

Федеральное агентство по образованию

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Ивановский государственный энергетический университет
имени В.И. Ленина»

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ЭНЕРГОСИСТЕМ

ТРУДЫ ИГЭУ

Выпуск IX

Под редакцией

*доктора технических наук, профессора В.А. Шуина,
доктора технических наук, профессора М.Ш. Мисриханова,
доктора технических наук, профессора А.В. Мошкарина*

Москва 2009

УДК 621.311

ББК 31.37

П 42

Повышение эффективности работы энергосистем: Тр. ИГЭУ. Вып. IX / Под ред. В.А. Шуина, М.Ш. Мисриханова, А.В. Мошкарин. – М.: Энергоатомиздат, 2009. – 572 с.

ISBN 978-5-283-03312-9

Редакционная коллегия:

д-р техн. наук, проф. С.В. Тарарькин,
д-р техн. наук, проф. Б.М. Ларин, д-р техн. наук, проф. М.Ш. Мисриханов,
д-р техн. наук, проф. А.В. Мошкарин, д-р техн. наук, проф. В.Н. Нуждин,
д-р техн. наук, проф. В.А. Савельев, д-р техн. наук, проф. В.А. Строев,
д-р техн. наук, проф. В.А. Шуин, д-р техн. наук, проф. А.В. Шунтов

Рецензенты:

д-р техн. наук, В.Г. Наровлянский (ОАО «Институт Энергосетьпроект», г. Москва);

д-р техн. наук, проф. А.В. Шунтов (Информационно-вычислительный центр Мосэнерго);

д-р техн. наук, проф. Ю.А. Митькин (ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»)

В предлагаемой читателю книге представлены статьи, являющиеся результатами разработок, теоретических и экспериментальных исследований в области теплоэнергетики, электроэнергетики, систем управления и автоматизации, компьютерных технологий, выполненных сотрудниками Ивановского государственного энергетического университета, МЭС Центра ОАО «ФСК ЕЭС», а также других вузов, научно-исследовательских, проектных и эксплуатационных организаций.

Книга предназначена для специалистов, занимающихся исследованием, разработкой, проектированием и эксплуатацией энергетических систем, электрических станций и сетей, комплексов и устройств их автоматического управления.

ISBN 978-5-283-03312-9

© Авторы, 2009

УДК 621.184

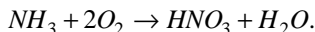
**БАКТЕРИАЛЬНЫЕ НАРУШЕНИЯ ВОДОПОДГОТОВКИ
И МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ВОДЫ**

*В.Н. Виноградов, канд. техн. наук, А.В. Горбунов, канд. мед. наук,
В.К. Аван, асп.*

При проектировании и в практике эксплуатации водоподготовительных установок теплоэнергетических объектов необходим учет микробиологических процессов. Общеизвестна микробиологическая коррозия. Известно сероводородное заражение воды теплосети в результате жизнедеятельности сульфатредуцирующих бактерий. Менее известны случаи эксплуатационных затруднений и аварий, обусловленных бактериальными процессами в аппаратах и трубопроводах водоподготовительных установок.

В декарбонизаторах и трубопроводах декарбонизированной и натрий-катионированной на фильтрах второй ступени воды (в схемах водоподготовки $H_2 - H_{\text{свф}} - D$ и $H/Na_I - D - Na_{II}$) возможна жизнедеятельность нитрифицирующих бактерий. Эти бактерии развиваются в аэробных условиях в воде, содержащей аммиак или аммонийные соли даже в небольших количествах. Первой стадией процесса нитрификации является образование нитритов бактериями *Nitrosomonas*, *Nitrosoglea* и др. На второй стадии в результате деятельности бактерий *Nitrobacter microderma*, *Nitrocystis* и др. из нитритов образуются нитраты. Нитрифицирующие бактерии являются автотрофами. Они используют энергию окисления аммиака до нитритов и нитратов для восстановления неорганического углерода, источником которого являются диоксид углерода и гидрокарбонаты. Свободный кислород, растворенный в воде, используется бактериями для окисления азотсодержащих соединений. Для полного окисления 1 мг аммонийного азота необходимо 4,57 мг кислорода.

Итоговая реакция в упрощенном виде имеет вид



Эта реакция объясняет уменьшение рН воды и массовой концентрации растворенного в ней кислорода в системе, в которой существуют колонии бактерий. Жизнедеятельность нитрифицирующих бактерий обеспечивается при выполнении ряда условий:

– наличии в воде неорганического углерода для питания (присутствие в воде гидрокарбонатов и свободной углекислоты);

– наличии в воде свободного кислорода (во всяком случае, массовая концентрация кислорода в воде должна быть не менее $0,5 \text{ мг/дм}^3$. Полагают, что при изменении массовой концентрации кислорода от $0,1$ до $0,5 \text{ мг/дм}^3$ меняется направленность биохимических процессов от аэробных к анаэробным, и наоборот);

– небольшой концентрации органических веществ, так как они ингибируют жизнедеятельность автотрофных бактерий, ускоряя развитие гетеротрофных микроорганизмов;

– малом солесодержании при определенной температуре воды (большие массовые доли солей (от 5 до 10 % и выше) угнетают и вызывают гибель бактерий).

Нитрифицирующие бактерии жизнедеятельны в широком диапазоне рН воды (от 2 до 10). Для первой стадии, нитрификации, оптимальным значением рН₂₅ воды является 8,5, для второй стадии – от 8,3 до 9,3.

В соответствии с ПТЭ [1] нормируется содержание нитритов и нитратов в питательной воде паровых котлов. Причиной нормирования является язвенная нитритная (при всех значениях давлений в котле) и нитратная (при давлении котловой воды более 6 МПа) коррозия. Водоподготовительные установки котлов низких и средних давлений (например, ТЭС «Мустамяэ», г. Таллинн), а часто и котлов высоких давлений (9,8 МПа), не обеспечивают очистку воды от нитритов и нитратов. Именно поэтому зафиксированы аварийные остановки таких котлов, вызванные нитритной коррозией экранных труб.

Нитрифицирующие бактерии способны вызвать серьезные эксплуатационные затруднения и в системах оборотного охлаждения. Значение рН₂₅ оборотной охлаждающей воды ивановского хладокомбината при отсутствии антибактериальных мероприятий находилось в диапазоне от 2,7 до 3,0. Наблюдалась коррозия бетона градирни. При жесткости добавочной воды от 2,2 до $2,5 \text{ мг-экв/дм}^3$ жесткость охлаждающей воды установилась на уровне около 30 мг-экв/дм^3 , в стальных трубах теплообменника «аммиак – вода» не было отложений солей жесткости, но имелся слой оксидов железа (III) коррозионного происхождения толщиной не менее 1 мм. Этот слой в значительной мере затруднил теплопередачу и вызвал большой перерасход электроэнергии на теплоотвод от аммиачного контура.

Бактерии обусловили серьезные эксплуатационные затруднения на водоподготовительной установке Костромской ТЭЦ-2, снизив существенно срок службы ионитов. Аналогичная ситуация сложилась ранее

на Бийской ТЭЦ-1, где она была обусловлена активным размножением сине-зеленых микроорганизмов. В обоих случаях для подавления жизнедеятельности бактерий эффективным оказалось хлорирование воды. По нашему предположению, деструкция ионитов, потеря их обменной емкости связаны с выделением ферментов при гибели бактерий во время регенерации фильтров (кислотой – Н-катионитных фильтров и гидроксидом натрия – ОН-фильтров).

Проблемы водоподготовки, обусловленные жизнедеятельностью бактерий, требуют своего решения. Необходимо обобщение и анализ накопленного опыта, изучение бактериальных процессов с учетом того, что эксплуатационные затруднения могут быть вызваны продуктами жизнедеятельности бактерий (нитритами, нитратами, сероводородом, бугорками отложений и т.п.), в том числе, ферментами и непосредственно бактериями.

В график химического контроля необходимо ввести эпизодический, а в ряде случаев и оперативный контроль за деятельностью бактерий. Для этого можно использовать как прямые (микробиологический мониторинг), так и косвенные измерения, основанные на химическом определении продуктов жизнедеятельности бактерий. Необходима разработка при участии микробиологов соответствующих руководящих указаний.

Проблема чистой воды давно находится в поле зрения микробиологов различного профиля. Общеизвестно, что возможность самоочищения воды ограничена своеобразной биологической остаточностью, т.е. процесс самоочищения воды никогда не идет до конца и вода не становится стерильной.

Промышленная водоподготовка в первую очередь направлена на стандартизацию физико-химических характеристик. Следует, как показано выше, обращать внимание на биотическую составляющую воды. Оставшиеся в живых микроорганизмы способны размножаться в воде и после ее очистки с использованием большинства известных физических, химических, биологических и других способов. Интегральным показателем степени очистки воды от бактерий может служить широко известный и используемый показатель – общее количество микроорганизмов в определенном объеме воды – микробное число. Любое воздействие на биоценоз микроорганизмов воды ведет к изменению общего числа микроорганизмов, что быстро регистрируется. Количественно общее число микроорганизмов наиболее часто выражается через микробное число, которое определяет число микроорганизмов в 1 мл исследуемой воды.

Микробное число воды можно установить двумя основными способами:

– способом посева при выращивании микроорганизмов на плотной питательной среде;

– способом прямого подсчета количества микроорганизмов с помощью специальных камер и светового микроскопа.

При подготовке к проведению посева предварительно проводят ряд десятикратных разведений исследуемой воды. Для этого из исходного объема исследуемой воды стерильной стеклянной пипеткой берут пробу объемом 1 мл и переносят эту пробу в пробирку с 9 мл стерильной воды или физиологического раствора. Полученный объем воды тщательно перемешивают. Эту манипуляцию повторяют несколько раз до достижения необходимого конечного разведения (обычно 1:1000000 или более). При первичном исследовании воды, когда ее микробное число неизвестно, выполняют высевы по 0,1 мл после различных разведений пробы на поверхность подсушенной в условиях асептики среды (мясопептонный агар), разлитой в чашки Петри. Посев проводят минимум в двукратной повторности для каждого разведения. При переходе от одного разведения к другому при посеве меняют пипетки. Когда высев сделан, нанесенную пробу распределяют по поверхности мясопептонного агара стерильным стеклянным шпателем, а затем этим же шпателем втирают в него. При смене чашек, засеянных пробами, приготовленными путем разных разведений воды, шпатель следует менять или обжигать в пламени спиртовки или газа. После этого чашки помещают на инкубацию при температуре от 298 до 300 К. По окончании инкубации ведут подсчет количества бактерий и определяют микробное число воды.

Второй способ установления микробного числа – микроскопирование проб воды и подсчет числа микроорганизмов при различных разведениях – позволяет учесть совокупность всего бактериального населения. Но вместе с тем он не позволяет сразу сделать вывод о количестве жизнеспособных микроорганизмов, поскольку в поле зрения могут быть подсчитаны как живые, так и мертвые и покоящиеся клетки. Этот способ очень трудоемок, и затраты на измерение микробного числа этим способом несравнимы с его малой информативностью.

Определение микробного числа воды позволяет судить об антибактериальной эффективности водоподготовки. Например, данные табл. 1 свидетельствуют о наличии воздействия гидразина на изменение микробного числа воды в исследуемых производственных водах. Интересным является установление микробного числа исходной воды, для которой технологически оправдано биоцидное воздействие. Уменьшение микробного числа этой воды в 2,22 раза под воздействием гидразина в исследованной концентрации, на наш взгляд, происходит вследствие ингибирования части микроорганизмов, которые содержатся в исходной

воде. Однако другая часть микроорганизмов остается в живых и проходит далее по технологической цепочке водоподготовительной установки.

Таблица 1. Влияние гидразина при массовой доле 1 % на жизнеспособность водной микрофлоры (применительно к условиям водоподготовки Костромской ТЭЦ-2)

Производственная вода	Микробное число (оценка по подсчету КОЕ/мл)		Относительное изменение микробного числа при гидразинной обработке воды
	До воздействия гидразина	После воздействия гидразина	
Исходная вода	560 ± 7	252 ± 12	2,22
Осветленная вода	239 ± 68	231 ± 16	1,03
Обессоленная вода	177 ± 42	162 ± 20	1,09

Примечание. Данные табл. 1 получены В.А. Горбуновым

Данные по определению микробного числа показывают, что часть биоценоза после предочистки воды не подвержена воздействию со стороны гидразина. При этом обнаружено, что разнообразие бактериальных видов незначительно. Измеряя микробные числа, можно проверить антибактериальную эффективность химических реагентов и оптимизировать технологию биоцидной обработки воды, трубопроводов и оборудования водоподготовительных установок. Трудоемкость измерения микробных чисел обуславливает необходимость разработки косвенных методов контроля жизнедеятельности бактерий, основанных на определении веществ, либо участвующих в микробиологических процессах (в их числе, кислород), либо являющихся их продуктами.

Массовая концентрация кислорода в исходной воде водоподготовительных установок составляет от 6 до 8 мг/дм³. Несмотря на высокую антибактериальную эффективность осветлителей воды (эффект очистки воды от 96 до 99 %), коагулированные и известково-коагулированные воды содержат бактерии и питательные для них вещества. Бактерии поступают с воздухом в декарбонизируемую воду. Негативное воздействие микробиологических процессов в тракте водоподготовки отражено в п. 4.8.35 ПТЭ [1]. При реконструкции и строительстве новых водоподготовительных установок предусматривают антибактериальную обработку воды биоцидами окислительного (чаще всего, гипохлоритом натрия (ГХН)) и неокислительного действия или физико-химическую обработку воды, например ультрафиолетовое облучение. Для конкретных условий составляется режимная карта антибактериальной обработки воды. При ее составлении необходимо использовать доступный метод контроля.

