнение условия $\lambda > 2$ мкм, для золота и серебра $\lambda > 1{,}5$ мкм, а для никеля и железа $\lambda < 5$ мкм. Состояние поверхности и окисление металла могут значительно изменить коэффициент излучения.

В табл. 1 приведены величины удельных сопротивлений металлов ρ, Ом·см, при 20 °С, коэффициента теплового изменения удельного сопротивления α.

Таблица 1

Величины удельных сопротивлений металлов и коэффициента теплового изменения удельного сопротивления

Металл	Удельное сопротивление металлов ρ, Ом·см, при 20 °С	Коэффициент теплового изменения удельного сопротивления α
Алюминий	$2{,}32 \cdot 10^{-6}$	$3{,}6 \cdot 10^{-3}$
Медь	$1{,}72 \cdot 10^{-6}$	$4{,}0 \cdot 10^{-3}$
Железо	$9{,}80 \cdot 10^{-6}$	$5{,}0 \cdot 10^{-3}$
Серебро	$1{,}62 \cdot 10^{-6}$	$3{,}6 \cdot 10^{-3}$

На рис. 1 представлена зависимость спектральных коэффициентов излучения различных материалов от длины волны [1].

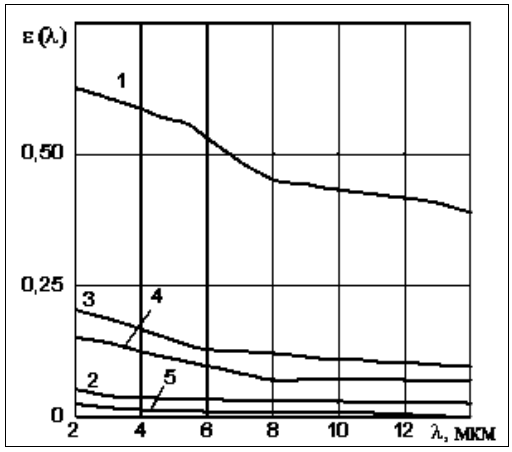


Рис. 1. Кривые зависимости спектрального коэффициента излучения металлов и графита от длины волны:
1 – графит; 2 – медь; 3 – железо; 4 – алюминий; 5 – серебро

Интегральные коэффициенты излучения некоторых материалов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Интегральные коэффициенты излучения некоторых материалов

Материал	Температура, К	Коэффициент излучения ε_T
Серебро	273	0,020
Алюминий полированный	273	0,050
Медь электролитическая полированная	353	0,018
Железо полированное	311	0,210
Вольфрам	2 300	0,280
Бетон	293	0,920
Стекло	293	0,340
Кирпичная кладка оштукатуренная	293	0,940
Дерево	293	0,890

Коэффициент излучения поверхности может изменяться в зависимости от некоторых параметров. К этим параметрам относятся: материал, структура поверхности, геометрия, угол визирования, длина волны, температура.

Одна и та же поверхность, как правило, обладает различной излучательной способностью на длинных и коротких волнах. Поэтому термограммы объекта, полученные с помощью тепловизоров с различными спектральными диапазонами, могут значительно отличаться.

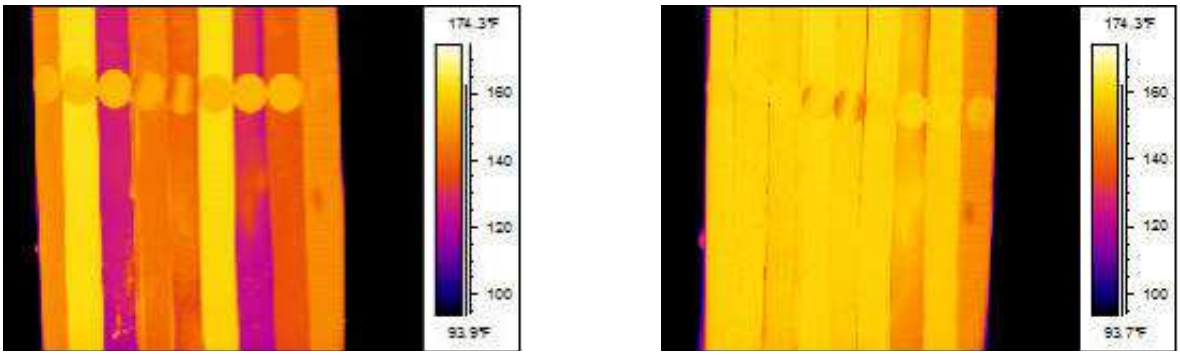
Таким образом, из приведенных выше физических основ пирометрии следует, что коэффициент излучательной способности материала может существенно влиять на точность измерения температуры. Рассмотрим несколько примеров, подтверждающих эти положения [5].

В качестве источника излучения используем алюминиевую канистру, поверхность которой выкрашена в различные цвета (рис. 2).

Рис. 2. Поверхность источника излучения с различными цветами

Рассмотрим влияние цвета поверхности и спектрального диапазона тепловизора. На рис. 3 и 4 представлены термограммы полой алюминиевой канистры (ε_T = 0,06), полученные с помощью двух различных тепловизоров.

Термограмма на рис. 3, а получена тепловизором, работающем в диапазоне 3-5 мкм, а термограмма на рис. 3, б – тепловизором, работающем в диапазоне 7-14 мкм [5].



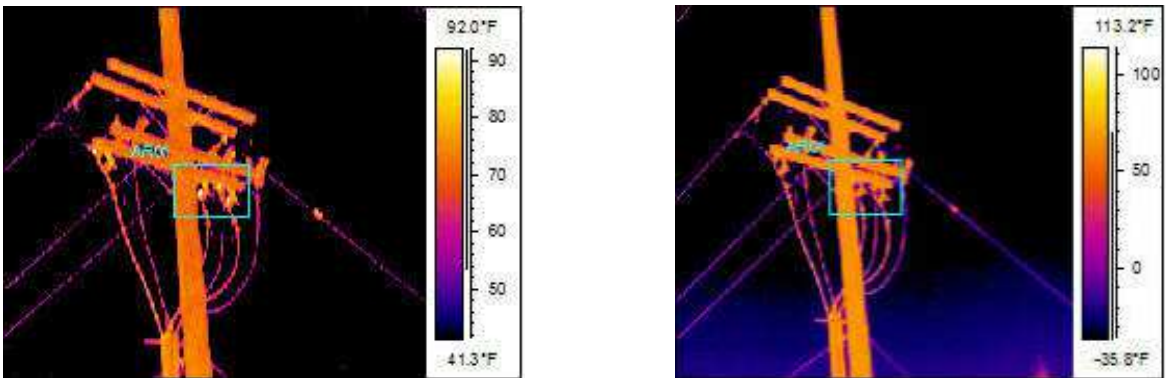
а б

Рис. 3. Термограммы объекта, полученные с помощью двух тепловизоров, имеющих различные спектральные диапазоны: а) 3-5 мкм; б) 7-14 мкм

Разница в регистрируемых температурах связана с различным коэффициентом излучения каждой полоски и спектральным диапазоном тепловизора.

Результаты тепловизионной съемки могут меняться в зависимости от рабочих спектральных диапазонов тепловизоров.

На рис. 4 представлены термограммы, снятые тепловизионными камерами, работающими в различных спектральных диапазонах [5]. Истинная температура контактов в обоих случаях одинакова. Однако кажущаяся температура контактов слева выше, чем на термограмме справа. Эта разница обусловлена различными спектральными диапазонами тепловизоров.



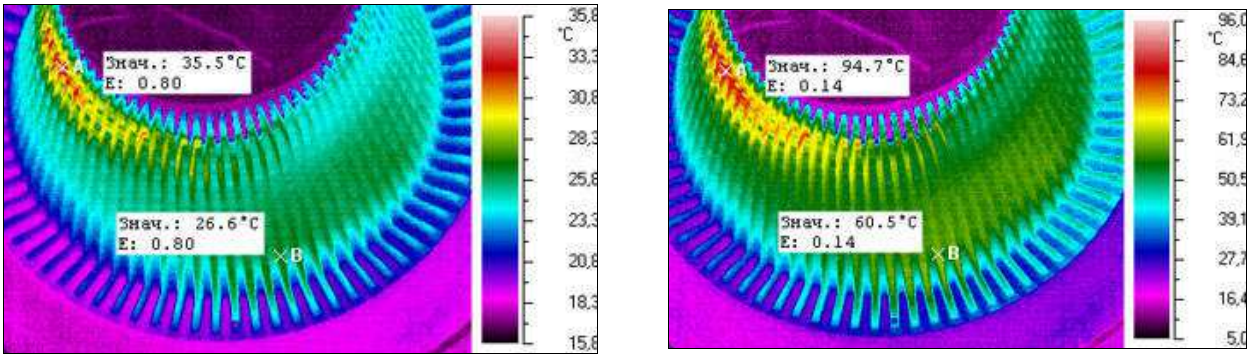
а б

Рис. 4. Термограммы опоры воздушной линии, полученные с помощью двух тепловизоров, имеющих различные спектральные диапазоны: а) 3-5 мкм; б) 7-14 мкм

Влияние состояния поверхности на коэффициент излучения и соответственно на результат контроля проиллюстрировано примером на рис. 5 [5].

Разница в значениях регистрируемых температур в этом случае очень значительна. И если на первой термограмме такой нагрев (35,5 °С) активной

части статора находится в пределах нормы, то во втором случае имеется явный перегрев (94,7 °С).



а б

Рис. 5. Термограммы активной части статора двигателя с различными коэффициентами излучения: а) ε_T = 0,8 (окисленный металл); б) ε_T = 0,14 (полированный листовой металл)

Коэффициент излучения материалов зависит также и от угла наблюдения (рис. 6). При длине волны излучения 10 мкм (рис. 7) вода близка к абсолютно черному телу при наблюдении по нормали к ее поверхности и становится зеркалом при наблюдении по касательной. Вследствие зависимости коэффициента излучения поверхности от угла наблюдения эффективный коэффициент излучения неплоских поверхностей различен в различных точках, хотя мы имеем дело с одним и тем же материалом, коэффициент излучения которого по нормали – постоянная величина.

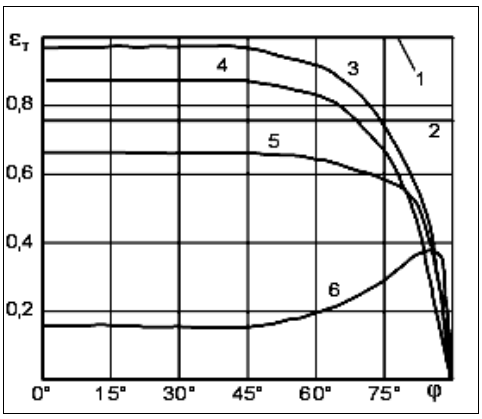


Рис. 6. Интегральный коэффициент излучения ε в функции угла наблюдения: 1 – черное тело; 2 – серое тело; 3, 4, 5 – диэлектрики с показателями преломления n = 1,5; 2 и 4 соответственно; 6 – металл [1]

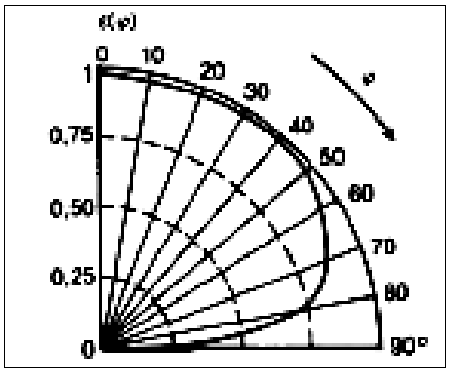


Рис. 7. Коэффициент излучения воды при λ = 10 мкм в функции угла наблюдения φ [1]

Когда две поверхности образуют двугранный угол (рис. 8), существует связь между величинами их излучения вследствие многократных отражений. Каждая поверхность, обладающая вполне определенным собственным коэффициентом излучения, будет иметь эффективный коэффициент излучения, изменяющийся в зависимости от наклона поверхности, а также от отражения от

соседней поверхности. Так, двугранный угол, образованный двумя идентичными поверхностями с одинаковыми температурами, создает контраст в тепловом изображении. Этот контраст – следствие различной ориентации и, следовательно, различных эффективных коэффициентов излучения.

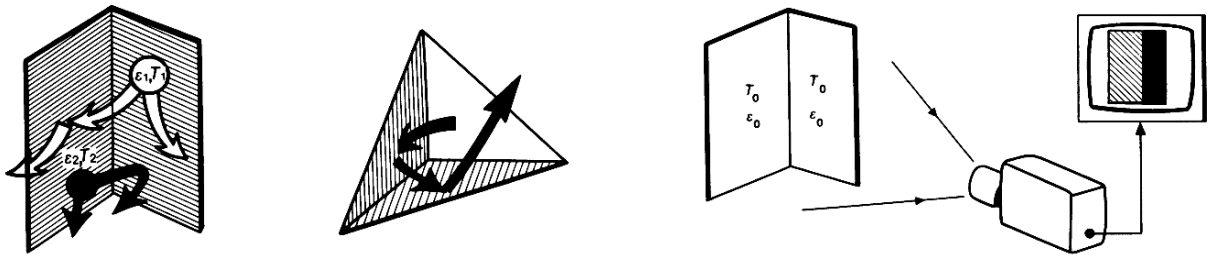


Рис. 8. Излучения на поверхностях двугранных углов и трехгранников [2]

Комбинация трех плоскостей, образующих трехгранник дает аналогичный результат, но с более слабыми контрастами, так как многократные отражения между плоскостями способствуют возникновению эффекта «световой ловушки», то есть поглощающая или, наоборот, излучающая комбинация плоскостей такого типа приближается к черному телу. Таким образом, для трехгранника эффективный коэффициент излучения часто оказывается более важным, чем собственные коэффициенты излучения его граней. Испускаемое излучение приближается к излучению черного тела.

Угол визирования при съемке не должен превышать 60°. Это связано с тем, что максимум излучения с поверхности производится в направлении, перпендикулярном поверхности, поэтому при увеличении угла визирования (наблюдения) резко уменьшается поток излучения с поверхности объекта контроля, что влияет на результат контроля. Когда производится тепловизионная съемка зданий небольшой этажности, угол визирования, как правило, незначителен и соответствует требуемому. Если же съемке подвергаются высотные объекты, угол визирования при съемке неизбежно возрастает и часто превышает допустимый. Особенно актуальным это становится при съемке объектов с неплоскими поверхностями.

На рис. 9, 10 представлены изображение и термограмма кирпичной дымовой трубы. Видно, что труба выглядит теплее в центральной части и холоднее – к краям: участок трубы с точкой «sp1» имеет температуру –4,9 °С, а участок с точкой «sp2» – температуру –7,8 °С. Истинная температура поверхности трубы в обеих точках примерно одинакова. Разница в кажущихся температурах возникла из-за изменения угла визирования. Поэтому при съемке подобных неплоских объектов необходимо это учитывать, чтобы корректно интерпретировать термограммы.