Для контроля жизнедеятельности аэробных бактерий на водоподготовительных установках применим косвенный метод, основанный на определении массовой концентрации растворенного кислорода. Эту концентрацию следует определять после прекращения дозировки биоцида окислительного действия. Данный метод использован нами для оптимизации режима дозирования гипохлорита натрия на водоподготовительной установке теплосилового цеха ТСЦ ОАО «Северсталь» производительностью 1750 м³/ч. На этой установке вода проходит механическую очистку в напорных фильтрах, загруженных кварцевым песком, и противоточное умягчение в Na-катионитных фильтрах по технологии Schwebbett. Исходная вода загрязнена бактериальными и органическими соединениями (см. табл. 2).

Таблица 2. Результаты косвенного контроля эффективности антибактериальной обработки воды

Производственные воды	ТСЦ ОАО «Северсталь» (средняя скорость фильтрации воды в Na-фильтрах около 30 м/ч)		Ивановская ТЭЦ-1 (скорость фильтрации воды в Na ⁺ -, NH ₄ ⁺ -, Cl ⁻ -фильтрах от 3 до 6 м/ч)	
	Микробное число (оценка по подсчету КОЕ/мл)	Массовая концентрация кислорода, мг/дм ³	Микробное число	Массовая концентрация кислорода, мг/дм ³
Исходная вода	400 ± 10	7,6 ± 0,1	600 ± 8	7,5
Умягченная вода без обработки ГХН	240 ± 70	2,6 ± 0,1	300 ± 30	0,02
Умягченная вода после обработки исходной воды ГХН	150 ± 40	6,9 ± 0,1	–	–
То же при большей дозе ГХН	40 ± 10	7,4 ± 0,1	–	–

Окисляемость воды в течение года изменяется от 12 до 17 мг О₂/дм³. Присутствие органики и бактерий в воде приводит к загрязнению катионита и увеличению удельного расхода соли на его регенерацию. Для подавления жизнедеятельности бактерий имеется установка периодического пропорционального дозирования ГХН в исходную воду.

В табл. 2 представлены экспериментальные данные контроля эффективности антибактериальной обработки воды на водоподготовительных установках Ивановской ТЭЦ-1 и ТСЦ ОАО «Северсталь», работающих по схеме механической фильтрации и катионитного умягчения воды.

Данные табл. 2 подтверждают эффективность контроля за жизнедеятельностью бактерий в замкнутых системах по массовой концентрации кислорода в воде. Действительно, трубопроводы и оборудование указанных водоподготовительных установок защищено от коррозии изолирующими

химическими покрытиями. Тем самым расход кислорода в коррозионных процессах либо отсутствует, либо пренебрежимо мал. Основной причиной уменьшения содержания кислорода в воде являются биохимические процессы. Обработка воды гипохлоритом натрия подавляет жизнедеятельность бактерий и эти процессы, что обнаруживается как путем определения микробных чисел воды, так и массовых концентраций кислорода в ней.

Выводы

1. Контроль жизнедеятельности бактерий путем измерения микробных чисел рекомендуется для первичной (пуско-наладочной) проверки эффективности антибактериальных мероприятий.

2. Для оперативного косвенного контроля эффективности периодической антибактериальной обработки воды на водоподготовительных установках рекомендуется применение кислородометрии.

3. Целесообразна разработка руководящего документа, регламентирующего антибактериальную обработку воды на водоподготовительных установках ТЭС.

Библиографический список

1. РД **34.20.501-95**. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации / Мин-во топлива и энергетики РФ, РАО «ЕЭС России». – 15-е изд., перераб. и доп. – М.: СПО ОРГРЭС, 1996. – 288 с.

УДК 621.184

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СПОСОБОВ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОЧИСТКИ ВОДЫ НА ТЭС

В.Н. Виноградов, канд. техн. наук, Б.А. Смирнов, В.К. Аван, инженеры

Для большинства тепловых и атомных электрических станций России источником водоснабжения служат открытые водоемы: реки, озера, водохранилища. Их воды содержат грубодисперсные (взвешенные) вещества, коллоидные примеси и истинно-растворенные вещества. Оптимальные схемы водоподготовки содержат в своем составе специализирован-

ные функциональные узлы. И первым из этих узлов при обработке поверхностных вод является предварительная очистка (предочистка), обеспечивающая удаления из воды взвешенных и коллоидных веществ, ее обесцвечивание и частичную дезинфекцию. Ниже приводятся результаты сравнительного обследования предочисток различного типа водоподготовительных установок (ВПУ). Преимущества и недостатки схем установлены путем анализа данных энергетических обследований ТЭС.

На рис. 1 представлена упрощенная технологическая схема ВПУ с предварительной очисткой воды по технологии ультрафильтрации.

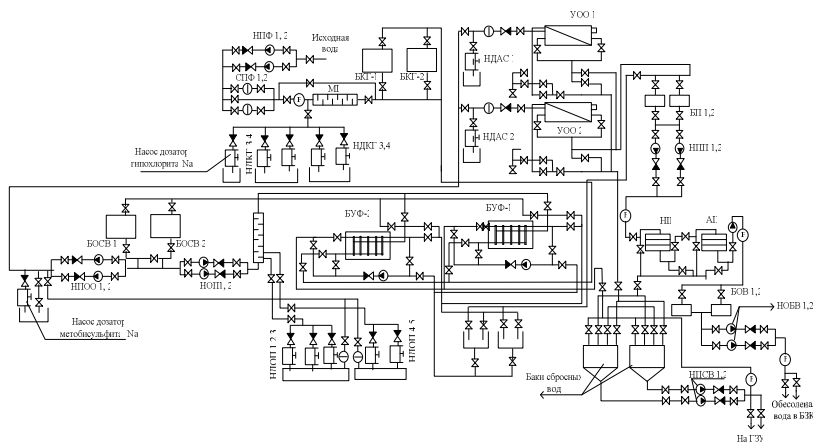


Рис. 1. Технологическая схема ВПУ с предварительной очисткой воды по технологии ультрафильтрации

Исходная вода, подогретая до температуры 20 – 25 °С, поступает на самопромывные фильтры ВПУ, где происходит ее механическая очистка от взвешенных веществ. После самопромывных фильтров в трубопровод дозируется коагулянт, и вода поступает в емкости для коагуляции и далее – на установку ультрафильтрации (УФУ) для ее окончательной очистки от взвешенных веществ, образовавшихся в результате коагуляции, затем в баки осветленной воды, из них – на установку обратного осмоса (УОО), в которой поток разделяется на пермеат и концентрат. Пермеат направляется в баки пермеата, а концентрат в баки концентрата. Из баков пермеат направляется на Н–ОН фильтры, где происходит его окончательное обессоливание, после чего обессоленная вода поступает в баки обессоленной воды, а после них – в баки запаса конденсата ТЭС.

Преимуществами схемы являются:

- компактность оборудования;
- полная автоматизация.

К недостаткам схемы можно отнести:

- большие стоки;
- невосполнимые потери воды на самопромывных фильтрах; воды, коагулянта и тепла на собственные нужды УФУ; реагента (антискаланта) и концентрата на УОО; воды и реагентов на регенерацию Н–ОН фильтров;
- увеличенный расход коагулянта на собственные нужды;
- водные промывки УФУ осуществляются осветленной водой, полученной при обработке исходной воды коагулянтом. Чем больше водных отмывок, тем больше расход коагулянта на собственные нужды;
- зависимость работы оборудования от степени загрязненности исходной воды взвешенными веществами.

Невосполнимые потери воды на собственные нужды для данной технологической схемы напрямую зависят от массовой концентрации взвешенных вещества. Увеличение в исходной воде этой концентрации пропорционально увеличивает количество промывок самопромывных фильтров и модулей УФУ.

Таким образом, зависимость работы установки от качества исходной воды сужает область эффективного применения данной технологической схемы. Такая схема может использоваться в России для обработки воды таких рек, как Енисей, Ангара (верховье), озер Имандра, Байкал. Малая минерализация вод этих источников уменьшает экономическую эффективность осмотической стадии схемы (рис. 1).

На рис. 2 приведена принципиальная технологическая схема ВПУ с предварительной очисткой воды известкованием и коагуляцией в осветлителях.

Исходная вода, подогретая до температуры 30 ± 1 °С, поступает в осветлитель, работающий по технологии обработки воды известкованием и коагуляцией, далее – в бак известково-коагулированной воды, оттуда на механические фильтры, Na-катионитные фильтры, УОО. Пермеат после УОО направляется на Н–ОН-фильтры и далее на подпитку котлов ТЭС, а концентрат (при условии закрытой теплосети) на подпитку теплосети.

Преимуществами схемы являются:

- умягчение воды на стадии предварительной очистки, снижение ионной нагрузки на Na-катионитные фильтры;

- минимальные стоки и возможность их утилизации;
- отсутствие зависимости принципиального технологического решения от степени загрязненности исходной воды взвешенными веществами.

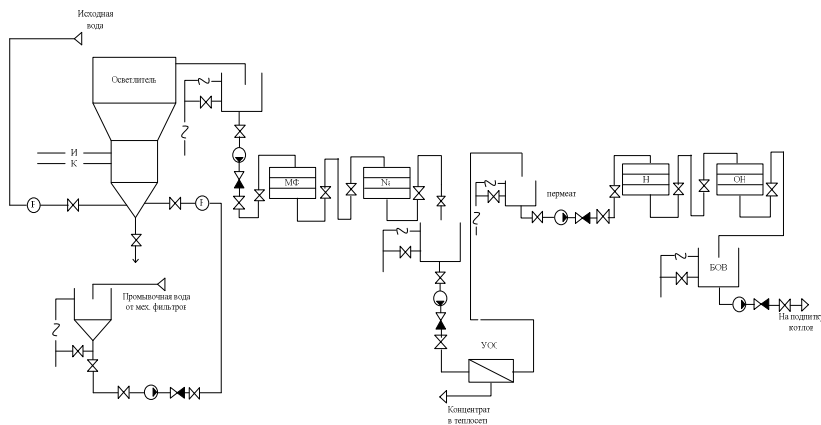


Рис. 2. Принципиальная технологическая схема ВПУ с предварительной очисткой воды извещкованием и коагуляцией в осветлителях

Недостатки схемы:

- наличие известкового хозяйства, плохо поддающегося автоматизации;
 - концентрат УОО пригоден для подпитки закрытой теплосети лишь при эффективной деаэрации подпиточной воды и при защите сетевой воды от аэрации;
 - зависимость работы оборудования от качества исходной воды.
- В качестве исходных рассматриваются воды с большими жесткостью и щелочностью, для которых наиболее применима технология известкования и коагуляции. По крайней мере, эта технология предпочтительнее рекомендована к использованию при общей щелочности исходной воды более 2 мг-экв/дм^3 .

Таким образом, зависимость работы установки от качества исходной воды сужает область применимости и данной технологической схемы. В России она применима для обработки поверхностных вод, которые имеют увеличенные жесткость и щелочность.

Представление о принципиальной технологической схеме ВПУ с предварительной очисткой воды коагуляцией в осветлителях и последующей ультрафильтрацией дает рис. 3.

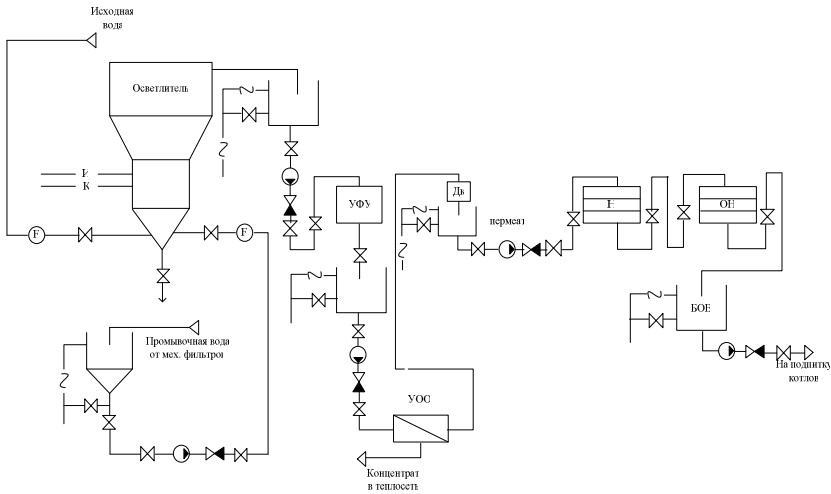


Рис. 3. Принципиальная технологическая схема ВПУ с предварительной очисткой воды коагуляцией в осветлителях и последующей ультрафильтрацией

Исходная вода, подогретая до температуры $25 \pm 1^\circ\text{C}$, поступает в осветлитель, работающий по технологии обработки воды коагуляцией и флокуляцией. В остальном технологическая схема повторяет схему, приведенную на рис. 1. Промывочные воды УФУ возвращаются в осветлитель. При налаженном режиме работы осветлителя массовая концентрация взвешенных веществ в коагулированной воде менее 2 мг/дм^3 . УФУ при данном качестве воды находится в идеальных условиях, причем реагенты в воду перед УФУ уже не дозируются.

Преимущества схемы:

- возможность автоматизации;
- малые стоки предочистки и возможность их утилизации;
- отсутствие зависимости принципиального технологического решения от загрязненности исходной воды взвешенными веществами.

Недостатком схемы (рис. 3) является то, что концентрат УОО пригоден только для системы гидравлического золоудаления.

Дозирование ингибиторов (антискалантов) перед УОО обусловлено необходимостью стабилизационной обработки воды для предотвращения закрепления отложений на мембранах. Вторичное использование концентрата в технологических схемах водоподготовки затруднено из-за наличия в нем ингибиторов. Иногда концентрат удается использовать в тех-

нологических схемах ТЭС. Известны схемы, где вместо ингибиторов используют подкисление.

Данная технологическая схема (рис. 3) довольно часто применима в России. Ее применимость можно обосновать технико-экономически, по сравнению со схемами, представленными на рис. 1, 2, и классическими схемами с предпочисткой в осветлителях и ионитным или термическим обессоливанием вод.

На ВПУ с предварительной очисткой воды путем ее прямоточной коагуляции, исходная вода, нагретая до температуры 28 ± 2 °С, поступает по трубопроводу в механические фильтры. В этот трубопровод перед статическим смесителем дозируется возможно ближе к механическим фильтрам пропорционально расходу исходной воды рабочий раствор коагулянта. Доза (массовая концентрация) коагулянта подбирается по условию проведения процесса контактной коагуляции на зернах неподвижной фильтрационной загрузки механических фильтров, что обеспечивает максимальное использование ее грязеемкости. Коагулированная вода направляется для дальнейшей обработки в последующие элементы технологической схемы.

К преимуществам схемы прямоточной коагуляции относятся:

- компактность предпочистки;
- необходимость и возможность автоматизации предпочистки, меньшие требования к точности регулирования нагрева исходной воды;
- уменьшение затрат коагулянта по сравнению с коагуляцией в осветлителях.

Недостатками схемы прямоточной коагуляции являются:

- увеличенный расход воды на собственные нужды механических фильтров;
- увеличенное количество механических фильтров (или корпусов механических фильтров);
- необходимость использования бака и насосов взрыхляющей промывки механических фильтров.

Прямоточная коагуляция применима для очистки поверхностных вод с небольшой окисляемостью воды, не требующих известкования, и для очистки вод на ВПУ, имеющих малый коэффициент использования установленной производительности. В последнем случае оборудование ВПУ, в том числе осветлители, большую часть времени простаивает в резерве. Частые пуски осветлителей затрудняют их эксплуатацию.

Примером потенциальной рациональности применения прямоточной коагуляции является Норильская ТЭЦ-2, использующая воду с малой

окисляемостью, увеличивающейся заметно, как и ее кремнесодержание, лишь в паводок. Таким образом, устройство реагентного узла и небольшого склада коагулянта рекомендуется к применению на данной ТЭЦ. В отсутствие коагуляции на этой ТЭЦ происходят нарушения требований ПТЭ к качеству питательной воды и паров по кремнесодержанию.

На ВПУ с предварительной очисткой воды путем ее коагуляции в осветлителе с микропеском (ОМП) исходная вода, нагретая до температуры 20 – 25 °С, поступает в камеру с взвешенным в вихревом слое тонкоизмельченным кварцевым песком (микропеском). Микропесок обеспечивает проведение интенсивной контактной коагуляции и быстрое осаждение ее продуктов.

ОМП допускает быстрое изменение гидравлической нагрузки и не требует точного регулирования температуры исходной воды. Технологическая эффективность осветлителя высока, затраты коагулянта для ОМП меньше, чем для типового осветлителя с взвешенным слоем шлама. Затраты микропеска невелики (до 3 г/м³ обработанной воды).

Недостатками осветлителя являются необходимость предварительной очистки воды самопромывными сетчатыми фильтрами, его потребность в микропеске, износ рабочих колес насосов рециркуляции микропеска и шламоудаления. ОМП нашли применение на зарубежных ВПУ. Один из них прошел успешные испытания в России.

Из вышеизложенного следует вывод, что наиболее предпочтительны комбинированные технологические схемы с применением осветлителей на стадии предочистки исходной воды.

При внедрении на ТЭС осветлителей старого поколения не всегда в достаточной степени принимали во внимание качество исходной воды. Система автоматизации этих осветлителей находилась на очень низком уровне. Поэтому осветлители в России снискали себе славу громоздких, плохо настраиваемых и сложных в эксплуатации аппаратов. Используя накопленный опыт, во ВТИ разработали рациональный способ реконструкции типовых осветлителей (рис. 4) в соответствии с ТУ ВТИ 37.001-2006.

Данные осветлители разработаны на основе корпусов прототипов, адаптированы к применяемым технологиям обработки воды, оборудованы так же, как все современные осветлители и отстойники, пластиковым сепарационным устройством, допускают увеличение единичной производительности до 30 %. Воздухоотделитель таких осветлителей имеет большую площадь раздела фаз «вода – воздух». Осветлители с автоматизацией дозирования реагентов внедрены на Первомайской ТЭЦ ТГК-4 и

Ачинском НПЗ. В стадии внедрения находятся осветлители ТЭЦ-22 «Мосэнерго» и Минской ТЭЦ-5.

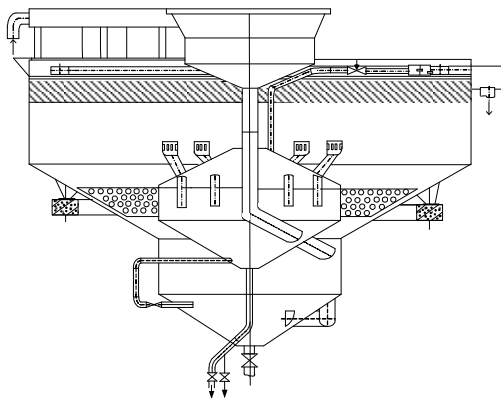


Рис. 4. Вариант реконструкции типовых осветлителей

При вводе в работу реконструированных осветлителей возможны затруднения, возникающие, если на стадии конструкторской разработки не учтены особенности состава примесей исходной воды и свойства применяемых реагентов. При этом необходимо учесть выделение свободной углекислоты при повышенной дозе коагулянта, наличие в воде ингибиторов образования твердой фазы, поверхностно-активных веществ. Действительно, при нагреве исходной воды в зимнем режиме от 1 до 25 °С из нее выделяется азота около 7,2 нсм³/дм³, кислорода – 4,2 нсм³/дм³. В то же время при дозировке сульфата алюминия 0,85 мг-экв/дм³ выделяется около 19 нсм³/дм³ свободной углекислоты, что почти в два раза превышает выделение воздуха и может вызвать флотацию шлама при дозировке коагулянта в осветлитель после воздухоотделителя. Некоторые поверхностно-активные соединения, присутствующие в сбросных водах, поступающих в водоемы, являются либо активными ингибиторами образования твердой фазы, либо флотореагентами. При их наличии в воде требуется увеличение доз коагулянтов и (или) флокулянтов. При недостаточной дозировке этих реагентов образуется мелкодисперсный неоседающий шлам и наблюдается его вынос из осветлителя.

На стадии разработки технико-коммерческого предложения по реконструкции существующей или строительству новой предочистки должны быть учтены рекомендации [1] и приняты во внимание изложен-

ные выше преимущества и недостатки предпочисток. Для конкретных условий данные характеристики предпочисток подлежат определению в натуральном и денежном выражениях.

Выводы

1. Техничко-экономически наиболее эффективна предпочистка воды с использованием осветлителей.
2. Для увеличения производительности и технологической эффективности существующих осветлителей рекомендуется их реконструкция по ТУ ВТИ 37.001-2006.
3. Технические решения по реконструкции осветлителя конкретизируются с учетом состава примесей воды и применяемых реагентов. Это, в частности, позволяет учесть кинетические характеристики химических реакций и осветлителя.

Библиографический список

1. **Нормы** технологического проектирования тепловых электрических станций. ВНТП 81 / Госстрой СССР. – М., 1981.

УДК 621.184

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОСВЕТИТЕЛЯ С РЕЦИРКУЛИРУЮЩИМ МИКРОПЕСКОМ

*В.Н. Виноградов, канд. техн. наук, А.В. Жадан,
О.В. Смирнов, В.К. Аван, инженеры*

Для ТЭС России актуальна проблема совершенствования технологии и выбора оборудования коагуляции воды. Она обусловлена необходимостью уменьшения затрат на водоприготовление и повышением требований к качеству обработанной воды. В частности, в связи с реконструкцией или расширением ТЭС становится возможной реконструкция водоподготовительной установки этой ТЭС и появляется необходимость выбора способа предварительной очистки воды.

Для предварительной очистки (предочистки) воды могут быть использованы различные способы. Самым распространенным из них

в «большой» энергетике является реагентная обработка воды в осветлителях. Для повышения ее эффективности и уменьшения затрат на водоподготовку следует обратить внимание на использование зернистых присадок к воде. В частности, при коагуляционной обработке воды эти присадки одновременно способствуют контактной коагуляции и сепарации образующегося шлама. Лабораторные опыты с такими присадками проводились в 70-е годы прошлого века в МЭИ, ВТИ, ИЭИ. Например, Б.М. Ларин с сотрудниками (ИЭИ) использовал порошки перлита различного фракционного состава и получал хорошие результаты. Наряду с перлитом дешевой присадкой является измельченный фракционированный кварцевый песок.

Выбор технологии и оборудования предочистки воды, в том числе, коагуляцией на основании ВНТП-81 (Норм технологического проектирования тепловых электрических станций, ВСН 29-81) должен быть основан на экспериментальной проверке или эксплуатационных данных, полученных в условиях возможного применения. Лучшие условия для проверки создаются при испытании промышленной «пилотной» установки.

Ниже представлены результаты проверки осветлителя горизонтального типа с номинальной производительностью 40 м³/ч (инициатор испытаний А.В. Жадан). Эти осветлители предназначены для проведения интенсивной контактной коагуляции воды с использованием взвешенного слоя микропеска. В осветлителе предусмотрена рециркуляция микропеска, обеспечивающая сокращение его эксплуатационных затрат.

В задачи испытаний входило определение следующих характеристик:

– эффективности коагуляции с применением следующих реагентов и их рабочих доз: сульфата алюминия; хлорида железа (III); комбинаций коагулянтов; флокулянтов неионогенного типа, катион- и анионоактивных;

– диапазона рабочих нагрузок осветлителя, соответствующих заданной эффективности коагуляции; возможности быстрых изменений его производительности;

– эксплуатационных затрат на коагуляцию воды применительно к ОАО «Северсталь».

В качестве критериев оценки эффективности коагуляции использованы:

– относительные уменьшения окисляемости воды, массовой концентрации соединений железа и кремниевой кислоты при коагуляции воды;

– массовые концентрации взвешенных веществ, соединений алюминия в коагулированной воде на выходе из осветлителя;

– опытные и планируемые эксплуатационные затраты микропеска, реагентов, воды, тепла, электроэнергии в натуральном и денежном выражении (с учетом затрат реагентов на стадии обессоливания воды, обусловленных дозировкой коагулянта).

В процессе испытаний использованы рабочие растворы реагентов: 18-водного гранулированного сульфата алюминия (производитель ЗАО «Синтез», г. Кострома); 6-водного сульфата железа (III) производства КНР; 6-водного хлорида железа (III) украинского производства. Для приготовления рабочих растворов реагентов и их дозировки использовано штатное оборудование осветлителя. Объем и периодичность химического контроля приведены в табл. 1.

Таблица 1. Объем и периодичность химического контроля

Наименования измеряемых параметров	Частота измерений
Оперативный контроль теплотехнических параметров	
Температура исходной воды	постоянно
Температура коагулированной воды	постоянно
Расход воды в осветлителе	постоянно
Расход суспензии по трубопроводу рециркуляции	постоянно
Расход шламовой воды после циклонов	через 3 ч
Давление на всасе насоса рециркуляции	постоянно
Давление на напоре насоса рециркуляции	постоянно
Давление перед циклонами	постоянно
Контроль качества исходной воды	
Щелочность общая, моль/дм ³	2 раза в сутки
Окисляемость, мгО ₂ /дм ³	2 раза в сутки
pH ₂₅	2 раза в сутки
Массовая концентрация соединений железа в пересчете на Fe, мг/дм ³	2 раза в сутки
Массовая концентрация взвешенных веществ, мг/дм ³	2 раза в сутки
Мутность, мг/дм ³	2 раза в сутки
Массовая концентрация соединений алюминия в пересчете на Al, мг/дм ³ (только при коагуляции солями алюминия)	2 раза в сутки
Массовая концентрация реакционноспособных соединений кремниевой кислоты в пересчете на SiO ₂ , мг/дм ³	2 раза в сутки
Контроль качества коагулированной воды	
Щелочность общая, моль/дм ³	через 2 ч
pH ₂₅	через 2 ч
Окисляемость, мгО ₂ /дм ³	через 3 ч
Массовая концентрация соединений железа в пересчете на Fe, мг/дм ³	через 3 ч
Массовая концентрация взвешенных веществ, мг/дм ³	через 4 ч
Мутность, мг/дм ³	через 2 ч
Массовая концентрация соединений алюминия в пересчете на Al, мг/дм ³ (только при коагуляции солями алюминия)	через 3 ч
Массовая концентрация реакционноспособных соединений кремниевой кислоты в пересчете на SiO ₂ , мг/дм ³	через 3 ч

Проводился контроль массовых долей коагулянтов после приготовления их рабочих растворов, контроль уровней рабочих растворов коагулянтов и флокулянтов в баках-мерниках (в расходных баках), контроль объемных подач насосов-дозаторов этих растворов. Фактические дозы (массовые концентрации в воде) коагулянтов измерялись каждые 2 ч. В испытаниях использованы штатные приборы осветлителя для измерений следующих параметров:

- расходов воды в осветлитель, на выходе из него, расхода рециркулирующей суспензии;
- давления воды на всасе и напоре насосов коагулированной воды и суспензии, давления суспензии перед гидроциклонами;
- мутности.

Измерения расхода зашламленной воды после гидроциклона выполняли периодически с использованием объемного метода с применением мерного сосуда и секундомера.

Измерения показателей качества воды выполнялись с использованием следующих методов:

- ацидиметрии (СО 153-34.37.523.7-88) – щелочность;
- потенциометрии (ИСО 10523 или по ПНД 14.1:2:3:4.121-97) – рН₂₅;
- перманганатометрии (СО 153-34.37.523.10-88) – окисляемость;
- гравиметрии (ОСТ 34-70-953.13-90) – массовая концентрация взвешенных веществ;
- фотоколориметрии (ОСТ 34.70.958.4-88) – массовая концентрация соединений железа в пересчете на Fe;
- фотоколориметрии (СО 153-34.37.523.11-90) – массовая концентрация соединений алюминия в пересчете на Al;
- фотоколориметрии (ОСТ 34.70.958.6-88) – массовая концентрация реакционноспособных соединений кремниевой кислоты в пересчете на SiO₂.