Коэффициент излучения повышается при увеличении шероховатости поверхности. Если высота бугорков шероховатости превышает в несколько раз

длину волны излучения, то коэффициент излучения шероховатой поверхности $\varepsilon_ш$ подсчитывают по эмпирической формуле [2]:

$$\varepsilon_ш = \varepsilon[1 + 2{,}8 \cdot (1 - \varepsilon)^2], \qquad (11)$$

где ε – коэффициент излучения гладкой поверхности.

Рис. 9. Изображение кирпичной дымовой трубы [5]

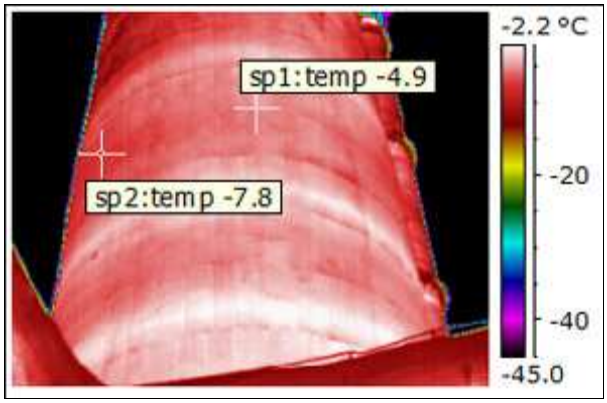


Рис. 10. Термограмма кирпичной дымовой трубы [5]

Часто для многих материалов невозможно аналитически вычислить значение коэффициента излучения или количественно описать зависимость коэффициента излучения от характера обработки поверхности, а также от ее температуры и степени окисления. В случае необходимости проведения расчетов, значения ε_T берутся на основании справочных данных или результатов экспериментальных исследований.

В настоящее время для измерения интегрального коэффициента излучения поверхности различных материалов в широком диапазоне температур используется целый ряд методов и соответствующих конструкций экспериментальных установок.

Коэффициент излучения объекта может быть определен следующими способами [2]:

– сравнением результатов измерения температуры объекта прямым контактным методом (термопарой) и косвенным бесконтактным методом (тепловизором) и вычислением коэффициента излучения материала;

– при контроле относительно низких температур (до +260 °С), часть поверхности объекта покрывается поливинилхлоридной изоляционной лентой с установленным коэффициентом 0,95. Затем измеряется температура двух участков поверхности с наклейкой и без нее, сравниваются результаты, и вычисляется коэффициент излучения материала;

– если возможно, на поверхность объекта наносится черная краска с коэффициентом излучения краски не менее 0,98. Затем измеряется температура двух участков поверхности с покраской и без нее, сравниваются результаты, и вычисляется коэффициент излучения материала.

Достаточно полный обзор по данной проблеме представлен в монографиях [3, 4]. Анализ литературных данных показал, что среди имеющихся методов исследования интегрального коэффициента излучения можно выделить основные методы, получившие наибольшее распространение в практике лабораторных исследований: радиационный, калориметрический и нестационарный методы.

В табл. 3 приведены значения коэффициентов излучения материалов, которые могут быть использованы в энергетических объектах. Значения коэффициентов излучения в таблице являются приблизительными, и поэтому их использование может являться причиной погрешностей [1].

Таблица 3

Типовые значения коэффициентов излучения некоторых материалов

Материал	**Коэффициент излучения**			
	1μм	**2,2μм**	**5,1μм**	**8…14μм**
Железо неокисленное	0,35	0,10…0,30	0,05…0,25	0,05…0,20
Бетон	0,65	0,90	0,90	0,95
Пластмасса (непрозрачная, более 20 мм)	–	–	0,95	0,95
Дерево	–	–	0,90...0,95	0,90...0,95
Медь отполированная	0,05	0,03	0,03	0,03
Сталь тонколистовая гладкая	0,35	0,20	0,10	0,10

Выводы

Из проведенного анализа следует, что коэффициент излучения поверхности объекта тепловизионного контроля является очень важной характеристикой, которая оказывает влияние на точность контроля. Поэтому при проведении тепловизионного контроля необходимо учитывать факторы, влияющие на коэффициент излучения, и с наибольшей точностью задавать коэффициент излучения материала объекта. Особенно это важно для объектов, обладающих низким коэффициентом излучения (высокой отражательной способностью). Неверно заданный коэффициент излучения может привести к довольно значительным ошибкам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Криксунов, Л.З.* Справочник по основам инфракрасной техники / Л.З. Криксунов. – М.: Сов. радио, 1978. – 400 с., ил.

2. *Госсорг, Ж.* Инфракрасная термография. Основы, техника, применение: Пер. с франц. / Ж. Госсорг. – М.: Мир, 1988. – 416 с., ил.

3. *Лыков, А.В.* Тепломассообмен: справочник / А.В. Лыков. – М.: Энергия, 1978. – 480 с.

4. *Блох, А.Г.* Теплообмен излучением: справочник / А.Г. Блох, Ю.А. Журавлев, Л.Н. Рыжков. – М.: Энергоатимиздат, 1991. – 432 с.

5. http://www.ndt-pro.ru/

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРОВОДОВ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ В ПОПЕРЕЧНОМ СЕЧЕНИИ

Шилин А.Н. – д-р техн. наук, профессор ВолгГТУ
Нгуен Ф.Т., Ле Ф.С. – аспиранты ВолгГТУ

Актуальность

Энергетическая система России характеризуется высокой степенью морального и физического износа, высокими потерями (до 10-15 %) и пониженным уровнем надежности. Поэтому вопрос о повышении надежности энергетической системы России является весьма актуальным. Необходимо отметить, что во многих странах мира ведутся работы по созданию интеллектуальных электрических сетей. Интеллектуальные сети представляют собой комплекс технических средств, которые в автоматическом режиме выявляют наиболее слабые и аварийно опасные участки сети, а затем изменяют характеристики и схему сети с целью предотвращения аварии и, соответственно, повышения надежности. По мнению многих экспертов в интеллектуальных сетях заложен потенциал, который имел Интернет в начале цифровой революции. Американская консалтинговая фирма *Cisco* прогнозирует, что потенциальный рынок «умных» сетей от 100 до 1 000 раз больше, чем Интернета.

Таким образом, интеллектуальные сети должны в своем составе содержать информационно-измерительные системы, позволяющие регистрировать аварийные режимы системы и осуществлять передачу информации о координатах места и видах аварии. В связи с развитием систем телекоммуникации и обработки информации проблемы регистрации аварийных режимов и передачи информации могут быть решены на принципиально ином уровне. Для решения проблемы регистрации аварийных режимов была разработана информационно-измерительная система (ИИС) [1, 2]. Эта система позволяет по изменению электромагнитного поля, создаваемого проводами воздушных линий электропередачи, определять вид аварии. По сравнению с существующими системами контроля аварийных режимов воздушных линий электропередачи, которые содержат измерительные преобразователи, соединенные непосредственно с проводами, разработанная система [1, 2] более проста в монтаже и эксплуатации. Однако при проектировании такой системы одной из основных задач является обоснованный выбор координат установки измерительных преобразователей, позволяющий наиболее достоверно идентифицировать аварийные режимы. Для решения этой задачи была разработана компьютерная программа определения координат установки измерительных преобразователей (датчиков).

Математические модели

В качестве математических моделей для разработки программы использованы следующие выражения [3].

Однопроводная линия. Линия передачи расположена на высоте h над землей, а устройство регистрации – на высоте k.

На рис. 1 показаны линии электростатического поля, создаваемого проводом высоковольтной линии.

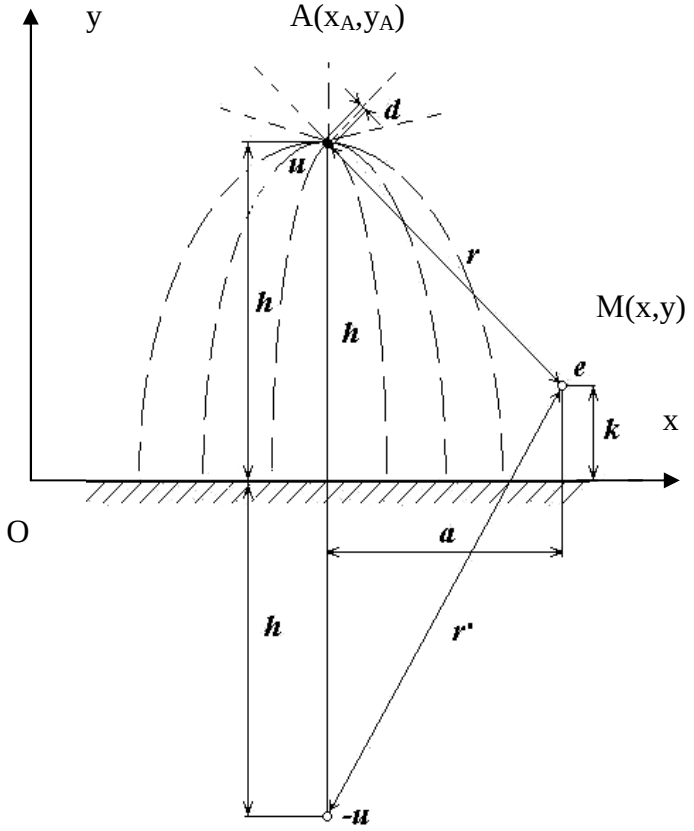


Рис. 1. Электростатическое поле однопроводной линии

Электростатический потенциал поля, создаваемого высоковольтной линией и ее зеркальным изображением, в месте расположения устройства регистрации определяется выражением [3]:

$$e = \frac{\ln(r'/r)}{\ln(4h/d)} u, \tag{1}$$

где r и r' – соответственно, расстояния от координаты регистрации до первичной линии и до ее изображения; d – диаметр провода; u – напряжение провода линии передачи относительно земли.

Уравнение (1) преобразуем относительно координат плоскости оси Oxy:

$$e = \frac{u}{\ln(4y_A/d)} \ln\left(\frac{\sqrt{(x-x_A)^2 + (y+y_A)^2}}{\sqrt{(x-x_A)^2 + (y-y_A)^2}} \right). \tag{2}$$

Напряженность электрического поля определяется выражением

$$E_y = -\frac{de}{dy}; \tag{3}$$

$$E_y = -\frac{de}{dy} = -\frac{u}{\ln(4y_A/d)} \frac{2y_A\left(x^2 - 2xx_A + x_A^2 + y_A^2 - y^2\right)}{\left[(x-x_A)^2 + (y+y_A)^2\right]\left[(x-x_A)^2 + (y-y_A)^2\right]}. \tag{4}$$

Напряженность электрического поля E_y является эффективным значением и поэтому всегда положительна и рассчитывается как абсолютное значение выражения (4). При моделировании уравнения (2) и (4) будут использованы для отдельных фаз *B* и *C*.

Двухпроводные и трехфазные линии. Потенциал двухпроводной линии определяется с помощью выражения для потенциала однопроводной линии. Провода воздушной линии (рис. 2) создают такое же поле, как и однопроводная линия вместе с ее изображением.

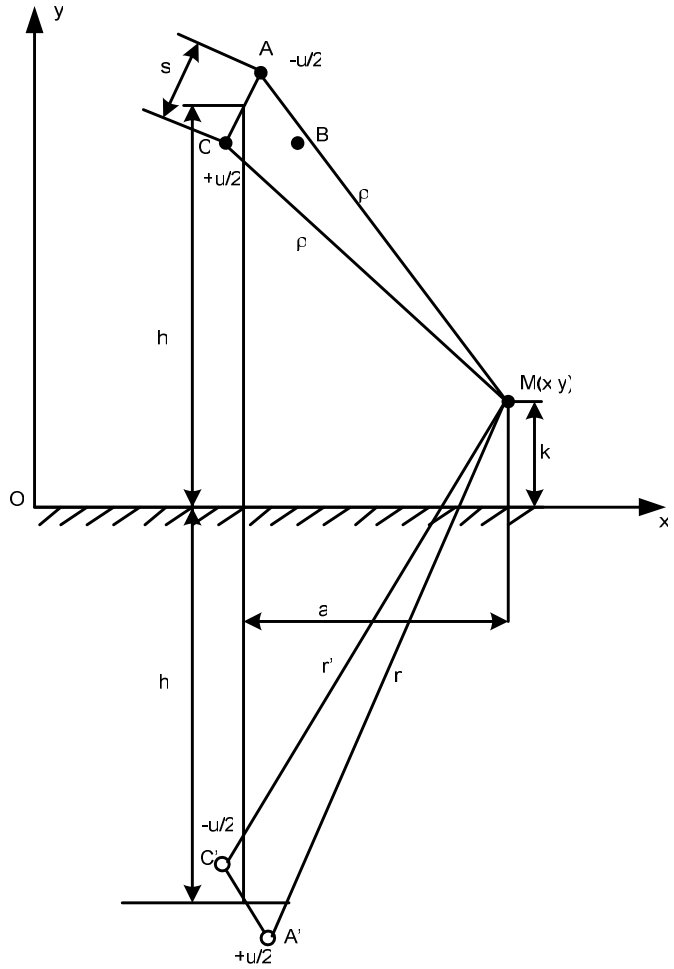


Рис. 2. Геометрическая схема двухпроводной линии

Расстояние между проводами двухпроводной линии равно *s*, напряжение между проводами линии – *u*, а напряжение между проводом однопроводной линии и его изображением равно 2*u*.

$$e = \frac{u/2}{\ln(2s/d)}\left[\ln(\rho'/\rho) + \ln(r'/r)\right]; \qquad (5)$$

$$e = \frac{u/2}{\ln(2s/d)}\left[\ln\frac{\sqrt{(x-x_A)^2+(y-y_A)^2}}{\sqrt{(x-x_C)^2+(y-y_C)^2}} + \ln\frac{\sqrt{(x-x_C)^2+(y+y_C)^2}}{\sqrt{(x-x_A)^2+(y+y_A)^2}}\right]; \qquad (6)$$

$$E_y = -\frac{de}{dy} = -\frac{u/2}{\ln(2s/d)}\frac{2y^2(y_A-y_C)+y_C\left[(x-x_A)^2+(y-y_A)^2\right]-y_A\left[(x-x_C)^2+(y-y_C)^2\right]}{\left[(x-x_A)^2+(y-y_A)^2\right]\left[(x-x_C)^2+(y-y_C)^2\right]}. \qquad (7)$$

При моделировании уравнения (6) и (7) будут использованы для двухпроводных линий *B* и *A*, *C* и *B*.