Для уточнения фактических доз коагулянта в каждом опыте выполнены дополнительно два измерения массовой концентрации сульфатов (фотоколориметрия по ОСТ 34.70.953.20-91) или хлоридов (объемная меркуриметрия по ОСТ 34.70.953.16-90) в исходной и коагулированной водах.

Пропорциональное расходу исходной воды дозирование реагентов выполнялось в автоматическом режиме.

В качестве исходной воды использована подогретая вода реки Шексна (г. Череповец). Предварительно в лабораторных опытах выбраны подходящие флокулянты и дозы (массовые концентрации) коагулянтов.

В ходе испытаний поддерживались относительные значения расхода рециркулирующей зашламленной воды с микропеском около 2,8 %, непрерывной продувки осветлителя 2,4 % от расхода коагулированной воды.

Лабораторная оценка загрязнения воды соединениями кремниевой кислоты при ее контакте с вихревым слоем песка в течение времени пребывания воды в контактной зоне осветлителя выполнена с использованием обессоленной воды. Она показала, что это загрязнение при контакте со свежим микропеском не превышает $0,5 \text{ мг/дм}^3$ и практически незначимо.

В табл. 2, 3 представлены некоторые результаты испытаний осветлителя с использованием в качестве коагулянта водного раствора гранулированного сульфата алюминия и флокулянта АН 905 (фирма SNF). На основании этих данных можно заключить следующее:

– производительность осветлителя практически не влияет на эффективность очистки воды;

– мутность коагулированной воды и массовая концентрация в ней взвешенных веществ значительно меньше 1 мг/дм^3 . Это позволяет надеяться на малый расход воды на собственные нужды механических фильтров, устанавливаемых после осветлителя, и допустить их эксплуатацию с высокими скоростями фильтрации;

– массовая концентрация соединений кремниевой кислоты в коагулированной воде меньше, чем в исходной воде. Это означает, что, несмотря на частичный переход этих соединений в воду при ее контакте с кварцевым песком, преобладает не загрязнение воды такими соединениями, а их переход в шлам;

– при предочистке воды реки Шексна коагуляцией для ее обессоливания противоточными ионитными фильтрами или мембранными установками необходимые условия создаются при дозе (массовой концентрации в воде) сульфата алюминия в пересчете на Al^{3+} около $7,2 \text{ мг/дм}^3$ ($0,80 \text{ мг-экв/дм}^3$). При этой и больших дозах данного коагулянта массовая концентрация соединений железа в коагулированной воде в пересчете на Fe не превышает $0,1 \text{ мг/дм}^3$, а массовая концентрация соединений алюминия в пересчете на Al практически равна или менее $0,1 \text{ мг/дм}^3$. Окисляемость коагулированной воды в данных условиях в пределах погрешности химического анализа не отличается от $3 \text{ мг O}_2/\text{дм}^3$. Массовая концентрация взвешенных веществ и мутность коагулированной воды – менее 1 мг/дм^3 . Таким образом, коагулированная вода соответствует основным требованиям к качеству исходной воды установок химического обессоливания.

Выполнены опыты со ступенчатым увеличением производительности осветлителя от 30 до $55 \text{ м}^3/\text{ч}$. Наблюдения за качеством коагулированной воды показали сохранение в переходном процессе ее высокого качества.

Таблица 2. Результаты испытаний осветлителя с кварцевым микропеском (коагулянт – сульфат алюминия, флокулянт – АН 905)

Доза коагулянта, мг/дм ³	Доза флокулянта, мг/дм ³	Расход воды, м ³ /ч	Щелочность, мг-экв/дм ³		Перманганатная окисляемость, мг/дм ³		рН ₂₅	
			Исходная вода	Коагулированная вода	Исходная вода	Коагулированная вода	Исходная вода	Коагулированная вода
3	0,3	30	1,25	1	14,4	11,2	6,83	6,75
4,05	0,3	20	1,75	1	12	4	7,63	6,52
4,05	0,3	30	1,7	1	12	6,4	7,63	6,5
4,05	0,3	40	1,6	1	11,2	4,8	7,63	6,57
4,05	0,3	50	1,65	1	14,8	4,4	7,63	6,44
5	0,3	20	1,4	1	11,2	9,6	7,08	6,8
5	0,3	35	1,5	1,1	14,4	12,8	7,08	6,72
5	0,3	50	1,5	1,05	11,2	8	7,08	6,68
5	0,3	30	1,3	0,6	13,6	3,2	6,79	6,05
6	0,3	30	1,6	0,95	13,6	6,4	7,45	6,51
6,5	0,3	30	1,65	0,9	13,6	5,6	7,45	6,55
7	0,3	30	1,8	1	12,8	4,4	7,14	6,39
7	0,3	30	1,65	0,9	15,2	5,6	7,45	6,52
7	0,3	55	1,95	1	13,6	5,6	7,14	6,42
7	0,3	30	1,75	1	13,6	5,6	7,14	6,47
7	0,3	50	1,9	1	13,6	4,8	7,14	6,4
7,65	0,3	20	1,6	0,75	12,8	4	7,5	6,22
7,65	0,3	20	1,6	0,7	13,6	3,2	7,5	6,16
7,65	0,3	30	1,6	0,7	13,6	3,2	7,5	6,29
7,65	0,3	40	1,55	0,65	12,8	1,6	7,5	6,19
8,5	0,2	30	1,7	0,85	12	5,6	7,35	6,22
8,5	0,3	30	1,75	0,85	12,8	2,4	7,35	6,41
10	0,2	30	1,7	0,65	12,8	4,8	7,35	6,58
10	0,3	30	1,7	0,65	12,8	3,2	7,35	6,22
13	0,2	30	1,65	0,45	14,4	3,2	7,35	5,9
13	0,3	30	1,7	0,4	12	3,2	7,35	5,75

Таблица 3. Результаты испытаний осветлителя с кварцевым микропеском (коагулянт – сульфат алюминия, флокулянт – АН 905)

Доза коагулянта, мг/дм ³	Доза флокулянта, мг/дм ³	Расход воды, м ³ /ч	Fe, мг/дм ³		Мутность, мг/дм ³	Al, мг/дм ³		SiO ₂ , мг/дм ³	
			Исходная вода	Коагулированная вода		Исходная вода	Коагулированная вода	Исходная вода	Коагулированная вода
3	0,3	30	0,82	0,31	2,2	–	–	0,72	0,67
4,05	0,3	20	1,06	0,25	1,94	–	–	0,8	0,7
4,05	0,3	30	1,06	0,34	1,86	–	–	0,79	0,72
4,05	0,3	40	1,07	0,37	1,68	–	–	0,84	0,74
4,05	0,3	50	1,07	0,1	1,34	–	–	0,85	0,72
5	0,3	20	0,93	0,51	2,88	–	–	0,72	0,65
5	0,3	35	0,93	0,3	3,38	–	–	0,77	0,25
5	0,3	50	0,7	0,38	3,58	–	–	0,8	0,72
5	0,3	30	0,82	0,37	0,94	–	–	0,75	0,59
6	0,3	30	1,29	0,185	1,11	0,04	0,135	0,91	0,82
6,5	0,3	30	1,29	0,2	0,84	0,038	0,125	0,89	0,82

Продолжение табл. 3

Доза коагулянта, мг/дм ³	Доза флокулянта, мг/дм ³	Расход воды м ³ /ч	Fe, мг/дм ³		Мутность, мг/дм ³	Al, мг/дм ³		SiO ₂ , мг/дм ³	
			Исходная вода	Коагулированная вода		Исходная вода	Коагулированная вода	Исходная вода	Коагулированная вода
7	0,3	30	1,18	0,085	0,9	0,04	0,105	1,15	0,93
7	0,3	30	1,29	0,09	0,65	0,04	0,115	0,89	0,82
7	0,3	55	1,18	0,09	0,57	0,042	0,0975	0,99	0,89
7	0,3	30	0,95	0,08	0,51	0,0325	0,0975	0,97	0,93
7	0,3	50	0,95	0,1	0,47	0,0425	0,09	0,93	0,91
7,65	0,3	20	0,91	0,09	0,75	0,05	0,12	0,89	0,76
7,65	0,3	20	0,7	0,14	0,52	0,04	0,107	0,85	0,72
7,65	0,3	30	0,91	0,08	0,53	0,042	0,115	0,86	0,77
7,65	0,3	40	0,7	0,14	0,64	0,04	0,107	0,8	0,65
8,5	0,2	30	0,712	0,01	0,51	0,037	0,092	0,97	0,93
8,5	0,3	30	0,712	0,095	0,55	0,04	0,092	0,95	0,93
10	0,2	30	0,712	0,05	0,47	0,04	0,107	0,99	0,89
10	0,3	30	0,712	0,05	0,406	0,042	0,097	0,95	0,89
13	0,2	30	0,82	0,05	0,704	0,035	0,112	0,95	0,85
13	0,3	30	0,82	0,057	0,487	0,04	0,12	0,95	0,91

Выводы

1. Загрязнение воды в осветлителе соединениями кремниевой кислоты при ее контакте с микропеском практически незначимо.
2. Осветлитель с рециркулирующим кварцевым микропеском является эффективным аппаратом для предочистки воды коагуляцией. Качество коагулированной воды соответствует требованиям к качеству исходной воды современных обессоливающих установок.

УДК 621.187.11

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОТИВОТОЧНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ИОНИРОВАНИЯ ВОДЫ С ПОВЫШЕННЫМ СОДЕРЖАНИЕМ ОРГАНИЧЕСКИХ ПРИМЕСЕЙ

А.Б. Ларин, канд. техн. наук., А.В. Колегов, инж.

Исследования проводились на промышленной установке ТЭЦ-ПВС ОАО «Северсталь» (г. Череповец) и в лаборатории кафедры ХХТЭ ИГЭУ в целях оценки состояния технологии и ионитов после выработки 150000 м³ обессоленной воды.

Водоподготовительная установка (ВПУ) фирмы Chriwa, установленная в химическом отделении ТЭЦ-ПВС, предназначена для приготовления воды для подпитки паровых котлов, номинальной производительностью 340 м³/ч.

Обработка воды производится поэтапно:

- 1) окислительная обработка;
- 2) коагуляция и осветление в тонкослойных осветлителях;
- 3) осветление (очистка воды от механических примесей) в напорных механических фильтрах;
- 4) одноступенчатое обессоливание осветленной воды на блоке двухкамерных противоточных Н- и ОН-ионитных фильтров.

Исходная вода нагревается в теплообменниках исходной воды до температуры $(22,0 \pm 3,0)$ °С и под давлением $(4,0 \pm 3,0)$ бар, $(0,4 \pm 0,3)$ МПа подается по двум трубопроводам в два осветлителя.

В объединенный поток с обоих трубопроводов вводится рабочий раствор гипохлорита натрия NaOCl, смеси коагулянтов сульфата железа III Fe₂(SO₄)₃ и сульфата алюминия Al₂(SO₄)₃.

Осветление происходит методом осаждения в двух горизонтальных осветлителях максимальной объемной производительностью 300 м³/ч каждый.

Осветленная вода после механических фильтров направляется на блок обессоливания, состоящий из Н-катионитного и ОН-анионитного фильтров. Установлено три блока, из которых только один находится в работе, два – в резерве. Регенерация Н-катионитных фильтров производится раствором серной кислоты, ОН-анионитных фильтров – раствором едкого натра.

Обессоленная вода подается в три бака обессоленной воды вместимостью 400 м³ каждый.

Химическое обессоливание воды производится по схеме одноступенчатого противоточного Н- и ОН-ионирования Shwebbett с блочным включением фильтров. На ВПУ имеются три блока фильтров обессоливания воды (далее – блоки фильтров) максимальной объемной производительностью 500 м³/ч. В состав каждого блока входят Н-катионитный и ОН-анионитный фильтры (ионитные фильтры).

Особенностью ионитных фильтров является то, что они выполнены в виде двухкамерных цилиндрических сосудов с верхним и нижним сферическими днищами (рис. 1).

Нижнее, среднее и верхнее дренажно-распределительные устройства выполнены в виде «ложного» дна с пластмассовыми колпачками.

В качестве фильтрующего материала в нижней камере Н-катионитного фильтра используется карбоксильный катионит марки рFC-104 с высотой загрузки 550 мм. В верхней камере – сильнокислотный катионит рFC-100 Н+ с высотой загрузки 1410 мм.

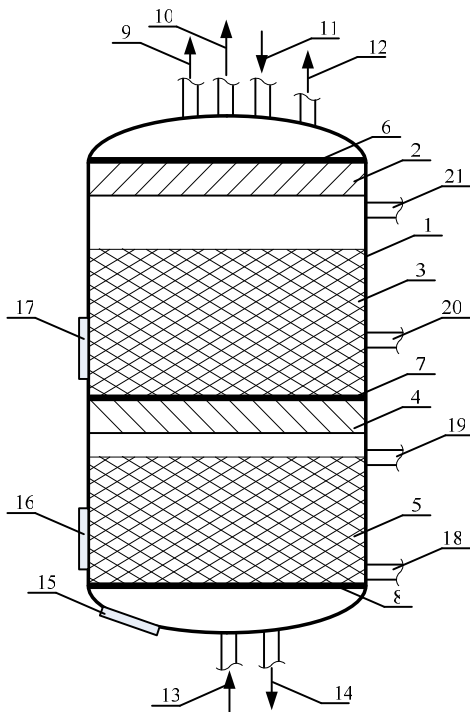


Рис. 1. Принципиальная схема ионитного фильтра: 1 – корпус фильтра; 2 – слой инертного материала верхней камеры; 3 – фильтрующий материал верхней камеры; 4 – слой инертного материала нижней камеры; 5 – фильтрующий материал нижней камеры; 6 – верхняя дренажная система типа «ложное дно» с фильтрующими колпачками; 7 – средняя дренажная система типа «ложное дно» с фильтрующими колпачками; 8 – нижняя дренажная система типа «ложное дно» с фильтрующими колпачками; 9 – выход сбросных вод при загрузке ионита; 10 – выход обработанной воды; 11 – вход регенерационного раствора; 12 – воздушник; 13 – вход обрабатываемой воды; 14 – сброс отработанного регенерационного раствора; 15 – люк для осмотра и ремонта нижней дренажной системы; 16 – люк для осмотра и ремонта средней и нижней дренажной системы; 17 – люк для осмотра и ремонта средней и верхней дренажной системы; 18 – выгрузка фильтрующего материала из нижней камеры; 19 – загрузка фильтрующего материала в нижнюю камеру; 20 – выгрузка фильтрующего материала из верхней камеры; 21 – загрузка фильтрующего материала в верхнюю камеру

В качестве фильтрующего материала в нижней камере ОН-анионитного фильтра используется слабоосновной анионит марки рFA-847 с высотой загрузки 725 мм. В верхней камере – сильноосновной анионит рFA- 400 ОН с высотой загрузки 2330 мм.

Ионитные фильтры являются противоточными. Движение осветленной воды через такой фильтр при ее обессоливании проводится в восходящем потоке. Регенерация фильтров производится нисходящими потоками регенерационных растворов.

В связи с тем, что в процессе промышленной эксплуатации наблюдается повышенный удельный расход H_2SO_4 на регенерацию катионитов [1] ($q'_{H_2SO_4} = 3,19$ г-эquiv/г-эquiv), по сравнению с нормативным для противоточной технологии ионирования ($q'_{H_2SO_4} = 1,5 - 2$ г-эquiv/г-эquiv), снижение суммарной обменной емкости анионитов: $\Sigma E_p^{An} = 707,24$ г-эquiv/м³ ($\Sigma E_p^{An} = 1000$ г-эquiv/м³ – по сертификатам на аниониты Purolite) и снижение суммарной обменной емкости катионитов: $\Sigma E_p^{Kt} = 699,5$ г-эquiv/м³ ($\Sigma E_p^{Kt} = 1200$ г-эquiv/м³ – по сертификатам на катиониты Purolite) принято решение провести ряд лабораторных испытаний на ионитах компании Purolite.

Цель исследований – определение выходных кривых ионирования и обменных емкостей ионитов в условиях противоточной технологии Shwebbett после выработки 150000 м³ обессоленной воды при обработке маломинерализованных природных вод с $Ok > 5$ мг/дм³, восстановление рабочих обменных емкостей ионитов, снижение удельных расходов реагентов, совершенствование технологии ионного обмена.

Описание лабораторной установки. Фильтрация исходной (водопроводной) воды проводилась «снизу-вверх», регенерация и отмывка ионитов «сверху-вниз». Схема установки процесса химического обессоливания воды приведена на рис. 2.

К средствам автоматического химического контроля относятся кондуктометр КАЦ-026, установленный после ступени Н-катионирования, кондуктометр КЦО-018 и рН-метр, установленные на выходе обессоленной воды.

Анализ расхождения показаний кондуктометров проводился на обессоленной воде с электропроводностью менее 1 мкСм/см (КАЦ-026 – $\chi = 0,96$ мкСм/см, КЦО-018 – $\chi = 0,84$ мкСм/см). Расхождение показаний кондуктометров составило 0,12 мкСм/см.

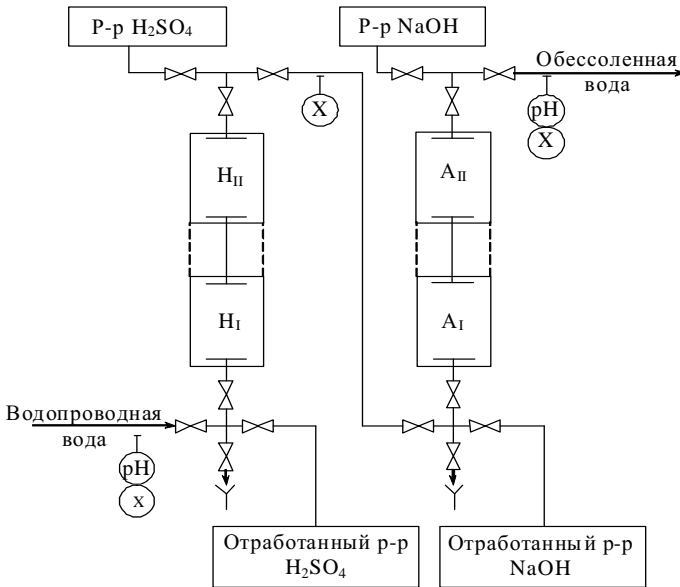


Рис. 2. Схема лабораторной установки: H_I – слабокислотный катионит рFC-104; H_{II} – сильнокислотный катионит рFC-100; A_I – слабоосновной анионит рFA-847; A_{II} – сильноосновной анионит рFA-400

Физико-химические условия моделирования и принятая схема соответствуют технологии химического обессоливания новой ВПУ ТЭЦ-ПВС ОАО «Северсталь», выполненной по проекту фирмы Chriwa.

Было проведено четыре серии опытов:

- 1) в условиях моделирующих работу ионитов на ХВО ТЭЦ-ПВС;
- 2) после восстановления ионитов специальной регенерацией с предварительной отмывкой анионита кислотой [2];
- 3) после замены анионитов рFA-847 и рFA-400 на новые (свежие) в тех же объемах;
- 4) после увеличения объема загрузки слабокислотного катионита рFC-104 (с 37,5 до 60 мл) и установки декарбонизатора между HR и ROH.

По результатам обработки опытных данных были построены следующие графические зависимости: удельной электропроводности H-катионированной воды от объема фильтрата (рис. 3); удельной электропроводности обессоленной воды от объема фильтрата (рис. 4); суммарной рабочей обменной емкости катионитов по сериям опытов (рис. 5).

Результаты исследований противоточной технологии ионирования воды с повышенным содержанием органических примесей

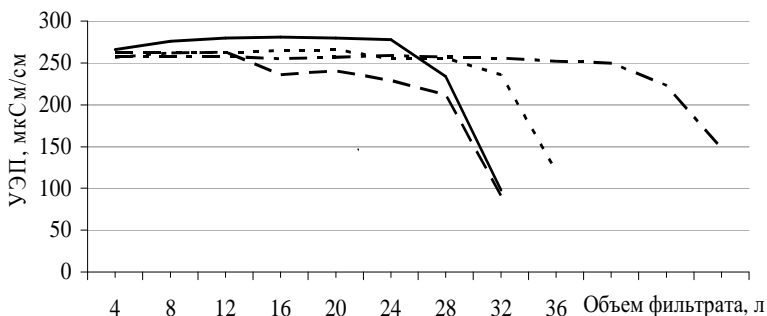


Рис. 3. Зависимость удельной электропроводности Н-катионированной воды от объема фильтрата в разных сериях опытов: ———— 1-я серия опытов; - - - - 2-я серия опытов; - - - - 3-я серия опытов; - · - · 4-я серия опытов

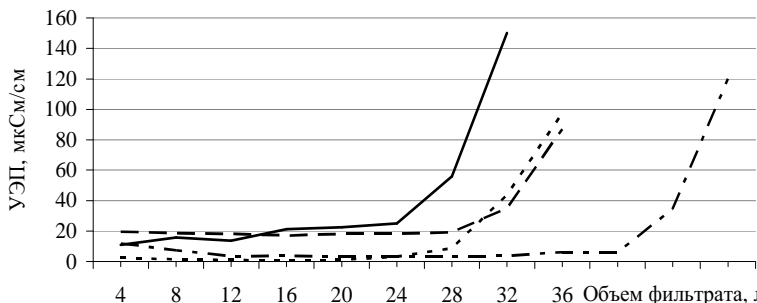


Рис. 4. Зависимость удельной электропроводности обессоленной от объема фильтрата в разных сериях опытов: ———— 1-я серия опытов; - - - - 2-я серия опытов; - - - - 3-я серия опытов; - · - · 4-я серия опытов

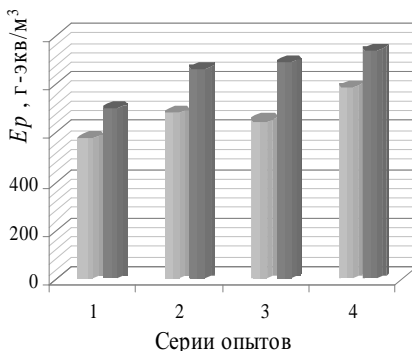


Рис. 5. Суммарные рабочие обменные емкости катионитов по сериям опытов

Выводы

Обращаясь к исходной задаче проведенного лабораторного исследования ионитов в условиях противоточной технологии Shwebbett, предложенной фирмой Chriwa для ТЭЦ-ПВС-1 ОАО «Северсталь», после выработки 150000 м³ обессоленной воды (восстановления рабочих обменных емкостей ионитов, снижения удельных расходов реагентов, совершенствования технологии ионного обмена), можно сделать следующие выводы.

1. В принятых условиях противоточного ионирования на установке химического обессоливания маломинерализованной воды с перманганатной окисляемостью более 5 мгО/л установлено следующее:

– при обработке природных вод сорбция железоорганических соединений на ионитах ХВО ТЭЦ-ПВС ухудшает рабочие показатели и ускоряет процессы старения ионитов. Основными признаками «отравления» ионитов являются: повышение расхода отмывочной воды для достижения требуемого качества фильтрата; значительная чувствительность качества очистки к скорости фильтрования воды и температуре; повышение электропроводности обессоленной воды и снижение рабочей обменной емкости сорбента;

– восстановительная регенерация с применением соле-щелочной промывки ионитов не дала требуемого результата. Длительность фильтроцикла и рабочая обменная емкость катионитов и анионитов существенно не изменилась.

Для восстановления «отравленных» ионитов органическими веществами и предотвращения такого эффекта применялась соле-щелочная промывка с последующей домывкой дистиллированной водой и регенерационной обработкой сорбента двукратной дозой реагента [3].

2. Из четырех исследованных ионитов: катионита рFC-104 (Н_I), катионита рFC-100 (Н_{II}), анионита рFA-847 (А_I) и анионита рFA-400 (А_{II}), составленных в цепочку Н_I – Н_{II} – А_I – А_{II}, определяющим фактором фильтроцикла всей цепочки является анионит рFA-400 (А_{II}). Отсутствие декарбонизатора в схеме ХВО и высокая относительная концентрация бикарбонатов в исходной воде снижают рабочую обменную емкость сильноосновного анионита по кремниевой кислоте.

Для снижения ионной нагрузки на анионитные фильтры, в частности, удаления коррозионно-активных газов, в лабораторных условиях применили декарбонизацию Н-катионированной воды перед парой анионитов, что, в свою очередь, позволило увеличить дли-

тельность фильтроцикла и улучшить качество обессоленной воды на выходе из установки.

3. Изменение электропроводности по стадиям обессоливания показывает плохую работу слабокислотного катионита, работающего, главным образом, по удалению карбонатной жесткости воды. Качество обессоленной воды по минерализации, измеряемое удельной электропроводностью, не отвечает нормам. Для проверки предположения о срабатывании слабокислотного катионита рFC-104 увеличен объем ионита с 37,5 до 60 мл. В результате исследования объем пара катионитов рFC-104 и рFC-100, работавших со средней величиной рабочей обменной емкости (E_p), равной 750 – 850 г-экв/м³, был увеличен изменением соотношения в опытах объемов катионитов в H_I и H_{II} в сторону увеличения объема слабокислотного катионита в H_I до величины 950 г-экв/м³.

Для условий реконструкции промышленной установки химической водоочистки ТЭЦ-ПВС-1 ОАО «Северсталь» может быть рекомендовано следующее:

1. Организация барботажа осветленной после коагуляции сернокислым алюминием воды воздухом. Это позволит уменьшить концентрацию углекислоты в осветленной воде на величину 20 – 40 мг/л, отвечающую дозе коагулянта, и улучшить работу наиболее напряженного сильноосновного анионита по сорбции кремниевой кислоты.

2. Увеличение объема загрузки катионита рFC-104 или установка предвключенного фильтра с загрузкой слабокислотным катионитом, что позволит более полно использовать его сорбционную емкость.

3. Подвод к анионитным фильтрам наряду с регенерационным раствором NaOH раствора поваренной соли, желательнее с подогревом раствора до 35 – 40 °С. Это необходимо для периодического проведения соле-щелочных регенераций в целях освобождения пассивной сорбционной емкости анионитов от органических примесей.

Библиографический список

1. **Гостьков, В.В.** Совершенствование технологии обработки водного теплоносителя на тепловых и атомных электростанциях на основе использования перспективных ионитов: автореф. дис... канд. техн. наук / В.В. Гостьков. – Иваново, 2008.

2. **А.с. 8122339 СССР.** МКИ ВО1J 41/04. Способ очистки сильноосновного анионита от органических примесей / А.А. Мошечитина, М.П. Ковалева, Н.Ф. Фролова, В.М. Красавин; опубл. 15.03.81. – Бюл. № 10.

3. **Лурье, Ю.Ю.** Справочник по аналитической химии / Ю.Ю. Лурье. – М.: Госхимиздат, 1962. – 288 с.

УДК 621.187.12

АВТОМАТИЧЕСКИЙ ХИМИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ПИТАТЕЛЬНОЙ ВОДЫ БАРАБАННЫХ КОТЛОВ*Е.В. Козюлина, канд. техн. наук, Б.М. Ларин, д-р техн. наук*

Нарушения норм качества теплоносителя энергоблоков с котлами СВД и СКД связаны, прежде всего, с присосами охлаждающей воды в конденсаторах турбин, с нарушением качества добавочной воды или режима дозирования корректирующих реагентов. В этих условиях химический контроль должен обеспечивать надежное и своевременное получение информации о нормируемых параметрах водно-химического режима, путем прямого измерения или косвенного (расчетного) определения соответствующих показателей [1, 2].