Разность фазы любых двух проводов трехфазных линий равна 120 градусам, и поэтому напряжение между двумя проводами (например, *A* – *B*) имеет максимальное значение при напряжении на оставшейся фазе (*C*), равной нулю. Это свойство было использовано при разработке программы:

$$E_{yabc} = \max(E_{ybc}, E_{yca}, E_{yba}), \qquad (8)$$

где E_{ybc}, E_{yca}, E_{yba} – напряженность электрического поля по вертикальной оси *y* каждой пары проводов.

Компьютерное моделирование

Компьютерная программа разработана для схемы, когда провода техфазной линии передачи расположены в вершинах равностороннего треугольника (рис. 3) со следующими данными:

A(0; 11,73) м; *B*(1; 10) м; *C*(–1; 10) м; *d* = 8 мм; *u* = 10 кВ; *s* = 2 м.

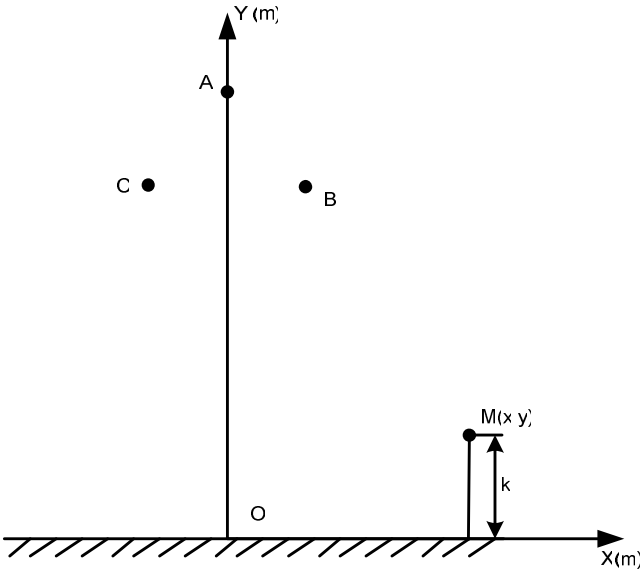


Рис. 3. Схема расположения проводов линии при компьютерном моделировании

Для удобства работы с программой разработан интерфейс (рис. 4).

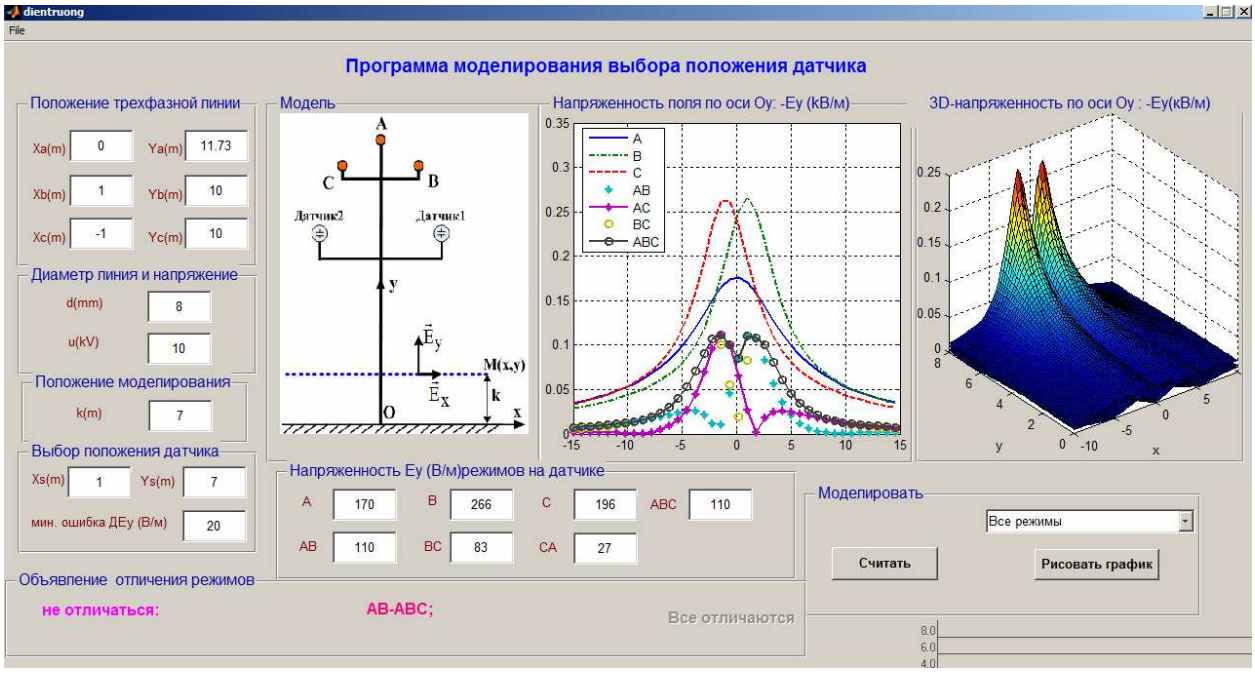


Рис. 4. Интерфейс программы

С помощью разработанной программы проведен анализ электрического поля для различных режимов работы линии и для разных координат установки датчика. В окне и на графиках разными линиями обозначены работающие провода, а остальные провода в режиме – обрыв.

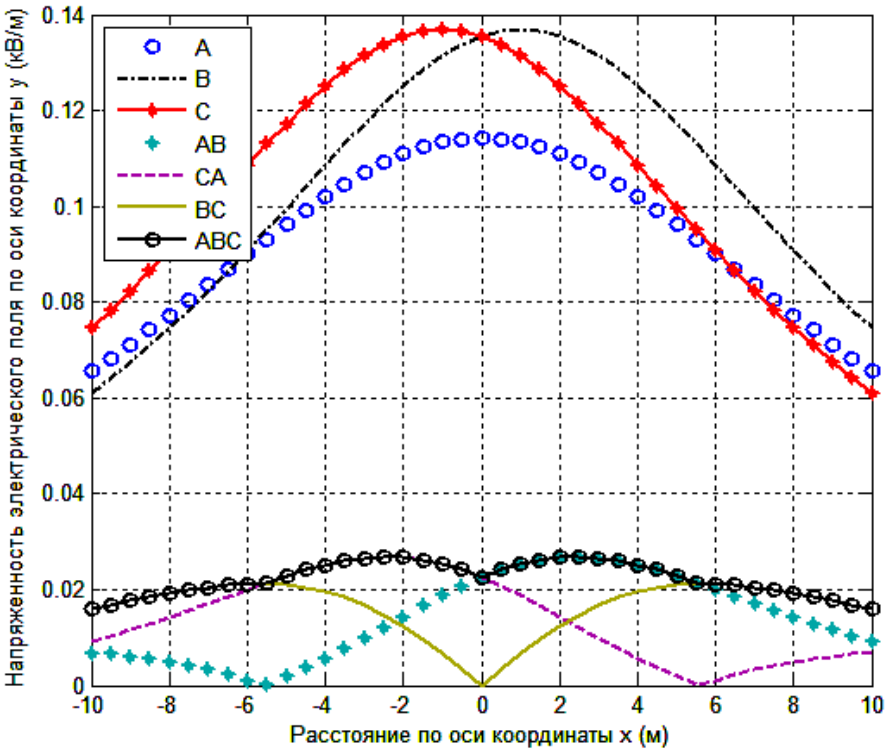


Рис. 5. Напряженность электрического поля в направлении оси *y* (кВ/м) режимов трехфазных линий на высоте *k* = 1 м

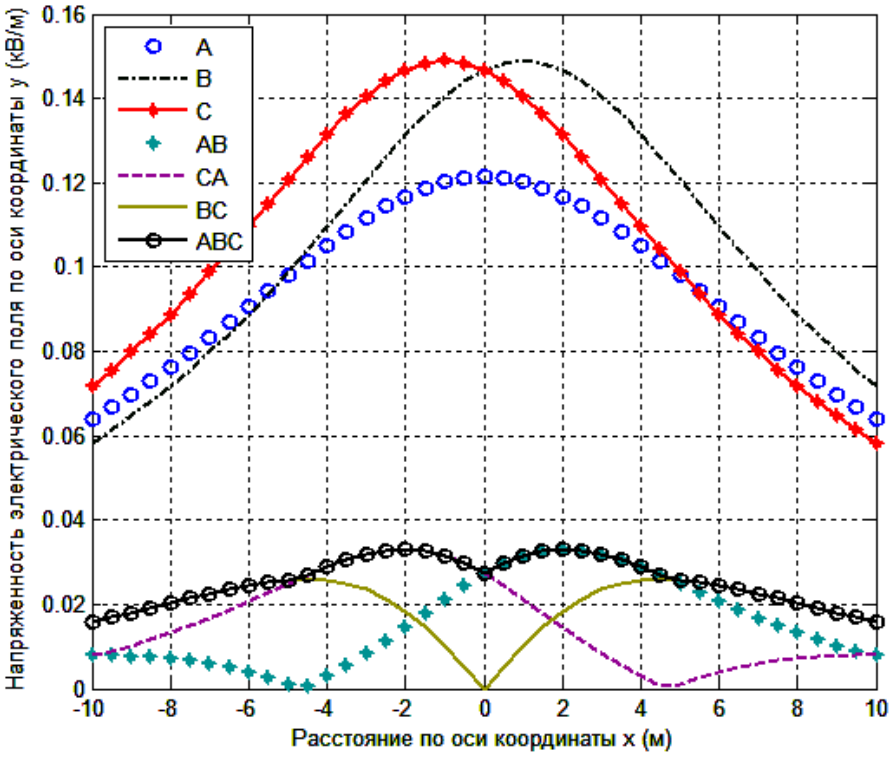


Рис. 6. Напряженность в направлении оси *y* (кВ/м) режимов трехфазных линий на высоте *k* = 3 м

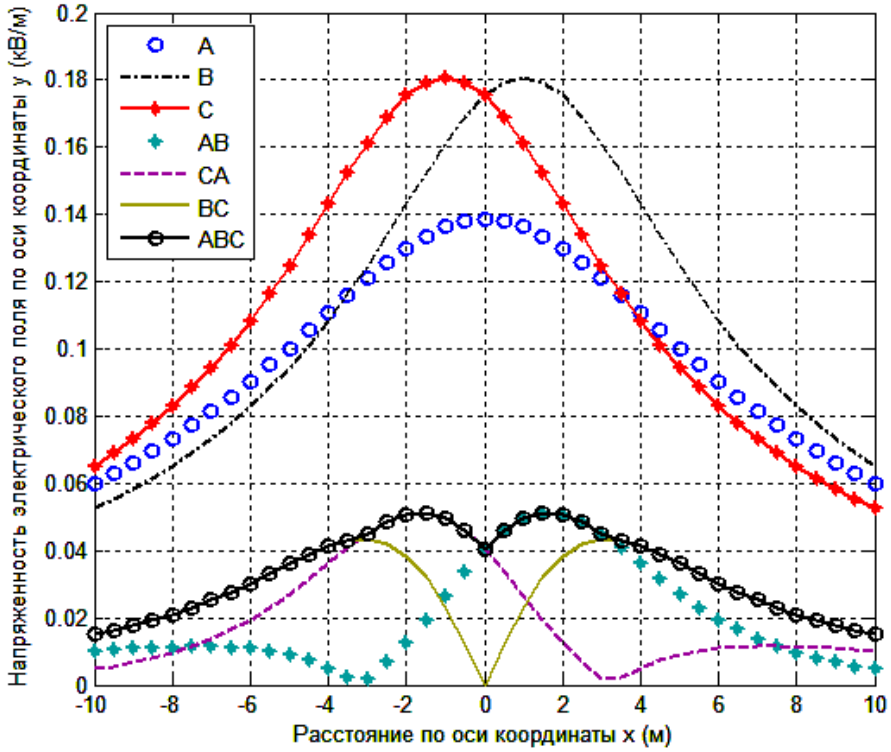


Рис. 7. Напряженность в направлении оси *y* (кВ/м) режимов трехфазных линий на высоте *k* = 5 м

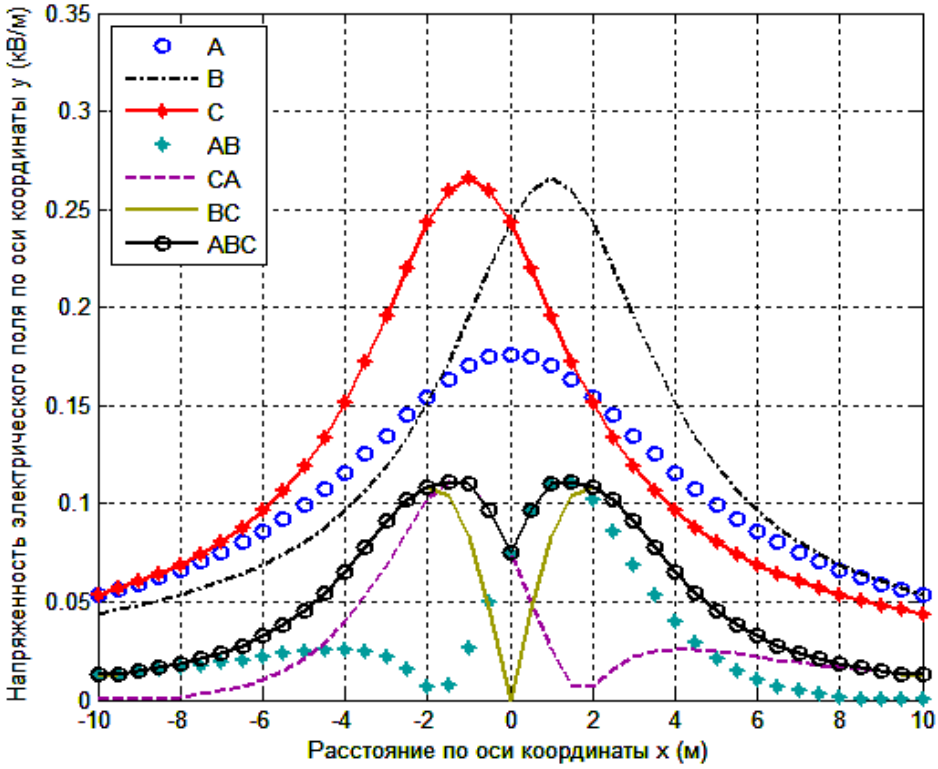


Рис. 8. Напряженность в направлении оси *y* (кВ/м) режимов трехфазных линий на высоте *k* = 7 м

Выводы

Из анализа рис. 5-8 следует, что для идентификации режимов работы линии датчик целесообразно устанавливать в координатах *x* = 1 м, *k* = 7 м (рис. 8). Однако в этом варианте невозможно отличить режим обрыва фазы *C* от нормального режима (работают все три фазы). Поэтому необходимо использовать второй датчик, установленный в координатах *x* = –1 м, *k* = 7 м. Два датчика, установленные в этих координатах, позволяют идентифицировать все аварийные режимы работы воздушной линии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Шилин, А.Н.* Информационно-измерительная система определения повреждений воздушной линии электропередачи / А.Н. Шилин, А.А. Шилин // Приборы. – 2011. – № 5. – С. 23-29.

2. П.м. 100632 Российская Федерация, МПК G 01 R 31/08. Устройство для определения местоположения и вида повреждения на воздушной линии электропередачи / А.А. Шилин, А.Н. Шилин, В.С. Лукьянов; ГОУ ВПО ВолгГТУ. – 2010.

3. *Рюдинберг, Р.* Переходные процессы в электроэнергетических системах / Р. Рюдинберг. – М.: Изд-во иностр. лит., 1955. – 717 с.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ В ТЕПЛОВЫХ СЕТЯХ

Макартичян С.В. – канд. техн. наук, доцент ВолгГТУ
Шилин А.Н. – д-р техн. наук, профессор ВолгГТУ
Орешонков А.А. – аспирант ВолгГТУ

В настоящее время в ЖКХ наиболее актуальна проблема уменьшения энергетических потерь и, соответственно, внедрения энергосберегающих технологий. Поскольку средства на внедрение энергосберегающих технологий ограничены, то очевидно, что в первую очередь мероприятия должны проводиться на тех объектах, где возможен максимальный экономический эффект. Для обоснованного выбора объекта и мероприятий по энергосбережению необходимо предварительно определить потери на объектах. Наибольшие потери возникают в тепловых сетях при транспортировке энергии, поэтому необходимы методы и средства определения этих потерь. Стоит отметить, что оценка потерь также важна при обосновании задачи внедрения автономных систем энергообеспечения. Таким образом, необходимо выбрать или разработать метод, а затем на основе этого метода разработать информационно-измерительную систему для определения фактических эксплуатационных тепловых потерь. На основе проведенного анализа в качестве основы для проектирования системы были выбраны «Методические указания по определению тепловых потерь в водяных тепловых сетях» (РД 34.09.255-97), разработанные РАО «ЕЭС РОССИИ». Эти методики реализуют метод температурной волны, а именно: на время испытаний от тепловой сети отключаются потребители, в сеть подается вода с постоянными параметрами – температурой и расходом. После завершения переходного процесса температура во времени стабилизируется, а в зависимости от расстояния – уменьшается. Уменьшение температуры связано с потерями в тепловой сети. На рисунке показана схема испытаний тепловой сети по определению тепловых потерь методом тепловой волны.

Тепловые потери по подающему и обратному трубопроводам для каждого из участков тепловой сети определяются по формулам (Вт или ккал/ч):

$$Q_{\text{п.и}} = c\left(G_{\text{с}} - \frac{G_{\text{п}}}{4}\right)\left(t_{\text{п}}^{\text{н}} - t_{\text{п}}^{\text{к}}\right)\cdot 10^3;$$

$$Q_{\text{о.и}} = c\left(G_{\text{с}} - \frac{3G_{\text{п}}}{4}\right)\left(t_{\text{о}}^{\text{н}} - t_{\text{о}}^{\text{к}}\right)\cdot 10^3,$$

где $G_{\text{с}}$ – усредненный расход сетевой воды в подающей линии на выходе из теплоподготовительной установки, кг/с (т/ч); $G_{\text{п}}$ – усредненный расход подпиточной воды, кг/с (т/ч); $t_{\text{п}}^{\text{н}}$ и $t_{\text{п}}^{\text{к}}$ – усредненные температуры воды в начале и в конце подающего трубопровода на участке, °С; $t_{\text{о}}^{\text{н}}$ и $t_{\text{о}}^{\text{к}}$ – усредненные температуры воды в начале и в конце обратного трубопровода на участке, °С.

Этот метод измерения является прямым и поэтому позволяет наиболее достоверно определять потери. Частота установки датчиков температуры по длине трубопровода может меняться в зависимости от требований по точности и непостоянства влияющих внешних факторов по длине.

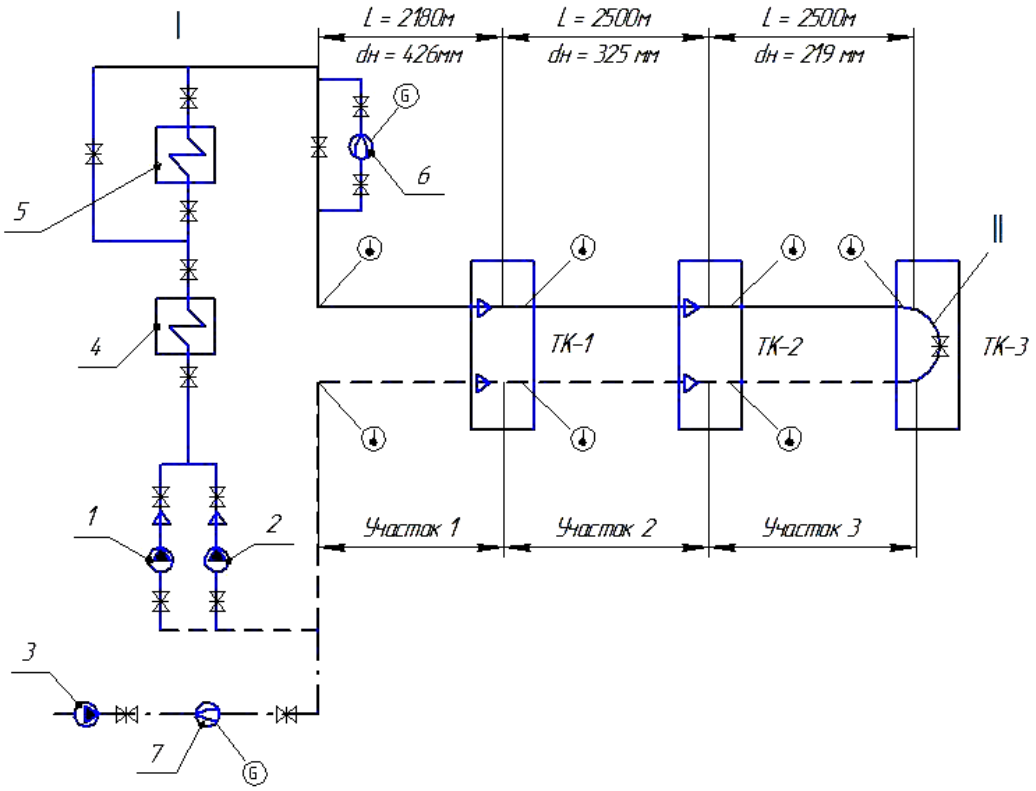


Рисунок. Схема испытываемой тепловой сети:
I – теплоподготовительная установка; II – циркуляционная перемычка; 1 – сетевой насос; 2 – легкий насос малой подачи; 3 – подпиточный насос; 4 – основные подогреватели сетевой воды; 5 – пиковый подогреватель сетевой воды или водогрейный котел; 6 – измерительная диафрагма на подающем трубопроводе; 7 – измерительная диафрагма на подпиточной линии; ТК – тепловая камера; —— – подающий трубопровод; - - - - – обратный трубопровод; –·– – подпиточная линия; ⓓ – точка измерения температуры; Ⓖ – измерительный прибор

Для обоснованного выбора параметров и повышения энергоэффективности линий теплопередачи необходимо разработать математическую модель происходящих в тепловых линиях процессов.

В теоретической электротехнике достаточно широко исследованы физические процессы, возникающие в длинных линиях передачи электроэнергии. Методика моделирования этих процессов основана на представлении линии в виде электрических схем замещения с распределенными параметрами. Если пренебречь индуктивностью петли, образованной прямым и обратным проводами длинной линии, то длинная линия описывается дифференциальным уравнением в частных производных

$$R_0 C_0 \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - R_0 G_0 u \,. \qquad (1)$$

Дифференциальное уравнение теплопроводности (при λ = const) можно записать в виде

$$c\rho\frac{\partial T}{\partial t}=\lambda\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}-q_V. \qquad (2)$$

Величина q_V представляет собой плотность теплового потока, обусловленного несовершенством теплоизоляции трубопровода, и может быть записана на основании закона Ньютона – Рихмана в виде

$$q_V=\alpha(T-T_0), \qquad (3)$$

где α – коэффициент теплоотдачи с поверхности трубопровода; T_0 – температура окружающей среды.

Тогда дифференциальное уравнение теплопроводности (2) с учетом закона Ньютона – Рихмана (3) можно представить в следующем виде:

$$\frac{c\rho}{\lambda}\frac{\partial T'}{\partial t}=\frac{\partial T'}{\partial x^2}-\frac{\alpha}{\lambda}T', \qquad (4)$$

где $T'=T-T_0$.

Сравнивая между собой уравнения (1) и (4) можно отметить, что математическое описание происходящих в электрической линии процессов совпадает с описанием процессов в линиях теплопередачи без учета влияния массопереноса. При учете явления массопереноса дифференциальное уравнение конвективного тепломассопереноса при постоянной скорости течения w может быть записано в виде

$$c\rho\frac{\partial T}{\partial t}=\lambda\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}-c\rho w\frac{\partial T}{\partial x}-q_V. \qquad (5)$$

Следовательно, с математической точки зрения теплотрассу можно представить как объект с распределенными параметрами, который может быть исследован с привлечением математического аппарата теоретической электротехники.

Таким образом, математическая модель линии теплопередачи может быть представлена в виде схем замещения, подобных схемам замещения длинной линии электропередачи. Параметры линии теплопередачи как объекта с распределенными параметрами могут быть определены с использованием приведенной выше методики испытаний тепловой сети.

АЛГОРИТМЫ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОЙ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ ПО КРИТЕРИЮ НАДЕЖНОСТИ

Коптелова И.А. – канд. техн. наук, доцент ВолгГТУ
Проскуряков С.С. – студент ВолгГТУ

При анализе и проектировании электрических сетей среди множества параметров эффективности важнейшим является надежность. Понятие надежности

системы чаще всего вводится в статистическом смысле и характеризует вероятность сохранения работоспособности за некоторый промежуток времени. Структурная надежность зависит от выбранной структурной схемы сети, степени дублирования аппаратуры и от вероятности разрушения или повреждения отдельных линий или узлов.

Для анализа структурной надежности сетей удобно использовать матрично-топологические методы. В их основе лежит представление сети с помощью графа сети. Электрическую сеть можно представить как совокупность множества $X = \{x_1, x_2,..., x_N\}$ узлов и множества $U = \{u_{ij}\}$ соединяющих узлы x_i и x_j ребер.

В работе используются следующие основные понятия и определения.

Множество всех узлов графа G, смежных с некоторым узлом x_i, называется окружением узла x_i и обозначается $N(x_i)$. Степень узла графа равна числу ребер, инцидентных данному узлу. Будем обозначать степень узла x через $deg(x)$. Чередующаяся последовательность узлов и ребер $x_1, u_1, x_2, u_2,\ldots, x_l, u_l, x_{l+1}$ называется маршрутом, соединяющим узлы x_l и x_{l+1}, или (x_l, x_{l+1})-маршрутом. Очевидно, что маршрут можно задать последовательностью $x_1, x_2,\ldots, x_{l+1}$ его узлов, а также последовательностью $u_1, u_2,\ldots, u_l$ ребер. Самонепересекающая упорядоченная последовательность ребер из узла x_s в узел x_t называется путем. Число ребер, образующих путь, называется рангом пути. Между любыми двумя узлами сети можно построить, как правило, множество путей. Пути называются независимыми, если у них нет общих ребер. Если между любыми двумя узлами существует не менее κ независимых путей, то сеть называется κ-связной. Сечением сети будем называть минимальную совокупность ребер, удаление которых разделит сеть на две подсети. Число ребер сечения называется рангом сечения. Сечения называются независимыми, если они не содержат одни и те же ребра. Пусть P_{1l} – некоторый путь вида $x_1, x_2,\ldots, x_l$ в графе G, x_i и x_j – входящие в него узлы, $i < j$. Очевидно, что часть $x_i, x_{i+1},\ldots, x_j$ пути P_{1l}, начинающаяся в узле x_i и заканчивающаяся в x_j, сама является путем графа G. Этот путь будем называть (x_i, x_j)-фрагментом пути P_{1l}.

Электрическая сеть функционирует, если обеспечивается возможность передачи сообщений между узлами сети, то есть если имеется хотя бы один путь между узлами. Надежность сети в целом будет определяться как вероятность связности всех узлов сети, участвующих в обмене данными. Таким образом, задача построения надежной сети сводится к задаче анализа различных вариантов ее структуры по заданным показателям надежности, которые зависят как от надежности ее элементов, так и от способа их взаимного соединения.

В этом случае в качестве показателя надежности сети в целом можно использовать вероятность наступления сложного события, заключающегося в установлении связей между всеми узлами из заданного множества, и рассчитывать его как отношение суммы взвешенных коэффициентов важности вероятностей соединений пар узлов.

$H_0 = \dfrac{\sum_{i=1}^{n} K_i H_i}{\sum_{i=1}^{n} K_i}$, где H_0 – показатель надежности всей сети; K_i – коэффициент важности i-го соединения узлов ($0 \le K_i \le 1$); H_i – показатель надежности i-го соединения узлов.

При проектировании реальных сетей обычно отсутствует необходимость точного расчета надежности сети. Проектировщикам нужно лишь убедиться в том, что надежность сети, с одной стороны, не ниже заданной и, с другой стороны, не имеет экономически необоснованного запаса. Другими словами, на практике достаточно гарантировать, что истинное значение надежности H_0 находится в некоторых пределах $H_{\min} < H_0 < H_{\max}$. Оценка надежности сети с заданной конечной точностью позволит сократить трудоемкость расчетов в большей мере, чем ниже требуемая точность оценки.

В работе предложена методика расчета оценок надежности, причем нижняя оценка H_μ рассчитывается по совокупности всех путей между узлами, верхняя же H_σ – по совокупности сечений. При расчете надежности по совокупности путей добавление каждого следующего пути приводит к увеличению надежности, а при расчете по совокупности сечений добавление каждого следующего сечения приводит к уменьшению структурной надежности, что создает предпосылки для двусторонней оценки структурной надежности с гарантированной точностью по ограниченным наборам путей и сечений. Это свойство позволяет регулировать трудоемкость оценок надежности в зависимости от заданной точности.

Действительно, для решения задачи достаточно последовательно просматривать пути μ, пока не выполнится условие $H_\mu^{(m)} \ge H_{\min}$, и затем просматривать сечения σ, пока не выполнится условие $H_\sigma^{(r)} \le H_{\max}$. Здесь m, r – число путей и сечений соответственно. Если для некоторого m окажется, что $H_\mu^{(m)} > H_{\max}$, то можно прекратить расчеты и принять решение, что в сети заложена излишня избыточность, а если для некоторого r окажется, что $H_\sigma^{(r)} < H_{\min}$, то это значит, что требования к надежности сети не выполняются. Число требующих просмотра путей m и сечений r обычно гораздо меньше общего числа путей n и общего числа сечений k графа, чем и достигается сокращение трудоемкости оценки. Одновременно гарантируется, что значение показателя надежности сети лежит в заданных пределах $H_\mu^{(m)} < H_0 < H_\sigma^{(r)}$.