Точность измерения электропроводности и рН, являющихся измерительной базой и анализаторами примесей конденсата (АПК-051), определяется классом точности приборов автоматического химического контроля (АХК). Погрешность измерений составляет 1,5 – 2,0 % для кондуктометра и 0,05 ед. рН для рН-метра при условии калибровки и поверки согласно требований паспорта прибора. Однако при измерениях в бесконечно разбавленных растворах, какими являются турбинный конденсат и питательная вода энергетических котлов, калибровка приборов по стандартным растворам становится не представительной. Правильность полученных результатов прямых и косвенных измерений в этом случае может быть поставлена под сомнение. При этом обработку результатов измерений приборов АХК необходимо проводить, применяя расчетные методики для обработки результатов измерений, приведенные в ГОСТ 8.207-76 (переиздание, октябрь 2001 г.) [3].

В качестве примера (табл. 1) приведены результаты измерений удельной электропроводности исходной и Н-катионированной пробы (χ , χ_n), величины рН и концентрации натрия, измеренного с помощью рNa-метра (рН-метр/иономер «Атон-101 МП»). Измерения проводились приборами АХК: кондуктометром и рН-метром (ПАИС-01 рН), – в штатных условиях химического контроля на ТЭЦ-9 ОАО «Мосэнерго».

Результаты обработки измерений представлены в табл. 2, где «среднее» – среднее арифметическое серии измерений; $S(\bar{a})_{cp}$ – дисперсия среднего арифметического; $(\Delta a_{сл} + \Delta a_{сисм})$ – сумма случайных и систематических ошибок измерений; «истинное значение» – интервал истинного значения измеренной величины.

Таблица 1. Результаты измерений приборами АХК конденсата паровой турбины (станционный № 4, $p_o = 13$ МПа)

№ пп	χ_H , мкСм/см	χ , мкСм/см	pH	$[Na^+]$, мкг/дм ³
1	0,290	6,5	9,31	1,6
2	0,287	6,5	9,32	9,5
3	0,275	6,5	9,40	3,0
4	0,282	6,4	9,30	7,0
5	0,239	4,7	9,20	2,8
6	0,245	4,9	9,30	3,2
7	0,238	5,0	9,30	4,0
8	0,245	5,0	9,30	9,0

Таблица 2. Результаты обработки измерений контролируемых показателей (по табл. 1)

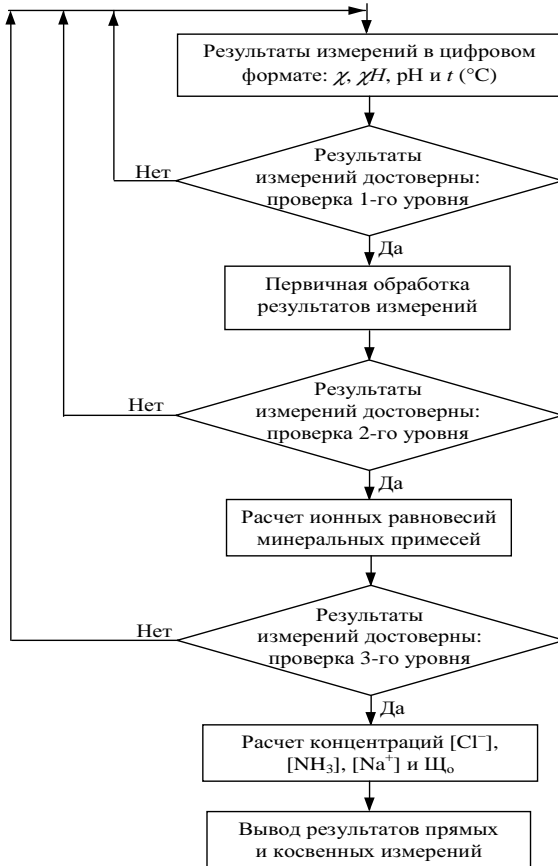
Показатели	χ_H , мкСм/см	χ , мкСм/см	pH	$[Na^+]$, мкг/дм ³
Среднее	0,263	5,69	9,3	5,01
$S(\bar{a})_{cp}$	0,008	0,30	0,019	1,06
$(\Delta a_{сл} + \Delta a_{сист})$	$0,019 + 0,005 = 0,024$	$0,71 + 0,005 = 0,715$	$0,045 + 0,017 = 0,062$	$2,51 + 0,017 = 2,527$
Дисперсия среднего	[0,239; 0,287]	[4,98; 6,41]	[9,24; 9,36]	[2,48; 7,27]

Таким образом, определены интервалы истинных значений измеренных величин. Если результаты измерений не укладываются в данный промежуток, то они признаются выбросами и при дальнейшей обработке результатов измерений не учитываются.

Согласно полученным результатам (табл. 2), наименьший интервал изменения автоматически контролируемых параметров АХК имеет удельная электропроводность Н-катионированной пробы (χ_H), что отвечает устойчиво малой минерализации турбинного конденсата. Несколько больший интервал имеют величины pH и χ (удельная электропроводность прямой пробы), что отвечает неустойчивому режиму дозирования аммиака. Наибольший интервал изменения имеет измеряемая величина концентрации ионов Na^+ , что полностью связано с невысокой точностью измерений рNa-метром.

С участием авторов разработан анализатор АПК-051 [4], который позволяет заменить измерение Na^+ его расчетным определением, а также количественно определить концентрацию аммиака на основе измерений χ , χ_H и pH.

Блок-схема алгоритма обработки результатов измерений χ , χ_H , pH и t °С, реализованная в анализаторе АПК-051, приведена на рисунке. Результаты измерений в цифровом формате поступают на блок обработки данных, где проходят три уровня проверки достоверности измерений, используются в расчетах концентраций хлоридов, натрия, аммиака и щелочности, а затем выводятся на экран прибора и, при необходимости, во внешнюю информационную сеть.



Блок-схема алгоритма получения результатов прямых измерений χ , χ_H , pH и t , °C и косвенных измерений хлоридов, натрия, аммиака и щелочности теплоносителя

Таким образом, принятый алгоритм обработки результатов измерений позволяет: отсеять случайные ошибки измерений отдельных параметров, связанные с нарушением условий подготовки пробы или достоверности измерительного канала; диагностировать рабочее состояние Н-катионной колонки; провести уточнение измеренного значения pH по измерениям χ , χ_H и получить расчетное значение концентраций хлоридов, натрия, аммиака и щелочности водного теплоносителя для условий предельно разбавленного водного раствора ($\chi < 10$ мкСм/см).

На ТЭЦ-9 проводились опытно-промышленные испытания АПК-051.

В данном случае экспериментальные исследования (измерения) и анализ результатов проводились в целях метрологической оценки разработанного расчетного алгоритма косвенного определения нормируемого показателя, в частности концентраций аммиака и натрия, по измерению удельной электропроводности (χ и χ_H) и рН охлажденной пробы водного теплоносителя энергоблока. В ходе промышленного эксперимента на ТЭЦ-9 ОАО «Мосэнерго» проводились измерения значений χ , χ_H , рН и t , °С в потоке охлажденной пробы водного теплоносителя анализатором АПК-051. По измеренным и приведенным к 25 °С значениям контролируемых параметров рассчитывались концентрации аммиака, натрия, хлоридов и щелочность воды. Параллельно проводился химический анализ проб воды на аммиак, натрий, щелочность. Некоторые результаты исследований приведены в табл. 3. При этом концентрация примесей, в том числе аммиака, в потоке теплоносителя могла изменяться во времени, что и было характеристикой состояния водно-химического режима энергоблока.

Таблица 3. Результаты измерений и расчетные показатели качества конденсата паровой турбины (ст. № 4) на ТЭЦ-9 ОАО «Мосэнерго»

Измеренные значения					Расчетные значения
t , °С	Электропроводность χ , мкСм/см	Электропроводность Н-пробы χ_H , мкСм/см	рН, ед. рН	$[\text{NH}_3]$, мкг/дм ³	$[\text{NH}_3]$, мкг/дм ³
29,8	4,7	0,255	9,2	547	616
27,7	6,5	0,275	9,4	983	888
25,2	4,8	0,260	9,3	568	644
27,5	4,3	0,300	9,2	483	584
26,0	4,4	0,200	9,3	496	599
27,0	4,9	0,200	9,3	596	699
28,5	5,0	0,258	9,3	600	695
26,0	5,1	0,27	9,3	611	741

При математической обработке результатов измерений расчетных концентраций использовалась методика статистического тестирования выбросов Кохрана в соответствии с требованиями государственного стандарта [5].

Таким образом, может быть оценена достоверность прямых (χ , χ_H , рН) и косвенных (например, NH_3) измерений, нормируемых руководящими документами для контроля состояния и диагностики нарушений водно-химического режима.

Библиографический список

1. **Общие** технические требования к системам химико-технологического мониторинга водно-химических режимов тепловых электростанций (ОТГ СХТС ВХР ТЭС). РД 153-34.1-37.532.4-2001. – М., 2001.
2. **Назаренко, П.Н.** Опыт построения систем химико-технологического мониторинга паровых котлов ТГМ-96 с последующей интеграцией ее в АСУ ТП ТЭЦ / П.Н. Назаренко [и др.] // Теплоэнергетика. – 2001. – № 4. – С. 7 – 12.
3. **ГОСТ 8.207-76.** Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. – Введ. октябрь 2001.
4. **Пат.** 2348031 РФ. Анализатор примесей конденсата и способ их определения / Б.М. Ларин, Е.Н. Бушуев, Е.В. Козюлина, А.Б. Ларин, С.В. Киет; 27 февраля 2009 г.

УДК 621.187.12

**ОБРАБОТКА ПРЯМЫХ И КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ
КАЧЕСТВА ВОДНОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ЭНЕРГОБЛОКОВ ТЭС**

Е.В. Козюлина, канд. техн. наук, Б.М. Ларин, д-р техн. наук

Учитывая возможные нарушения в работе приборов химического контроля [1], следует перед поиском причины нарушений водно-химического режима проверить результаты измерений на *приемлемость*. Термин *приемлемость* вводится в ГОСТ 5725-6-2002 [2] и рекомендуется для химического контроля теплоносителя АЭС.

Оценка на приемлемость результатов прямых измерений, например, электропроводности и рН, должна проводиться по следующим критериям:

1) по наличию нарушений в процессе пробоподготовки (например, выход за допустимые пределы расхода и температуры пробы теплоносителя через датчики автоматического химического контроля (АХК));

2) по выходу измеряемого параметра за установленный диапазон:

– выход аналогового сигнала за нормируемый диапазон;

– выход измеряемого (рассчитываемого) параметра за реально возможный диапазон;

– превышение скорости изменения измеряемого параметра за установленный диапазон;

3) по наличию неисправностей в модулях приема и обработки информации, что должно определяться тестовыми программами электронных средств;

4) по наличию разногласий с результатами контрольных измерений (проверочные измерения образцовым прибором химического контроля (с соблюдением требований подготовки пробы) и результаты лабораторного химического анализа в сравнении с расчетными концентрациями примесей, полученными на базе измерений электропроводности и рН).

Данные АХК, не получившие обобщенного признака приемлемости, не заносятся в базу данных и требуют дополнительной проверки и устранения причин, вызвавших это явление.

Можно выделить несколько методов проверки приемлемости результатов измерений и установления окончательного результата лабораторного химического контроля и автоматического химического контроля в зависимости от того, является ли измерение дорогостоящим с финансовой точки зрения либо сложным, затруднительным или трудоемким. С учетом квалификации операторов и степени рутинности выполняемых на ТЭС и АЭС анализов предусматривается применять методы проверки с минимальным количеством дополнительных анализов (один – для дорогостоящих методов анализа, два – для не дорогостоящих) и использовать следующие критерии отбраковки результатов лабораторного и автоматического химического контроля [3]:

- 1) по превышению расхождения результатов двух измерений;
- 2) по превышению диапазона результатов первичных и дополнительных измерений значения критического диапазона.

Блок-схема алгоритма указанных процедур по первому варианту представлена на рисунке.

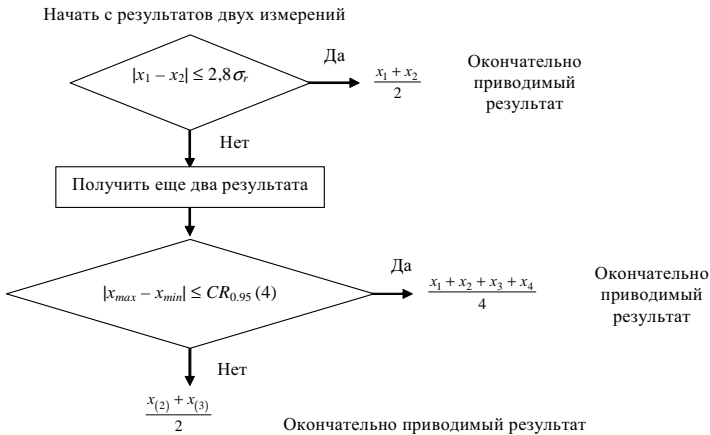
Измерения, получаемые автоматическим анализатором АПК-051 [4] и содержащие первичные значения χ , χ_H и рН, не являются дорогостоящими, поэтому может быть принят предложенный метод оценки приемлемости (см. рисунок).

Также следует отметить, что при установлении причины нарушения необходимо опираться не только на изменение показаний какого-либо одного прибора (т.е. на изменение только удельной электропроводности или рН пробы), но и на изменение показаний и кондуктометра (изменение удельной электропроводности χ и χ_H) и рН-метра (изменение рН).

Наряду с *надежностью*, важным показателем для обработки информации в системе химико-технологического мониторинга является *точность* измерений.

Точность измерения показателей электропроводности и рН, являющихся измерительной базой АПК-051, определяется классом точности приборов АХК. Погрешность измерений составляет 1,5 – 2,0 % для кон-

дуктометра и 0,05 ед. рН – для рН-метра при условии калибровки и проверки согласно требований для паспорта прибора. Однако при измерениях в бесконечно разбавленных растворах, какими являются турбинный конденсат и питательная вода энергетических котлов, калибровка приборов по стандартным растворам становится не представительной. Правильность полученных результатов прямых и косвенных измерений в этом случае может быть поставлена под сомнение.