Таким образом, для выполнения расчетов нам необходим список всех возможных путей и сечений между заданными узлами x_a и x_b. Причем искомая надежность соединения H_{ab} зависит от надежности каждого пути и вариантов их пересечений по общим ребрам. Если учитывать только независимые пути, то трудоемкость вычислений значительно сокращается. Аналогична ситуация с независимыми сечениями.

Пусть надежность j-го ребра i-го пути – $H_j^{(i)}$. Тогда надежность i-го пути $H^{(i)}$ будет равна

$$H^{(i)} = \prod_{j=1}^{m_i} H_j^{(i)},$$

где m_i – ранг пути.

Если все пути независимы, то вероятность связности узлов x_a и x_b по множеству независимых путей можно определить как

$$H_\mu^{(ab)} = 1 - \prod_{i=1}^{n} (1 - H^{(i)}),$$

где n – количество независимых путей между x_a и x_b.

Поскольку для повышения точности оценки необходимо максимизировать $H_\mu^{(ab)}$, то необходимо максимизировать число независимых путей при одновременной минимизации их рангов.

Аналогично рассуждая, нетрудно установить, что для увеличения точности верхней оценки вероятности связности узлов по множеству независимых сечений необходимо максимизировать число независимых сечений при минимизации их рангов. Таким образом, задача расчета оценки структурной надежности сети сводится к поиску независимых путей и сечений между узлами графа. Рассмотрим алгоритм реализации данной задачи. Идея алгоритма заключается в направленном переборе всех существующих путей в графе между узлом-источником (узел x_a) и узлом-приемником (узел x_b). Используется списочное представление графа, при котором граф задается списком N, где запись $N(x_i)$ представляет собой окружение узла x_i.

Алгоритм состоит из следующих этапов:

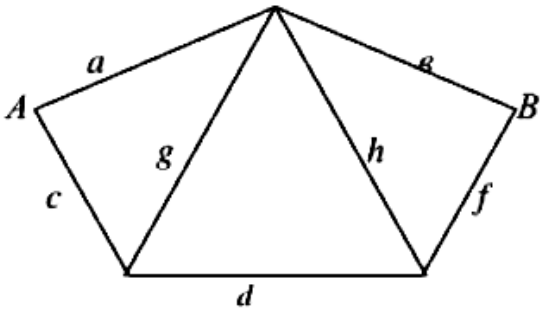
1) формирование списка возможных фрагментов пути из узла-источника в узел-приемник;

2) поиск по фрагментам всех возможных путей;

3) выделение независимых путей минимального ранга;

4) формирование списка независимых сечений минимального ранга.

Для примера использования алгоритма при расчете надежности рассмотрим простейшую электрическую сеть, изображенную в виде графа на рисунке.



Рисунке. Структура электрической сети

Буквы ребер графа обозначают вероятности работоспособных состояний соответствующих линий связи. Узлы для простоты будем считать идеально надежными. Предположим, что для связи между узлами *A* и *B* можно использовать все пути, состоящие из трех и менее последовательно включенных линий связи. Это означает, что следует учесть подмножество путей $\mu = \{ab, cdf, cdb, ahf\}$. Определим приращения надежности, обеспечиваемые каждым последующим путем:

$$\Delta H_{K+1} = \overline{R}_{K+1} \cdot \left(\overline{R}_1 \cdot \overline{R}_2 \cdot \ldots \cdot \overline{R}_K\right),$$

где $\overline{R}_i = 1 - R_i$.

Применяя последовательно данную формулу и правила символического умножения к рассматриваемой сети, получаем:

$$\Delta H_1 = ab;$$

$$\Delta H_2 = cdf \cdot \left(\overline{a}\overline{b}\right) = cdf \cdot \overline{a}\overline{b};$$

$$\Delta H_3 = cdb \cdot \left(\overline{a} \cdot \overline{df}\right) = cdb \cdot \overline{a} \cdot \overline{df};$$

$$\Delta H_4 = ahf \cdot \left(\overline{b} \cdot \overline{cd} \cdot \overline{cgb}\right) = ahf \cdot \overline{b} \cdot \overline{cd} \cdot \overline{cb}.$$

Как было установлено ранее, при расчете выражений в круглых скобках мы полагали вероятности работоспособных состояний элементов, входящих в (K +1)-й путь, равными единице. При расчете последнего приращения мы использовали правило, которое можно назвать правилом поглощения длинных путей короткими. В данном случае его применение дает: $\overline{b} \cdot \overline{cgb} = \overline{b}$. Если разрешено использование других более длинных путей, содержащих более трех включенных линий, например пути *cdhb*, то не представляет труда рассчитать обеспечиваемое им приращение надежности:

$$\Delta H_5 = cdhb \cdot \left(\overline{a} \cdot \overline{f} \cdot \overline{g} \cdot \overline{af}\right) = cdhb \cdot \overline{a} \cdot \overline{f} \cdot \overline{g}.$$

Результирующую структурную надежность электрической сети можно теперь вычислить как сумму приращений, обеспечиваемых каждым из рассмотренных путей:

$$H_K = \sum_{i=1}^{K} \Delta H_i.$$

Пусть для рассмотренной сети вероятности работоспособных состояний всех элементов сети одинаковы, то есть $a = b = c = d = f = h = g = p$. В результате получим:

$$H_5 = p^2 + p^3(1 - p^2) + 2\,p^3(1 - p)(1 - p^2) + p^4(4 - p)^3.$$

Пусть p равно 0,9. При этом структурная надежность сети, рассчитанная по первым пяти путям, составит:

$$H_5 = 0{,}81 + 0{,}1385 + 0{,}01385 + 0{,}01385 + 0{,}00066 = 0{,}9768.$$

На основании приведенного расчета можно оценить вклад в повышение структурной надежности сети каждого последующего пути.

Так, путь, содержащий четыре элемента, дает приращение вероятности работоспособного состояния тракта, равное 0,00066, что при исходной вероятности работоспособного состояния элемента сети, равной 0,9, можно считать незначительным.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ ДРЕВЕСИНЫ

Шилин А.Н. – д-р техн. наук, профессор ВолгГТУ
Стрижиченко А.В. – ассистент филиала МЭИ в г. Волжском

Современный промышленный рынок диктует постоянную тенденцию к повышению качества выпускаемой продукции и снижению ее себестоимости, и поэтому развитие промышленности связано с совершенствованием технологических процессов и снижением энергетических затрат. Сушка древесины – один из основных технологических процессов в промышленности, сельском хозяйстве и строительстве. Являясь одним из самых энергоёмких процессов в промышленности, в деревообработке она является ещё и самым ответственным этапом, так как от её качества зависит долговечность изделия в целом. Повышение эффективности процесса сушки возможно за счет сокращения расхода энергии и снижения потерь на технологический брак.

Процесс совмещенного нестационарного тепло- и влагопереноса при сушке влажных тел описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений академика А.В. Лыкова:

$$c(t,\omega)\,\rho_0\frac{\partial t}{\partial \tau}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda(t,\omega)\frac{\partial t}{\partial x}\right)+\varepsilon(t,\omega)\,r(t)\rho_0\frac{\partial \omega}{\partial \tau}; \qquad (1)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial \tau}=\frac{\partial}{\partial x}\left(a_T(t,\omega)\frac{\partial \omega}{\partial x}+a_T(t,\omega)\,\delta(t,\omega)\frac{\partial t}{\partial x}\right). \qquad (2)$$

При конвективной сушке пиломатериала граничные условия можно записать в виде

$$\alpha(t,V)(t_{\text{в}}-t_{\text{пов}})-r(t)\big(1-\varepsilon(t,\omega)\big)Д_{\text{п}}\alpha_T\rho_{\text{п}}(t)\big(\omega p(t,\varphi)-\omega_{\text{пов}}\big)=-\lambda(t,\omega)\frac{\partial t}{\partial x}; \qquad (3)$$

$$Д_{\text{п}}\alpha_T(t,\omega)\big(\omega_{\text{пов}}-\omega p(t,\varphi)\big)=-a_T(t,\omega)\left(\frac{\partial \omega}{\partial x}+\delta(t,\omega)\frac{\partial t}{\partial x}\right), \qquad (4)$$

где α – коэффициент теплоотдачи с поверхности пластины, Вт/(м$^2\cdot$К); α_T – коэффициент влагообмена поверхности пластины м/с; $Д_{\text{п}}$ – критерий поверхностного испарения; r – теплота фазового перехода Дж/кг; $t_{\text{пов}}$ – температура поверхности доски, °С; $\omega_{\text{пов}}$ – влажность поверхностного слоя, кг/кг; $\rho_{\text{п}}$ – плотность пара, кг/м^3.

По условию симметрии

$$\frac{\partial t}{\partial x}(d,\tau)=0; \qquad \frac{\partial \omega}{\partial x}(d,\tau)=0. \qquad (5)$$

Моделирование совмещенного тепломассопереноса в древесине позволяет производить расчет процесса начального прогрева древесины, характеризующегося повышенными значениями градиентов температуры и влажности, которые могут привести к необратимым механическим изменениям в материале (коробление, растрескивание).

Аналитическое решение системы дифференциальных уравнений весьма затруднительно и не всегда возможно, поэтому система дифференциальных уравнений решалась численно. В качестве метода дискретизации был применен метод контрольного объема. Решение дискретных аналогов производилось методом TDMA.

Достичь энергоэффективности и реализовать потенциал энергосбережения при сохранении качества высушенного изделия можно при применении режима импульсной конвективной сушки. Сущность его заключается в ведении процесса сушки циклами, содержащими импульс и паузу. На стадии импульса происходит интенсивный подвод тепла к материалу, сушка происходит посредством циркуляции через штабель воздуха с повышенной температурой и низкой относительной влажностью. Эта стадия характеризуется высокой интенсивностью сушки, максимально возможной, с точки зрения развития сушильных напряжений, скоростью удаления влаги из древесины, большим градиентом влажности по толщине пиломатериала. Возникающие в материале механические напряжения сравнительно малы, а деформации являются преимущественно упругими из-за малой продолжительности этой стадии.

На стадии паузы нагревательные элементы и принудительная циркуляция агента сушки отключены, и происходит следующее: степень насыщенности воздуха возрастает из-за продолжающегося испарения воды из материала, поверхность древесины увлажняется из-за роста равновесной влажности, снижается градиент влажности в материале, в нем снимаются напряжения, образуется положительный градиент температуры, который ускоряет движение влаги к поверхности за счет термодиффузии.

Продолжительности стадий импульса и паузы определяются тем, что во время импульса возникающие в высушиваемом материале напряжения не должны превышать предела упругости, а во время паузы температура центральных слоев должна сравняться с температурой поверхности материала, что нужно для прекращения движения влаги из толщи материала к его поверхности. Число циклов при этом зависит от толщины, породы и влажности материала. Применение импульсных режимов конвективной сушки позволит не только сократить затраты энергии, но и отказаться от использования технологического водяного пара.

Следует отметить, что применявшиеся ранее термины: «прерывистые режимы сушки» (В.Г. Захаржевский), «режимы сушки с прерывистой циркуляцией сушильного агента» (И.В. Кречетов), «осциллирующие режимы сушки» (М.Г. Мингазов), «импульсные режимы» (А.И. Расев, Г.Н Курышов), в целом характеризующие сушку с прерывистым подводом тепловой энергии, не отражают

сущности импульсного режима сушки. Режимы с «прерывистой» циркуляцией сушильного агента указывают на периодическое отсутствие циркуляции без акцента на то, что при этом прекращается передача тепловой энергии материалу. Осциллирующие режимы указывают на изменение состояния сушильного агента по некоторой периодической функции. Термин «импульсная сушка» указывает на передачу энергии материалу тепловыми импульсами, следующими с определенной цикличностью. Режимными параметрами на стадии «импульс» являются температура t_c сушильного агента и продолжительность $\tau_{им}$. На стадии «пауза» режимным параметром является продолжительность $\tau_{па}$. Наиболее опасными для целостности материала являются напряжения растяжения, возникающие в гигроскопической зоне на начальном этапе процесса сушки. По мере просыхания материала эти напряжения снижаются, а на конечном этапе при перемене знака не представляют опасности. Поэтому принято решение определять продолжительность стадии «импульс» по предельно допустимым напряжениям в начальной стадии процесса.

На рисунке представлены графики изменения влажности различных слоев древесины при использовании импульсного режима сушки.

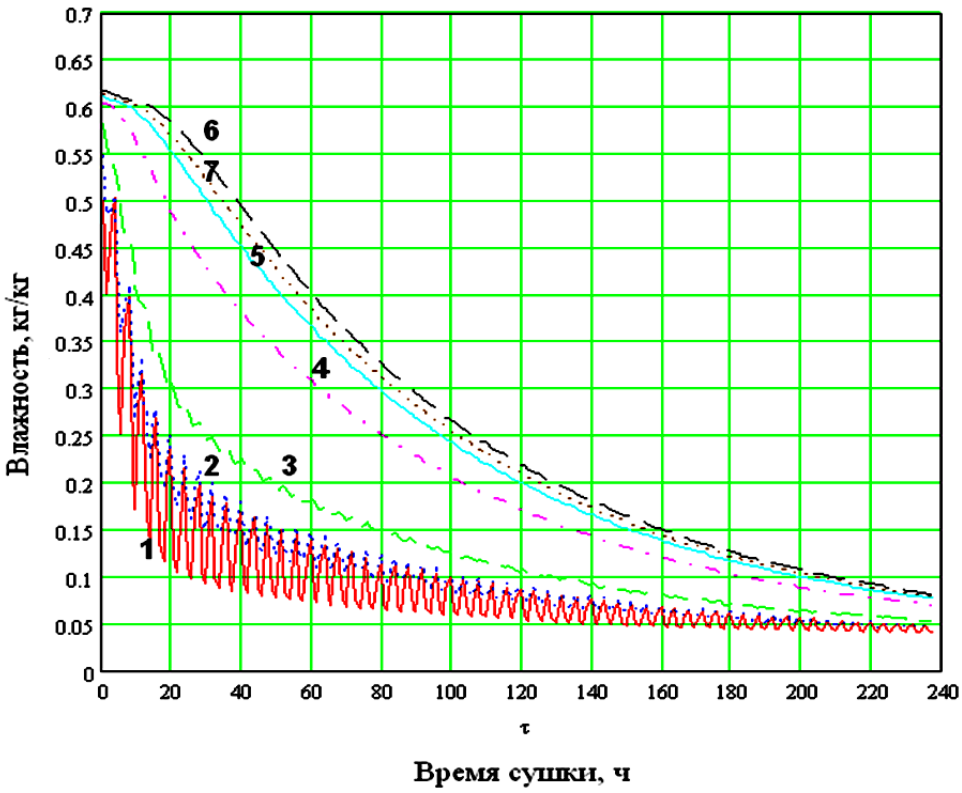


Рисунок. Графики изменения влажности различных слоев древесины во времени:
1 – поверхностный слой; 2 – на глубине 2 мм; 3 – на глубине 4 мм; 4 – на глубине 10 мм; 5 – на глубине 14 мм; 6 – на глубине 16 мм; 7 – на глубине 20 мм

Порода древесины – сосна; температура воздуха 75 °С; $\tau_{им}$ = 2 ч; $\tau_{паузы}$ = 2 ч. Удельные затраты тепловой энергии на сушку 1 м^3 и 1 кг древесины составляют, соответственно, 515 кВт·ч/м^3 и 1,051 кВт·ч/кг, что на 36 % ниже, чем при применении непрерывного режима сушки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Косарин, А.А.* Технология импульсной сушки пиломатериалов : дис. … канд. техн. наук / А.А. Косарин. – Москва, 2012. – 153 с.

2. *Стрижиченко, А.В.* Применение численного анализа для разработки оптимальных режимов сушки древесины / А.В. Стрижиченко // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ–25: сб. тр. XXV междунар. науч. конф. В 10 т. Т. 8. Секция 12 (г. Волгоград, 29-31 мая 2012 г.) / ВолгГТУ [и др.]. – Саратов, 2012. – С. 8-10.

АЛГОРИТМ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОЙ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ ПО КРИТЕРИЮ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ

Коптелова И.А. – канд. техн. наук, доцент ВолгГТУ
Шалыгина М.М. – студентка ВолгГТУ

Современная городская или районная электрическая сеть представляет собой совокупность множества элементов: трансформаторных подстанций, распределительных и секционирующих пунктов, линий электропередачи. Выбор оптимального распределения этих компонентов, топологии линий электропередачи до сих пор является довольно сложной задачей. За функционированием существующих сетей непрерывно следят специализированные диспетчерские центры.

При аварийных режимах диспетчерские центры принимают решения об оперативных переключениях в сети электроснабжения. Для принятия решений при подключении потребителей необходима информация о пропускной способности электрической сети. Эти данные непосредственно влияют на решения о допустимости оперативного подключения, передачи части нагрузки с одной линии сети на другую.

Фидер (сегмент сети) – это множество объектов сети, электрически соединенных в данный момент времени. Пропускная способность фидера – это максимальное значение силы тока, который данный сегмент сети может пропустить для потребителей электрической энергии. Пропускная способность фидера ограничивается пропускной способностью элементов сети. Пропускная способность электрической линии является одной из основных характеристик линий электропередачи, определяющей наибольшую мощность, которую можно передать по линии с учётом всех ограничивающих условий (устойчивости, потерь на корону, нагрева проводников и контактов и т.д.). Пропускная способность электрической линии зависит от напряжения в начале и в конце линии, от её длины и от волновых характеристик (волнового сопротивления и коэффициента изменения фазы).

При оперативном переключении в случае аварии или при подключении потребителя к сети без расчета пропускной способности велика вероятность аварийного выхода из строя элементов сети. Для предотвращения таких ситуаций в сети ставятся аварийные элементы, однако даже их срабатывание приводит к длительному отсутствию электроэнергии у потребителей.

Структуру электрической сети можно представить в виде направленного графа, например, на рис. 1 представлен граф электрической сети населенных пунктов.

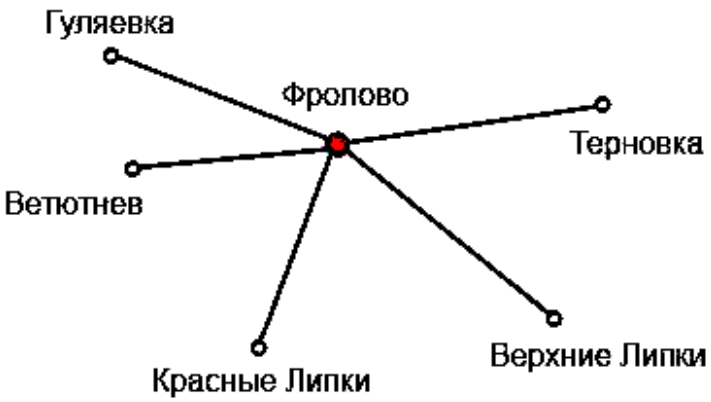


Рис. 1. Граф электросети г. Фролово

На пропускную способность сети значительно влияет топологическая структура графа данной электрической сети. При организации сети в первую очередь необходимо выбрать именно топологию. Под топологией сети понимается конфигурация графа, вершинам которого соответствуют электростанции, трансформаторные подстанции, потребители и другие элементы, а ребрам – физические связи между ними.

Выбор топологии электрических связей существенно влияет на многие характеристики сети. Например, наличие резервных связей повышает надежность сети и делает возможным балансирование загрузки отдельных каналов. Простота присоединения новых узлов, свойственная некоторым топологиям, делает сеть легко расширяемой. Экономические соображения часто приводят к выбору топологий, для которых характерна минимальная суммарная длина линий связи.

Существуют четыре основных типа топологических схем: шина (*bus*), кольцо (*ring*), звезда (*star*) и ячеистая топология (*mesh*) (рис. 2). Другие топологические схемы обычно являются комбинацией двух и более основных типов. Выбор типа топологической схемы для сети является одним из первых этапов проектирования сети. Этот этап учитывает множество факторов, в число которых входят цена, расстояния, вопросы безопасности и т.д.

Таким образом, чтобы определить оптимальную структуру по критерию пропускной способности необходимо проанализировать различные топологии

сети. Анализ топологических схем целесообразно проводить с помощью теории графов. При представлении сети в виде направленного графа задачу расчета пропускной способности сети можно свести к задаче нахождения максимального потока.

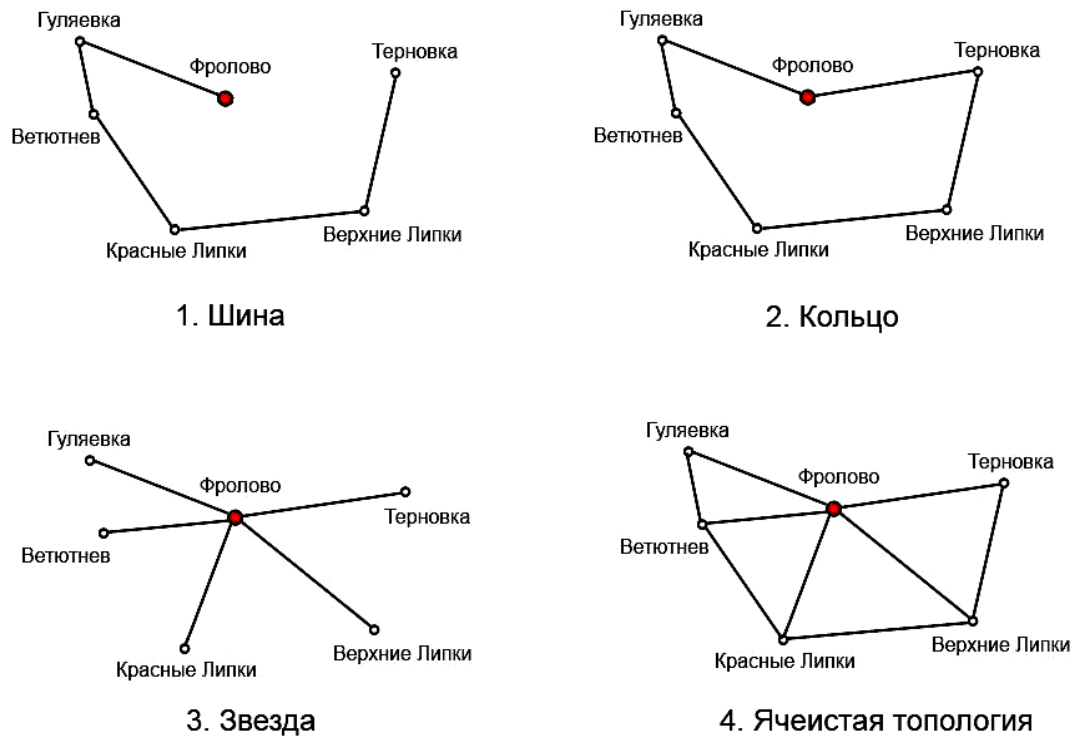


Рис. 2. Различные топологии сети

Задача о максимальном потоке широко используется в настоящее время при изучении различных физических и химических процессов, в транспортных, электрических, коммуникационных сетях, в некоторых операциях над матрицами. В решение данной проблемы большой вклад внесли исследования Форда и Фалкерсона, алгоритмы Диница и Карзанова. На основе результатов их исследований долгое время достигались наилучшие оценки быстродействия алгоритмов.

В 1986 г. А.В. Голдбергом и Р.Е. Таряном был опубликован алгоритм, основанный на идее предпотоков Карзанова, не использующий поиска тупикового потока в фазах. Для нахождения максимального потока он использует предпотоки и метки, изменяемые во время работы алгоритма. В основе алгоритма лежат две операции: наращивание потока (*Push*) и изменение метки вершины (*Relabel*), в связи с этим метод, примененный в алгоритме, получил название *Push-Relabel*. *Push-Relabel*-алгоритмы очень эффективны и исследуются до сих пор. В 1997 г. А.В. Голдберг и С. Рао предложили алгоритм, присваивающий дугам неединичную длину. Это самый современный из алгоритмов. Этот алгоритм может быть использован для расчета пропускной способности фидера, если определенным образом модифицировать топологию его графа.

В каждой своей итерации, алгоритм Голдберга-Рао ищет тупиковый поток, используя неединичную функцию для определения длины допустимых дуг. Идея использования неединичной функции уже рассматривалась многими учеными, но никогда не давала улучшения асимптотической оценки быстродействия.

В общем виде работу алгоритма на i-й фазе можно представить так: имеются значения функции длины дуги l и dl. Определение «больших» и «маленьких» остаточных пропускных способностей зависит от текущей величины остаточного потока. Обозначим F верхнюю оценку остаточного потока. Изначально она равна $\sum_{(i,j)} C(i,j) \le nC$ и корректируется по ходу выполнения алгоритма. Если пропускные способности и величина потока являются целыми числами, алгоритм должен прекратить свою работу, как только F станет меньше единицы. До тех пор, пока F не уменьшилось, выполняются следующие операции:

1) вычислить площадь сети (Vol_{fl}) – сумму площадей всех дуг с положительной остаточной пропускной способностью, и верхнюю оценку величины остаточного потока $Vol_{\mathrm{fl}}/d(s)$. Если $Vol_{\mathrm{fs}}/dl(s) \le F/2$, изменить F и завершить фазу;

2) вычислить l';

3) получить ациклический граф;

4) найти в полученном графе тупиковый поток, либо поток величины Δ. Текущее значение F определяет величину Δ. Δ – это величина, на которую необходимо увеличить поток на каждом шаге данной фазы;

5) увеличить поток в исходной сети с помощью найденного ранее потока;

6) вычислить l и dl (dl – дистанция вершины i до t относительно l).

Данный алгоритм обеспечивает наилучшую скорость поиска пропускной способности электрической сети. Вычисления с помощью данного алгоритма необходимо производить для каждой топологии электросети для нахождения оптимальной топологии.

АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ МИКРОГЭС

Арванитаки Н.В. – доцент филиала МЭИ в г. Волжском
Петренко А.Р. – филиала МЭИ в г. Волжском

Введение

С каждым годом все больше обостряются вопросы, связанные с дальнейшими путями развития энергетики. С одной стороны, рост населения, стремление к повышению жизненного уровня людей диктуют целесообразность наращивания мощностей энергетики, и особенно электроэнергетики, причем просто гигантскими темпами; с другой стороны, возникающие экологические проблемы, истощение природных источников сырья, и в первую очередь нефти и газа, требуют более экономичного и рационального использования полученной энергии и потенциальной энергии ее источников.

Исчерпание возможностей освоения крупных водотоков заставило обратить внимание на так называемую малую гидроэнергетику. К этой области гидроэнергетики, имеющей свои технические особенности, относятся ГЭС малой мощности – малые ГЭС, эксплуатирующие сток малых, средних и верховья крупных рек.

Современная гидроэнергетика по сравнению с другими традиционными видами электроэнергетики является наиболее экономичным и экологически безопасным способом получения электроэнергии. Малая гидроэнергетика идет в этом направлении еще дальше. Небольшие электростанции позволяют сохранять природный ландшафт, окружающую среду не только на этапе эксплуатации, но и в процессе строительства. При последующей эксплуатации отсутствует отрицательное влияние на качество воды: она полностью сохраняет первоначальные природные свойства. В реках сохраняется рыба, вода может использоваться для водоснабжения населения. В отличие от других экологически безопасных возобновляемых источников электроэнергии, таких как солнце, ветер, малая гидроэнергетика практически не зависит от погодных условий и способна обеспечить устойчивую подачу дешевой электроэнергии потребителю. Еще одно преимущество малой энергетики – экономичность. В условиях, когда природные источники энергии – нефть, уголь, газ – истощаются, постоянно дорожают, использование дешевой, доступной, возобновляемой энергии рек, особенно малых, позволяет вырабатывать дешевую электроэнергию. К тому же сооружение объектов малой гидроэнергетики низкозатратно и быстро окупается [1].

Эффективность работы любой турбины характеризует её коэффициент полезного действия. Однако это значение не постоянно. Оно может меняться при изменении расхода воды. Так, например, турбина Каплана, обладая максимальным КПД равным 92 %, при малой загруженности турбины показывает КПД менее 20 %, а некоторые турбины и вовсе не работают при низкой загруженности [2]. На графиках (рис. 1) видно изменение КПД в зависимости от расхода воды. Данные характеристики приняты за основу анализа.

Каждый вид рассматриваемых турбин имеет различные пропускные способности. Поскольку расход воды любой реки изменяется в течение года, сложно определиться в выборе гидротурбины по пропускной способности. Для этого написана программа в программном обеспечении MATLAB, позволяющая определить зависимость вырабатываемой мощности МГЭС от её пропускной способности. В качестве исследуемой реки выбрана река Франции Уш.

Гидрологические данные реки Уш

Река Уш находится на востоке страны. Уш является одним из правых притоков реки Сона. Исток находится в муниципалитете Люзени-сюр-Уш, река протекает по территории департамента Кот-д'Ор. Самый низкий уровень воды в реке летом, в период с июля по сентябрь включительно.