Метод проверки приемлемости результатов измерений при условии, что получение результатов измерения не является дорогостоящим

В специальной литературе [4, 5] описано значительное количество различных методов, с помощью которых проводится оценка правильности результатов измерений различных параметров, отличающихся друг от друга перечнем определяемых показателей и способами их расчета. Выбор метода обработки результатов определяется задачами измерения и способом дальнейшего использования результатов.

В данном случае экспериментальные исследования (измерения) и анализ результатов проводятся в целях метрологической оценки разработанного расчетного алгоритма косвенного определения нормируемого показателя, например концентрации аммиака, по измерению удельной электропроводности (χ и χ_{II}) и рН охлажденной пробы водного теплоносителя энергоблока. В ходе промышленного эксперимента на ТЭЦ-9 ОАО «Мосэнерго» проводились измерения значений χ , χ_{II} , рН и t , °С в потоке охлажденной пробы водного теплоносителя анализатором

АПК-051 [6]. По измеренным и приведенным к 25 °С значениям контролируемых параметров рассчитывались концентрации аммиака, натрия, хлоридов и щелочность воды. Параллельно проводился химический анализ проб воды на аммиак, натрий, щелочность. Некоторые результаты исследований приведены в таблице. При этом концентрация примесей, в том числе аммиака, в потоке теплоносителя могла изменяться во времени, что и было характеристикой состояния водно-химического режима энергоблока. Ниже дается оценка правильности расчетного определения концентрации отдельной примеси, например аммиака, по измеренным значениям удельной электропроводности исходной и Н-катионированной пробы, а также величины рН в потоке теплоносителя.

В целом для математической модели правильность определения расчетных концентраций, в соответствии с требованиями государственного стандарта [2], должна быть выражена через значения систематической погрешности с учетом выброса отдельных измерений.

Результаты измерений и расчетные показатели качества конденсата паровой турбины (ст. № 4) на ТЭЦ-9 ОАО «Мосэнерго»

<i>t</i> , °С	Измеренные значения				Расчетные значения
	Электропроводность χ , мкСм/см	Электропроводность Н-пробы χ_n , мкСм/см	рН, ед. рН	[NH ₃], мкг/дм ³	[NH ₃], мкг/дм ³
29,0	6,5	0,290	9,31	986	927
29,9	4,7	0,239	9,2	658	567
27,7	6,5	0,275	9,4	983	926
29,6	6,4	0,282	9,3	902	904
28,7	6,5	0,287	9,32	987	927
28,6	4,9	0,245	9,3	690	603
25,4	4,9	0,290	9,2	625	604
26,0	4,3	0,240	9,2	479	498

В данном случае предлагается использовать критерий Кохрена, суть которого состоит в том, что для совокупности из *r* стандартных отклонений *s_i* рассчитывается характеристика Кохрена (*C*) исходя из одного и того же количества (*n*) результатов испытаний в базовых элементах. Тестовая характеристика Кохрена имеет вид

$$C = \frac{d_{max}^2}{\sum_{i=1}^n d_i^2} . \tag{1}$$

Сравнение характеристики Кохрена (C) с заданной величиной уровня значимости (α) позволяет выявить выбросы измерений и количественно оценить значение относительной погрешности (dF') расчетного определения параметра X . В рассматриваемом случае под значением параметра X понимается погрешность расчетного определения концентрации аммиака по разработанной модели в каждом конкретном опыте измерений, число которых равно n .

Ход вычисления при этом следующий:

1. На основании полученных расчетных данных и измерений удельной электропроводности исходной и Н-катионированной пробы и величины рН рассчитывается относительная погрешность расчетного определения концентрации аммиака в каждом измерении.

2. Рассчитывается модуль относительной погрешности расчетного определения концентрации аммиака.

3. Рассчитывается среднеарифметическое значение погрешности dF .

4. Вычисляется несмещенная оценка среднеквадратического отклонения параметра dF от среднего значения \overline{dF} .

5. Определяются модули отклонений каждого из n значений параметра dF от среднего значения \overline{dF} .

6. Выбирается критический результат измерения параметра $dF_{кр}$, характеризующийся наибольшим отклонением от среднего значения \overline{dF} , т.е. наибольшим значением $d_i = d_{max}$.

7. Для выбранного значения $dF_{кр}$ рассчитывается тестовая характеристика Кохрена по выражению (1).

8. Задается величина уровня значимости α для выявления грубых промахов. Если нет специальных требований, то следует принимать $\alpha = 5\%$ ($\alpha = 0,05$) [5].

9. Сравнивается полученное значение тестовой характеристики Кохрена с величиной уровня значимости. Различие не должно превышать 5%. Если тестовая характеристика меньше либо равна 5% критического значения, то значение параметра *концентрация аммиака* признается корректным. В ином случае значение признается статистическим выбросом, и тогда необходимо выявить причину и провести повторное тестирование проб – выбросов.

Проведенная обработка опытных данных (расчетных и измеренных значений концентрации аммиака) показала, что в целом по всей совокупности измерений относительная погрешность расчетного определения концентрации аммиака укладывается в 10%, что может быть принято для

условий оперативного определения нормируемого параметра качества водного теплоносителя энергоблока.

Таким образом, полученные результаты указывают на возможность использования автоматического анализатора АПК-051 для прямого измерения нормируемых показателей автоматического химического контроля (удельной электропроводности исходной и Н-катионированной пробы, рН) и косвенного определения концентрации аммиака в водном теплоносителе. Реализация метода в рамках АПК-051 повышает оперативность химического контроля и эксплуатационную надежность водно-химического режима энергоблока ТЭС.

Библиографический список

1. **Ларин, Б.М.** Повышение информативности мониторинга водного режима конденсатно-питательного тракта энергоблоков / Б.М. Ларин, Е.Н. Бушуев, Е.В. Козюлина // Теплоэнергетика. – 2003. – № 7. – С. 2 – 9.
2. **ГОСТ Р ИСО 5725-6-2002.** Точность (правильность и приемлемость) методов и результатов измерений. – Ч. 6. – М., 2002.
3. **Гашенко, В.А.** Разработка системы контроля и управления водно-химическими режимами 1 и 2 контуров АЭС с ВВЭР-1000 / В.А. Гашенко [и др.] // Мат-лы междунар. науч.-техн. совещ. «Водно-химический режим АЭС». – М.: ВНИИАЭС, 2003.
4. **ГОСТ Р ИСО 5725-2-2002.** Точность (правильность и приемлемость) методов и результатов измерений. – Ч. 2. – М., 2002.
5. **Трофимов, А.И.** Приборы и системы контроля ядерных энергетических установок: учеб. пособие / А.И. Трофимов. – М.: Энергоатомиздат, 1999. – 494 с.
6. **Пат.** 2348031 РФ. Анализатор примесей конденсата и способ их определения / Б.М. Ларин, Е.Н. Бушуев, Е.В. Козюлина, А.Б. Ларин, С.В. Квет; 27 февраля 2009 г.

УДК 681.51

ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ РЕГУЛИРУЮЩИХ ОРГАНОВ С НЕЛИНЕЙНЫМИ РАСХОДНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ В СОВРЕМЕННЫХ АСУТП

Е.Д. Маршалов, инж., О.А. Нечаева, студ.

Актуальность проблемы. Современные автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУТП) на программно-техническом комплексе (ПТК) сетевой организации служат системообразующим оборудованием, которое в технологическом процессе ТЭС относят

к основному оборудованию электростанций [1]. Для повышения эффективности АСУТП при эксплуатации все большую значимость приобретают задачи интеллектуализации АСУТП путем использования математических моделей технологического оборудования [2].

Проблема оптимизации работы автоматических систем регулирования (АСР) в АСУТП осложняется тем, что при эксплуатации регулирующей арматуры на технологическом оборудовании наблюдаются нелинейность расходных характеристик (РХ) регулирующих органов (РО), большие пропуски среды при закрытом состоянии РО, сужение диапазона регулирования технологических сред и другие проблемы. Поэтому актуальной является задача исследования работы систем регулирования совместно с РО, установленными на технологическом оборудовании, выявления причин, негативно влияющих на устойчивость АСР, и поиска решений для их исключения [3]. Ниже рассмотрена модернизация АСУТП на примере водоподготовительной установки ТЭЦ с парогазовой установкой.

Основные результаты исследования. Для получения расходных характеристик клапанов разработаны имитационные модели гидравлических систем на основе уравнений гидравлики, которые учитывают влияние всех местных сопротивлений и длин трубопроводов на заводскую характеристику клапана, а также перепады давления на клапанах и другие факторы. Кроме того, были разработаны динамически загружаемые модели регулирующих органов, содержащих пропускную, расчетную расходную и уточненную расходную характеристики, а также реальные расходные характеристики, соответствующие открытию и закрытию клапана, полученные в результате диагностики реального оборудования [4].

На рис. 1 представлено сравнение расчетной расходной характеристики с реальными расходными характеристиками, полученными для одного из клапанов, установленного на Калининградской ТЭЦ-2.

Анализ графиков, приведенных на рис. 1, свидетельствует о том, что реальные расходные характеристики регулирующего клапана существенно отличаются от расчетной расходной характеристики практически во всем имеющемся диапазоне открытия клапана.

Работу схем регулирования с установленными на них регулирующими клапанами рассмотрим на примере схемы регулирования рециркуляции коагулированной воды в осветлитель, где установлен регулирующий клапан АИ7.507.1322-АА производства ЗАО «Арматэк» с Ду 50 мм, максимальной пропускной способностью 70 м³/ч.

Переходные процессы для разных степеней открытия РО, полученные при нанесении 10 %-ного возмущения изменением положения РО,

приведены на рис. 2. Анализ результатов показывает, что степень открытия РО существенно влияет на характер переходных процессов.

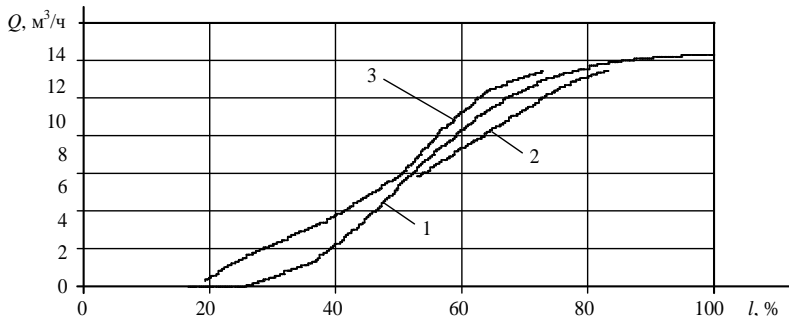


Рис. 1. Расходные характеристики клапана: 1 – расчетная расходная характеристика; 2 – реальная расходная характеристика на открытие; 3 – реальная расходная характеристика на закрытие

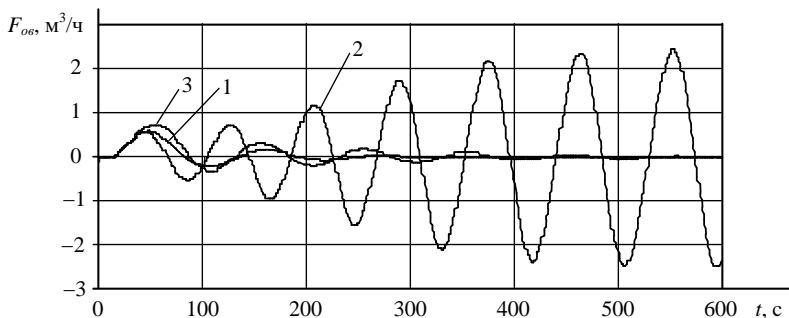


Рис. 2. Переходный процесс изменения расхода обессоленной воды при 10 %-ном возмущении РО: 1 – при степени открытия РО на 40 %; 2 – при степени открытия РО на 60 %; 3 – при степени открытия РО на 80 %

Для линеаризации характеристик традиционным шагом являлось либо перепрофилирование РО, либо введение нелинейной связи в сочетание привода и РО. Однако оба этих метода имеют ряд существенных недостатков и применимы далеко не ко всем типам арматуры [3]. Поэтому нами разработана универсальная методика корректировки нелинейности РХ, позволяющая приближать нелинейные характеристики клапанов к линейным. Основная идея заключается в сравнении пропускной характеристики клапана и линейной и устранении несоответствий между ними на уровне алгоритмической программы контроллера.

Рассмотрим работу системы регулирования расхода обессоленной воды совместно с клапаном и с использованием корректирующей модели.

Переходные процессы, полученные при работе схемы с клапаном АИ7.507.1322-АА и разработанной по описанному выше методу модели, представлены на рис. 3. Анализ переходных процессов, полученных при отработке системой возмущений, показывает, что введенная корректировка позволяет добиться устойчивости системы регулирования и заданных на этапе настройки системы показателей качества.

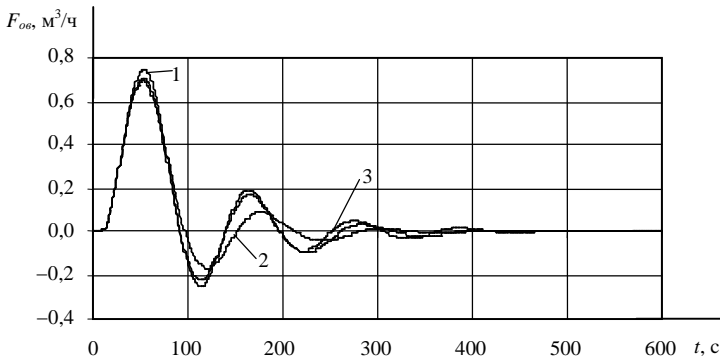


Рис. 3. Переходный процесс изменения расхода обессоленной воды при 10 %-ном возмущении РО и корректировке нелинейности РХ: 1 – при степени открытия РО на 40 %; 2 – при степени открытия РО на 60 %; 3 – при степени открытия РО на 80 %

Исследования показали, что при настройке систем регулирования необходимо проводить регулярную диагностику всей регулирующей аппаратуры. При отклонении параметров клапанов свыше допустимых РД требуется провести их ремонт или замену. В случае необходимости применения клапанов со значительной нелинейностью РХ целесообразно введение в АСР корректирующих звеньев, обеспечивающих их устойчивую работу и высокие показатели качества. Однако следует помнить, что ни одна корректировка на контроллере не позволит получить то же качество переходных процессов, что и использование клапанов с линейной расходной характеристикой и отсутствием люфтов в сочленениях.