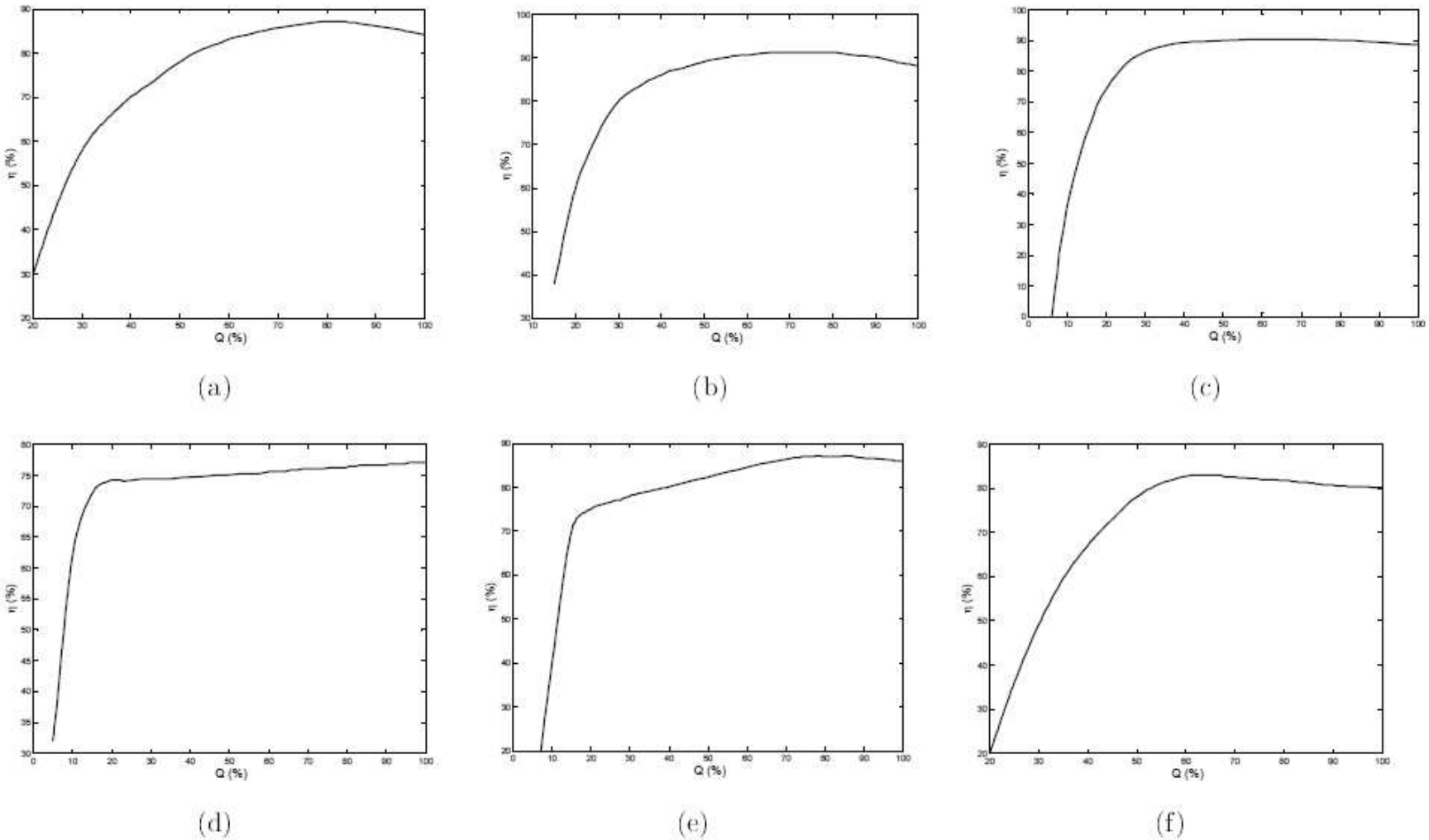


Рис. 1. КПД гидротурбин:
a) турбина Френсиса; b) турбина Каплана; c) турбина Каплана с двойным регулированием;
d) водяное колесо; e) турбина Архимедов винт; f) турбина Банки [3]

Длина реки составляет 95 км. Площадь её водосборного бассейна – 860 км^2. Среднегодовой расход воды – 4,8 м^3/с (таблица).

Таблица

Расход воды реки Уш, *Q* (м^3/с) [4]

Месяц/Год	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Январь	14,300	22,500	9,200	7,450	4,900	11,600	6,850	9,890	11,800	18,100
Февраль	12,600	8,800	12,400	12,000	11,800	5,120	13,100	12,000	2,680	3,880
Март	2,760	2,610	6,660	22,500	9,760	12,000	3,840	7,360	4,750	4,570
Апрель	1,400	2,100	10,900	10,800	3,790	14,000	3,090	7,860	2,300	5,040
Май	1,160	2,320	4,020	5,580	1,870	4,990	2,470	2,730	1,150	15,000
Июнь	0,746	1,190	1,490	2,070	3,830	7,260	1,640	2,730	0,780	2,970
Июль	0,565	0,951	0,954	1,330	5,130	3,700	4,360	1,490	0,918	1,630
Август	0,506	0,991	0,711	1,120	7,590	2,630	1,640	1,560	1,110	1,080
Сентябрь	0,509	0,727	0,636	0,819	2,480	3,140	1,440	1,890	0,946	1,110
Октябрь	0,560	1,880	0,575	1,590	2,090	5,210	1,110	1,840	0,809	2,680
Ноябрь	3,120	9,000	0,755	1,990	2,540	9,290	2,410	12,400	2,740	5,030
Декабрь	7,310	9,580	2,640	2,010	10,200	10,600	7,990	24,200	13,300	17,800

У реки Уш могут быть сезонные колебания расхода воды, которые в течение года могут меняться в размере 10 : 1. На основе полученных данных с контрольно-измерительной станции Пломбьер определено среднее значение расхода воды, построены графики (рис. 2). Среднее значение расхода воды может быть определено по следующей формуле:

$$\overline{Q} = \frac{\sum_{i=1}^{n} Q_i}{n}, \qquad (1)$$

где Q_i – расход воды в i-й день, м^3/с; n – количество дней.

По данным таблицы среднее значение расхода воды для реки Уш $\overline{Q}$ = 5,42 м^3/с.

Для более точного расчета в качестве минимального периода выбран промежуток времени равный одним суткам в течение последних 10 лет. Количество дней равно 3 684. Среднемесячные значения расхода воды приведены в таблице.

Для лучшей оценки изменения потока реки вводится еще один показатель. Стандартное отклонение речного потока определяется формулой

$$\sigma(Q) = \left(\overline{Q^2} - \overline{Q}^2\right)^{1/2}. \qquad (2)$$

Стандартное отклонение $\sigma(Q)$ = 7,4 м^3/с, рассчитанное с учетом минимального биологического потока 0,58 м^3/с, указывает на огромную скорость изменения потока в течение периода 10 лет. Среднее значение расхода воды – 4,84 м^3/с, таким образом, оно не является идеальным статистическим показателем для выбора турбины по пропускной способности.

В качестве примера рассмотрим рис. 2, а, из которого видны высокие вариации потока воды в течение периода 120 месяцев. В связи с этим для выбора оптимального размера турбин написаны программы, рассчитывающие зависимость вырабатываемой механической мощности от пропускных способностей

каждой турбины, на основе циклического анализа всего рассматриваемого периода для каждой турбины. Для анализа различных систем МГЭС выбраны значения пропускных способностей турбин в диапазоне от 4,0 до 10,0 м^3/с.

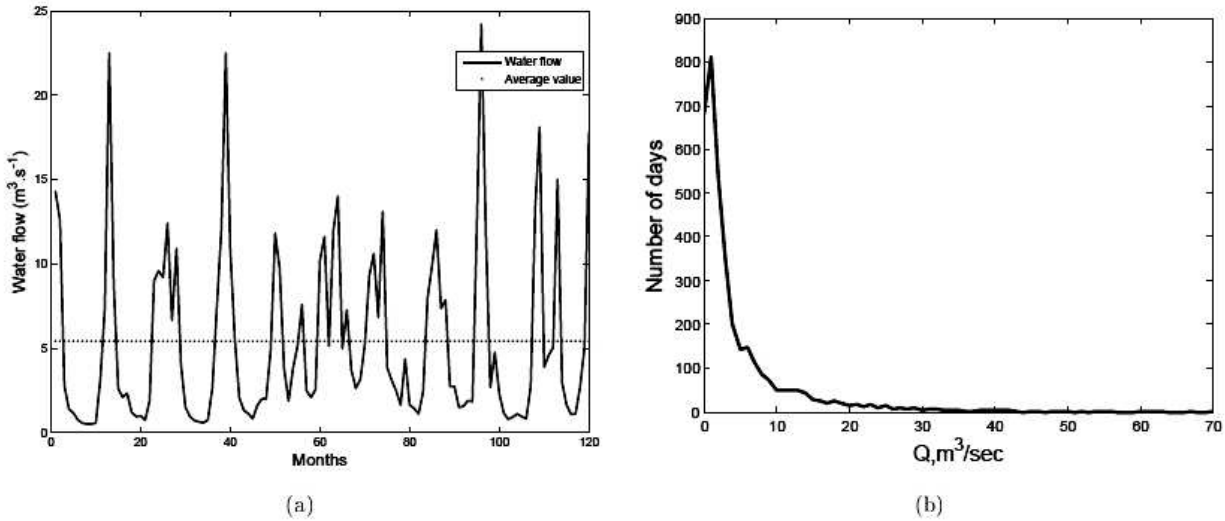


Рис. 2. Изменение расхода воды:
a) хронологическое изменение расхода воды за последние 10 лет;
b) кривая продолжительности расхода воды

Расчет мощности

В соответствии с уравнением Бернулли [5], механическая мощность на выходе из турбины может быть рассчитана по следующей формуле:

$$P = \eta\sigma Qgh, \tag{3}$$

где P – механическая мощность, кВт; η – КПД турбины, %; σ – плотность воды, 998 кг/м^3; Q – расход воды, м^3/с; g – ускорение свободного падения, 9,81 м/с^2; h – чистая высота напора, 2,4 м.

Механическая мощность рассчитывается с учетом гидрологических данных реки и эффективности работы каждого вида турбины. По полученным значениям строится график (рис. 3).

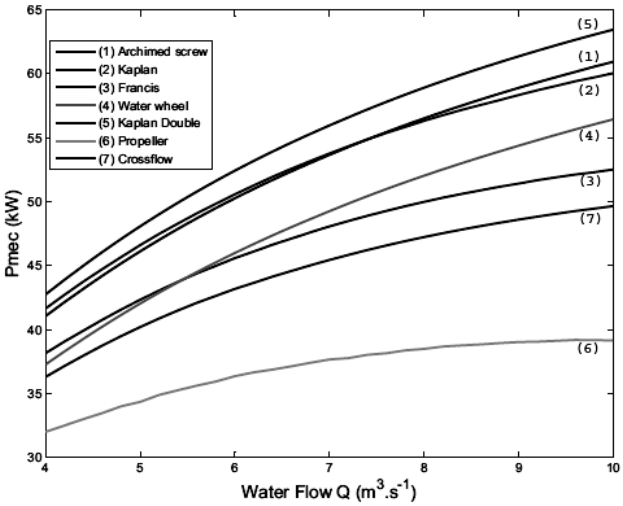


Рис. 3. Среднее значение механической мощности $P_{мех}$ (кВт) для различных типов турбин в зависимости от пропускной способности турбины Q (м^3/с)

Анализ возможных режимов работы микро-ГЭС

Для высоких скоростей потока воды иногда более рационально конструировать МГЭС с двумя или более турбинами, работающими параллельно или в режиме резервного преобразования энергии. Это объясняется характерной пологостью эффективности для большинства видов турбин. Например, как видно из характеристики эффективности турбины «Архимедов винт», при расходе воды более чем 30 % эффективность достаточно высокая.

Последовательное включение (с резервной турбиной) позволяет генерировать дополнительную электроэнергию в месяцы, когда расход воды значительно выше, чем номинальное значение расхода воды для турбины.

Из таблицы видно, что расход воды принимает наибольшие значения в зимние месяцы, именно когда это необходимо для потребителя. Это влияет на цену энергетического оборудования. Таким образом, использование нескольких турбин для полученных значений вырабатываемой мощности, превышающей возможности МГЭС с одной турбиной менее чем на 50 %, не будет рациональным.

В объекте исследования наилучшими показателями эффективности обладают турбина Каплана и турбина «Архимедов винт». Поэтому интересно сравнение работы этих турбин в параллельном и резервном режимах работы. На базе программного обеспечения MATLAB разработаны две программы для расчета механической энергии: одна – для параллельной работы двух турбин и другая – для последовательной работы двух турбин. По полученным значениям построен график (рис. 4).

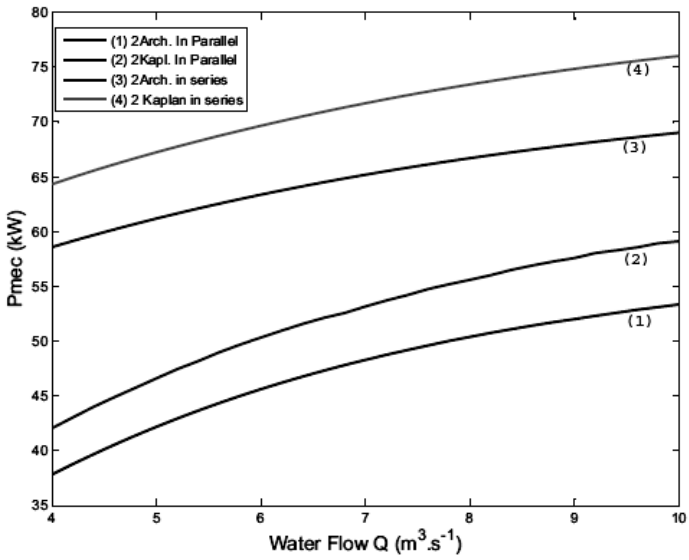


Рис. 4. Среднее значение механической мощности *P* (кВт) для различных типов турбин в зависимости от пропускной способности турбины *Q* ($м^3/с$) для турбин, работающих параллельно и в режиме резервного питания

Из графика видно, что значения вырабатываемой мощности турбин, работающих в режиме резервного питания, больше, чем турбин, работающих в параллельном режиме. Кроме того, технологически такие МГЭС проще. В одних и

тех же условиях работы турбины Каплана вырабатывают больше энергии, чем турбины «Архимедов винт». Но если вернуться к вопросам экологии, то несомненно «Архимедов винт» лучше. Он работает в естественном режиме воды, пропуская свободно через себя крупный мусор и не повреждая рыбу, более долговечен и менее требователен к частому ремонту. Кроме того, подобные МГЭС, в силу простоты своей конструкции, очень быстро окупаются.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Осокин, В.Л.* Нетрадиционные и возобновляемые источники / В.Л. Осокин, Д.А. Семенов, Д.Е. Дулепов, Е.А. Сбитнев. – Нижний Новгород.

2. *Harvey, A.* Micro-Hydro Design Manual: A Guide to Small-Scale Water Power Schemes. Practical Action. – London: IT Publications, 1993.

3. http://www.mannpower-hydro.co.uk/benefits.php

4. http://www.hydro.eaufrance.fr

5. Asi Bunyajitradulya, Conservation of Energy for A Fluid Stream, 2103-abj Fluid Mechanics.

ВОПРОСЫ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА СУШКИ ДРЕВЕСИНЫ

Васильева И.Л. – доцент филиала в г. Волжском
Арванитаки Н.В. – доцент филиала в г. Волжском
Стрижиченко А.В. – ассистент филиала в г. Волжском

Сушка, являясь энергоемким тепловым процессом, потребляет до 80 % общей энергии, затрачиваемой на производство того или иного изделия из древесины.

В настоящее время в мире нет единого точного метода и критерия оценки энергозатрат на сушку древесины. Удельные энергозатраты на сушку 1 м^3 древесины без учета энергозатрат на размораживание и предварительный нагрев зависят от следующих факторов:

а) породы древесины (хвойные, лиственные);
б) региона произрастания данной породы древесины;
в) начальной и конечной влажности;
г) степени подготовки древесины к сушке (обрезная, необрезная);
д) сортамента древесины (толщина, ширина).

Также при выборе режима сушки важно знать конечное применение готового изделия из древесины, которое определяет требования к категории качества сушки.

В таблице представлены значения удельных энергозатрат на сушку пиломатериалов различных пород древесины.

Таблица

Значения удельных энергозатрат на сушку пиломатериалов

Пиломатериал доска обрезная, толщина 50 мм, $V = 6$ м^3	Лиственница	Береза	Ясень	Бук	Дуб
Плотность	540	520	535	560	585
Влажность, %: начальная конечная	 75,0 9,4	 83,0 7,5	 68,0 6,0	 28,0 5,0	 68,0 5,7
Общий расход энергии на сушку при полной загрузке, кВт·ч: тепловая электрическая	1920 1280 640	1896 1200 696	2949 1421 628	935 680 255	2321 1624 695
Удельный расход энергии на удаление 1 кг жидкости, кВт·ч: тепловая электрическая	0,90 0,60 0,30	0,84 0,53 0,31	1,22 0,78 0,44	1,21 0,88 0,33	1,06 0,70 0,36

Если удельное энергопотребление на удаление 1 кг жидкости из пиломатериала отнести к единой толщине, например 10 мм, то величина такого удельного энергопотребления почти не зависит от толщины пиломатериала и составляет от 0,144 до 0,170 кВт·ч. Это показывает, что при сушке толстых сортаментов (брус, бревна) энергозатраты определяются в основном не удалением влаги с поверхности пиломатериала, а ее диффузией к поверхности по капиллярам. Увеличение плотности древесины при всех одинаковых других условиях приводит к значительному увеличению времени сушки и удельного энергопотребления.

В условиях постоянно растущей стоимости энергоресурсов весьма актуальной является задача ее экономии. На деревообрабатывающих и мебельных предприятиях в подавляющем числе случаев сушка пиломатериалов осуществляется в конвективных камерах периодического действия с многократной циркуляцией. Такие камеры в полной мере обеспечивают требуемое качество сушки материала, в том числе заготовок и пиломатериалов твердых пород.

Расход тепла на сушку для таких камер складывается из расходов тепла на испарение, нагревание материала и на потери в окружающую среду.

При этом тепло, израсходованное на испарение воды из древесины, в соответствии с принципиальной схемой сушилки полностью выбрасывается в атмосферу. В зависимости от применяемого режима эти затраты колеблются в пределах от 1,0 до 1,55 кВт·ч/кг воды [1]. Затраты тепла на испарение влаги можно снизить, используя рекуператоры. В настоящее время они применяются для подогрева свежего воздуха, поступающего в камеру, за счет тепла отработавшего сушильного агента. Наибольшая экономия тепла наблюдается при использовании мягких режимов сушки пиломатериалов, а наименьшая – при применении режимов сушки, характеризующихся повышенной температурой.

Целесообразность использования рекуператоров определяется в каждом конкретном случае. В частности, технико-экономическими расчетами установлено,

что применение рекуператоров в камерах непрерывного действия экономически нецелесообразно даже при сушке пиломатериалов мягкими режимами, если для получения тепловой энергии используются отходы производства. Общий расход тепла на сушку при этом может быть снижен с 1,0-1,55 до 0,6-0,75 кВт·ч/кг воды, то есть практически вдвое. Однако даже столь существенный эффект при существующих ценах на электроэнергию не делает их рентабельными. Имеют место большие капитальные вложения и повышенные эксплуатационные расходы.

В существенно большей степени (до 70 %) обеспечивается возврат тепловой энергии, расходуемой на испарение, в конденсационных сушилках, которые снабжаются тепловыми насосами с открытым циркуляционным контуром. Рабочим телом в нем может быть воздух (тепловой насос «воздух – воздух») или вода («воздух – вода»).

В сушильных камерах, оборудованных тепловыми насосами с открытым циркуляционным контуром, скрытая теплота парообразования утилизируется полностью. Она расходуется либо на нагрев воздуха в смежных с камерами помещениях, либо на нагрев воды, используемой для того или иного назначения.

Использование вторичного тепла возможно также как для предварительной сушки пиломатериалов, так и для их досушки после конденсационной сушилки. Можно говорить о двух конструктивных схемах, представляющих тандем «конденсационная сушилка – камера досушки пиломатериалов» или «конденсационная сушилка – камера предварительной подсушки пиломатериалов».

Максимальная скорость сушки наблюдается на начальном этапе процесса. При полной конденсации выделившейся из древесины влаги для этого периода тепловой насос будет иметь наибольшую мощность. Из этого следует, что использование теплового насоса наиболее целесообразно для начальной стадии сушки.

Исходя из приведенных данных, выбор энергоэффективных процессов сушки древесины должен быть многокритериальным для оптимизации затрат тепловой и электрической энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Расев, А.И.* Утилизация тепловой энергии в сушильных камерах /А.И. Расев, С.В. Кучер // «ДЕРЕВО.RU». – 2001. – № 6. – С. 118-122.

2. *Мищенко, В.Н.* Сравнительный анализ работы разнотипных установок сушки древесины / В.Н. Мищенко, В.П. Голицын // Перспективы развития деревообрабатывающей отрасли. – 2009. – С. 1-32.

3. *Ладейщиков, Н.* В. В какой камере сушить древесину?/ Н.В. Ладейщиков // Дерево.ru. – 2009. – № 3. – С. 66-69.

СОДЕРЖАНИЕ

Пленарные доклады

Чичирова Н.Д., Чичиров А.А., Филимонов А.Г., Паймин С.С., Власов С.М. Современные тенденции повышения экологической безопасности ТЭС…….. 3
Папуша А.И. Концепция экоэнергетических региональных и межрегиональных проектов на базе отечественной конверсионной разработки. О перспективах и преимуществах интеграционных экоэнергетических проектов межгосударственного уровня…….. 7
Папуша А.И., Папуша И.А. Создание скважинного парогазогенератора на базе нового типа горения……..... 8

Секция № 1

Химическая, нефтеперерабатывающая и газовая промышленность

Бушова К.И., Шаркова М.А. Очистка воды от органических и минеральных примесей на основе мембранной обработки воды и технологии генерации ОН-радикалов…….. 10
Васильева Ю.В., Карева Г.Н., Голованчиков А.Б. Эмульсия дизеля с водоспиртовой смесью и дизеля с водоацетоновой смесью…… 13
Одоевцева М.В., Гаврилина Д.Л., Скоромная О.С. Анализ современных методов утилизации стоков схемы умягчения воды…… 17
Воротнева С.Б., Голованчиков А.Б. Обеззараживание воды электрическим током в теплообменных аппаратах……..... 20
Гончарова Л.К., Тарынина А.Э., Гончаров Ю.А. Современное состояние технологий водоподготовки на тепловых электростанциях…….. 23
Купцова И.Г. , Пугачёв А.С.Особенности эксплуатации установки обратного осмоса на Волгоградской ТЭЦ-2……..... 25
Курочкин А.С., Курочкин С.А., Суббота С.А., Осадчий В.Л. Метод сверхглубокой очистки диэлектрических жидкостей как способ повышения эффективности и надежности работы энергообъектов России……... 27
Муртазинов Р.Р. Опыт эксплуатации мембранной водоподготовительной установки…… 29
Одоевцева М.В., Петерс Е.Н., Мазин Г.С., Ракова И.В. Обучающе-контролирующая система подготовки сотрудников химических цехов ТЭС……..... 32
Фомичёв В.Т., Поляков С.В., Остроухов С.Б. Новые технологии в интенсификации воздействия на пласт для повышения нефтеотдачи…….. 36
Чичирова Н.Д., Чичиров А.А., Филимонов А.Г., Грифанов А.А., Власов С.М. Схемные решения и современные технологии создания систем водопользования на объектах энергетики…….. 40
Голованчиков А.Б, Шагарова А.А., Шапошников А.П., Тарасенко Л.Е. Экструдер для получения гранул……... 45

Секция № 2

Машиностроение, металлургическая промышленность

Апкарян А.Г., Шевчук В.П. Методика поверки виртуальных приборов и систем…… 47
Баркова Н.В., Агринская С.А. Моделирование переходных процессов в закалочной печи..... 50
Бирюкова С.С., Агринская С.А. Моделирование переходных процессов в печи с шагающими балками……..... 54
Болдырев И.А., Пузиков Б.С. Управление солнечными коллекторами при наличии тепловых потерь в магистралях теплоносителя……. 57
Гайдержий Д.С., Шевчук В.П. Адаптивное управление эффективностью работы энергоблока… 60
Капля Е.В. Горизонтально-осевое ветроколесо с варьируемыми характеристиками…... 64
Капля Е.В. Анализ зависимости продолжительности простоя ротора двигателя постоянного тока от длины отрезка терминального управления сервоприводом…….. 67

Мокичева Ю.В, Кузнецов А.А. Моделирование процессов управления микроклиматом теплицы…….. 72
Мокичева Ю.В., Стружинская Ю.А. Анализ адаптивной системы управления эндогазогенератором……..... 76
Шаровина С.О., Шевчук В.П. Способ автоматического управления температурным профилем теплотехнического объекта…… 79
Грошев А.И., Васильева И.Л., Реснянская А.А. О конструктивных особенностях процесса разливки стали в литейном производстве…….. 83

Секция № 3

Теплоэнергетика

Иваницкий М.С., Грига А.Д., Васильева Ю.В. Механизмы образования бенз(а)пирена при сжигании топлива в топках энергетических котлов…….. 88
Криуля А.О., Гриценко А.Н. Утилизация теплоты вентиляционных выбросов в спортивном комплексе с бассейном……. 91
Гришин С.С. Моделирование мембранных процессов фильтрования…… 94
Иваницкий М.С., Грига А.Д., Васильева Ю.В. Конверсия продуктов неполного сгорания по газовому тракту котла ……..... 97
Котовский В.А. Сбор и возврат конденсата…….. 101
Мантуленко А.А., Горчаков А.М. Комбинированная система теплоснабжения тепличного хозяйства…… 103
Султанов М.М., Перевозчиков Ю.И., Осипова С.С. Выбор варианта расчета теплогидравлических режимов сложных систем тепловых сетей……... 105
Фомичева Ю.И., Горчаков А.М., Гриценко А.Н. Эффективная система обогрева футбольного поля……..... 107
Шамигулов П.В., Замятина Д.А. Моделирование процессов оптимального управления теплоэнергетическими объектами…….. 111
Ломиворотов М.М., Шевцова С.Б. Теплоэнергетика как форма мышления…… 115

Секция № 4

Электроэнергетика

Арванитаки Н.В., Коптелова И.А. Моделирование процессов принятия решений в задачах повышения энергоэффективности промышленных предприятий…….. 119
Шилин А.А., Артюшенко Н.С. Анализ методических погрешностей приборов для определения мест повреждения линий электропередачи……... 123
Шилин А.Н., Мадаров А.Б. Моделирование процесса тепловизионного контроля в энергетике… 128
Шилин А.Н., Нгуен Ф.Т., Ле Ф.С. Компьютерное моделирование электромагнитного поля проводов линии электропередачи……..... 138
Макартичян С.В., Шилин А.Н., Орешонков А.А. Математическое моделтрование процессов передачи энергии в тепловых сетях……..... 145
Коптелова И.А., Проскуряков С.С. Алгоритмы выбора оптимальной топологической схемы электрической сети по критерию надежности……..... 147
Шилин А.Н., Стрижиченко А.В. Численное моделирование процесса сушки древесины..... 152
Коптелова И.А., Шалыгина М.М. Алгоритм выбора оптимальной топологической схемы электрической сети по критерию пропускной способности……. 155
Арванитаки Н.В., Петренко А.Р. Анализ применения микроГЭС для частных домовладений…….. 159
Васильева И.Л., Арванитаки Н.В., Стрижиченко А.В. Вопросы энергоэффективности процесса сушки древесины…….. 165

РЕСУРСОЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ
И ЭКОЛОГО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ГОРОДОВ

ЧЕТВЕРТАЯ ВСЕРОССИЙСКАЯ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

г. Волжский
25 – 28 сентября 2012 г.

СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ КОНФЕРЕНЦИИ

Редактор *Юрина В.В.*
Корректор *Сильникова Е.Г.*

Подписано в печать 10.01.2013. Формат $60\times90_{1/16}$.
Печать ризографическая. Усл. печ. л. 12,8.
Тираж 100 экз. Заказ № 424.

Издатель Филиал МЭИ в г. Волжском
404110, г. Волжский, пр. Ленина, 69.
Отпечатано Филиал МЭИ в г. Волжском
404110, г. Волжский, пр. Ленина, 69.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И СОЗДАНИЕ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ

МЕЖРЕГИОНАЛЬНАЯ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

г. Волжский
24 – 27 сентября 2013 г.

Сборник материалов конференции

Редактор *Юрина В.В.*
Корректор *Сильникова Е.Г.*

Подписано в печать 10.11.2013. Формат $60\times90_{1/16}$.
Печать ризографическая. Усл. печ. л. 10,4.
Тираж 100 экз. Заказ № 442.

Издатель Филиал МЭИ в г. Волжском
404110, г. Волжский, пр. Ленина, 69.
Отпечатано Филиал МЭИ в г. Волжском
404110, г. Волжский, пр. Ленина, 69.