Выводы

1. В результате диагностирования регулирующих клапанов и гидравлических расчетов получены действительные расходные характеристики РО.

2. Разработан алгоритм линеаризации расходных характеристик РО, отличающийся универсальностью и отсутствием конструктивных переделок регулирующей арматуры.

3. Показано, что использование разработанного алгоритма линеаризации позволяет устранить расходящиеся переходные процессы и гарантировать заданное качество регулирования в широком диапазоне нагрузок.

Библиографический список

1. **Тверской, Ю.С.** Автоматизация котлов с пылесистемами прямого вдувания / Ю.С. Тверской. – М.: Энергоатомиздат, 1996. – 256 с.
2. **Таламанов, С.А.** Концепция построения станции контроля качества автоматического регулирования и автоматизации настройки АСР в составе АСУТП тепловых электростанций / С.А. Таламанов // Сб. докл. IV всерос. науч. конф. «Управление и информационные технологии» (УИТ-2006) / Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ». – СПб, 2006. – С. 196 – 201.
3. **Благов, Э.Е.** Дроссельно-регулирующая арматура ТЭС и АЭС / Э.Е. Благов, Б.Я. Ивницкий. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 288 с.
4. **Маршалов, Е.Д.** Имитационное моделирование гидравлических систем с регулирующими органами / Е.Д. Маршалов, О.А. Нечаева // Вестник ИГЭУ. – 2007. – № 4. – С. 84 – 87.

УДК 681.3

К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ В СОСТАВЕ АСУТП ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Ю.В. Наумов, асп.

В настоящее время для диагностики энергетического оборудования актуальным является разработка и реализация алгоритмов, которые в качестве исходных данных могут использовать не только результаты активных экспериментов над объектом, но и реальные промышленные сигналы, получаемые с архивной станцией программно-технического комплекса (ПТК) АСУТП в режиме штатной эксплуатации объекта управления.

Известно, что оценки показателей качества функционирования автоматической системы регулирования (АСР), как правило, определяются по реализациям сигналов, получаемым в ходе активного эксперимента [1, 3]. При этом оценки статистических характеристик могут быть по-

лучены по результатам обработки реализаций случайного процесса специально организованного пассивного эксперимента [1, 2].

Однако в настоящее время в связи с внедрением полномасштабных АСУТП и усложнением вводимого в эксплуатацию энергетического оборудования проведение данных экспериментов чрезвычайно затруднено из-за высокой стоимости подобного вида работ и высоких рисков.

С другой стороны, непрерывная цифровая регистрация сигналов, ведущаяся на архивной станции ПТК АСУТП с достаточно малым шагом по времени в режиме штатной эксплуатации промышленных объектов, позволяет использовать регистрируемые тренды сигналов для анализа качества АСР. Вместе с этим следует отметить, что тренды представляют собой искаженные разного рода воздействиями случайные процессы.

Ниже рассматриваются математические основы корректного получения оценок качества функционирования АСР по реализациям сигналов, регистрируемым на архивной станции ПТК АСУТП.

В качестве основных решаемых функциональных задач можно выделить следующие [4, 5 и др.]:

- оценка показателей качества функционирования АСР;
- расчет статических характеристик объектов управления и других элементов АСР (например, расходных характеристик регулирующих органов) и их статистическая оценка;
- оценка статистических характеристик реальных промышленных случайных процессов (в том числе, случайных процессов возмущений), полученных в условиях штатной эксплуатации энергетического оборудования.

Существуют несколько подходов к оценке показателей качества регулирования, основанных на разных математических моделях.

Наибольшее распространение получили прямые показатели качества, рассчитываемые по переходным процессам в системах управления: время регулирования, степень затухания переходного процесса, перерегулирование, динамическая ошибка регулирования.

Прямые показатели качества переходных процессов стационарных линейных систем связаны с корневыми показателями, оцениваемыми по расположению корней характеристического уравнения системы: степенью устойчивости $\min_k [-\operatorname{Re}(p_k)]$ и степенью колебательности $\min_k [\operatorname{Re}(p_k)/\operatorname{Im}(p_k)]$ [6]. Однако в условиях неопределенности вместо корневых показателей удобнее использовать частотные показатели колебательности в следующей форме:

$$M_m = \max_{0 \leq \omega < \infty} |M(i\omega) / M(0)|, \quad (1)$$

$$\overline{M}_m = \max_{0 \leq \omega < \infty} |[1 - M(i\omega)] / [1 - M(i\infty)]|, \quad (2)$$

где $M(i\omega)$ – комплексно-частотная характеристика системы.

Для определения показателей (1), (2) достаточно располагать информацией о характеристиках объекта и регулятора в диапазоне резонансных частот [7].

В установившихся режимах работы системы оцениваются следующие показатели качества: математическое ожидание, среднеквадратическое отклонение (или дисперсия) и выбеги регулируемых координат, относительное время работы исполнительного механизма, среднее число включений исполнительного механизма в минуту и др.

Стоит отметить, что наиболее значимыми показателями качества считаются технологически и экономически обоснованные критерии. В уравнениях, определяющих и минимизирующих технологически обоснованный критерий качества управления, фигурируют не только дисперсия и математическое ожидание ошибки регулирования, но и среднеквадратичное отклонение, асимметрия и эксцесс [8].

Вопрос качества регулирования также рассматривается в теории робастного управления. Например, в H^∞ -теории одной из самых распространенных оценок качества является функция чувствительности [9]:

$$S = \frac{1}{1+W}. \quad (3)$$

Считается, что система обладает хорошим качеством, если $\|Q_1 S\|_\infty \leq 1$, где $\|\bullet\|_\infty$ – норма в пространстве H^∞ ; Q_1 – функция, определяющая вес, с которым S войдет в критерий качества.

Алгоритм расчета оценки средней статической характеристики состоит из нескольких этапов [4]. Например, при оценке расходной характеристики регулирующего органа (как частного случая статической характеристики) на первом этапе проводится предварительная обработка экспериментального сигнала с учетом направления движения регулирующего органа в целях получения выборок реализаций, соответствующих статическому режиму работы объекта с учетом технологических ограничений.

Второй этап предусматривает получение средней оценки статической характеристики путем применения взвешенного усреднения исходных данных, полученных на первом этапе.

На каждую точку рассчитанной средней характеристики строится статистическая оценка. Поскольку априорная информация об исходных распределениях случайной составляющей регистрируемой с помощью ПТК координаты, как правило, отсутствует, то на основании центральной предельной теоремы можно предполагать, что распределение среднего взвешенного нормально, поскольку оно является суммой большого числа случайных величин с конечными дисперсиями и математическими ожиданиями. При данном допущении можно построить интервальную оценку $(a_i; b_i)$ статической характеристики с заданной доверительной вероятностью γ [5]:

$$a_i = \bar{y}_i - t_{1-\beta, k_i} \frac{\bar{\sigma}_{\bar{y}_i}}{\sqrt{n_i}}, \quad b_i = \bar{y}_i + t_{1-\alpha, k_i} \frac{\bar{\sigma}_{\bar{y}_i}}{\sqrt{n_i}}, \quad (4)$$

где $t_{1-\alpha, k_i}$, $t_{1-\beta, k_i}$ – квантили распределения Стьюдента с k_i степенями свободы; $\bar{\sigma}_{\bar{y}_i}^2$ – дисперсия средневзвешенной оценки статической характеристики, полученной на первом этапе.

На третьем этапе проводится сглаживание расчетных данных.

Полученную оценку средней характеристики расхода можно аппроксимировать, используя различные методы. Наиболее известным и широко распространенным подходом является линейная аппроксимация по методу наименьших квадратов. Данный подход имеет ряд преимуществ, таких как простота реализации, быстродействие и др. Более того, он позволяет получить статистические оценки на полученную аппроксимирующую функцию в виде доверительных интервалов, которые могут быть построены в любой точке рассматриваемой характеристики. Так, при линейной аппроксимации средней статической характеристики по методу наименьших квадратов с базисной системой функций $f = (f_0, f_1, \dots, f_{m-1})^T$ границы доверительного интервала на полученную аппроксимирующую функцию $\hat{G}(\mu)$ определяются по формуле [4]

$$\hat{G}(\mu) \pm t_{1-\frac{\alpha}{2}}(n-m) \cdot \sqrt{\sigma_Y^2 \cdot f^T(\mu) \cdot C \cdot f(\mu)}, \quad (5)$$

где $C = (F^T F)^{-1}$ – дисперсионная матрица Фишера, F – матрица базисных функций; $t_{1-\frac{\alpha}{2}}(n-m)$ – квантиль распределения Стьюдента с $(n-m)$ степенями свободы; σ_Y^2 – дисперсия средних значений статической характеристики.

Однако линейная аппроксимация имеет ряд существенных недостатков, в первую очередь связанных с неопределенностью выбора нормальной системы функций метода наименьших квадратов. Например, трудно заранее определить, какое число базисных функций потребуется для аппроксимации полученного множества значений средней характеристики. Также при использовании линейной аппроксимации нельзя учесть условия, налагаемые на аппроксимирующую функцию, такие как наличие точек перегиба, возрастание и убывание на заданных промежутках, наличие асимптот и т.д.

Другой подход к сглаживанию полученной расчетной средней характеристики заключается в проведении нелинейной по параметрам аппроксимации, основанной на квазиньютоновском алгоритме. В данном случае проблема выбора числа и вида базисных функций пропадает, поскольку ограничения на вид аппроксимирующей функции снимаются, и для сглаживания полученного множества значений средней характеристики можно выбрать любую сколь угодно сложную функцию.

Один из лучших результатов при нелинейной аппроксимации дает глобально сходящаяся модификация метода Ньютона «шаг с двойным изломом», в которой используется подход «модель – доверительная область» [10]. Алгоритм, основанный на методе «шаг с двойным изломом», демонстрирует высокую скорость сходимости даже при неудачном выборе начальной точки.

Оценка статистических характеристик случайных процессов возмущений необходима для решения ряда задач идентификации, диагностики и оптимизации систем управления теплоэнергетических объектов [1, 6 и др.].

Промышленные случайные процессы являются нестационарными, т.е. непосредственное применение статистического аппарата к обработке таких процессов является некорректным.

Основной составляющей модели случайного процесса является случайная компонента, которая формируется в результате одновременного действия на объект в процессе его эксплуатации множества независимых или слабо связанных друг с другом случайных факторов.

Таким образом, алгоритм оценки статистических характеристик промышленных случайных процессов должен предусматривать:

- исследование априорной информации об объекте;
- анализ реализации сигнала, полученного с ПТК, в целях выделения фрагментов, соответствующих режимным ограничениям и зонам нечувствительности работы регулирующего органа;
- центрирование и усреднение полученных фрагментов в зависимости от настройки и режима регистрации сигналов ПТК;
- проверку гипотез стационарности, нормальности и эргодичности;
- получение статистических характеристик случайной составляющей процесса, включая дисперсию, корреляционную функцию, спектральную плотность.

В целом, в качестве перспективных направлений развития теоретических основ решения новых функциональных задач АСУТП по контролю качества и диагностированию видятся следующие направления:

- оценка показателей качества с использованием частотных показателей (1), (2) и функции чувствительности (3);
- получение интервальных оценок статических характеристик согласно (4), (5);
- получение моделей случайных процессов возмущений в соответствии с процедурой анализа реализаций сигналов, регистрируемых с помощью ПТК АСУТП.

Библиографический список

1. **Тверской, Ю.С.** Автоматизация котлов с пылесистемами прямого вдувания / Ю.С. Тверской. – М.: Энергоатомиздат, 1996. – 256 с.
2. **Джонсон, Н.Л.** Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы обработки данных: пер. с англ. / Н.Л. Джонсон, Ф.С. Леон; под ред. Э.К. Лецкого. – М.: Мир, 1980. – 612 с.
3. **Ротач, В.Я.** Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами / В.Я. Ротач. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 296 с.
4. **Агафонова, Н.А.** Оценка статических характеристик объектов управления по экспериментальным сигналам, регистрируемым ПТК АСУТП (на примере оценки расходной характеристики регулирующего органа) / Н.А. Агафонова, Ю.В. Наумов, С.А. Таламанов // Вестник ИГЭУ. – 2007. – № 4. – С. 61 – 65.
5. **Агафонова, Н.А.** Интервальные оценки характеристик объектов управления на основе архивных трендов сигналов, регистрируемых ПТК АСУТП / Н.А. Агафонова, Ю.В. Наумов, С.А. Таламанов // Теория и практика построения и функционирования АСУТП: Тр Международ. науч. конф. «CONTROL-2008». – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – С. 144 – 148.
6. **Фельдбаум, А.А.** Методы теории автоматического управления / А.А. Фельдбаум, А.Г. Бутковский. – М.: Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1971. – 744 с.

Определение мощностного, температурного и барометрического коэффициентов реактивности симулятора реактора ВВЭР-1000 в энергетических режимах на функциональном аналитическом тренажере

7. **Шавров, А.В.** Оценки качества управления и их взаимосвязь / А.В. Шавров, О.А. Липа // Теория и практика построения и функционирования АСУТП: тр. междунар. науч. конф. «Control-2003». – М.: Изд-во МЭИ, 2003. – С. 39 – 44.
8. **Волгин, В.В.** Технологически обоснованные критерии качества в стохастических системах управления / В.В. Волгин // Теория и практика построения и функционирования АСУТП: тр. междунар. науч. конф. «Control-2003». – М.: Изд-во МЭИ, 2003. – С. 39 – 44.
9. **Методы** робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления: учебник / под ред. Н.Д. Егулова. – Изд. 2-е, стереотипное. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 744с.
10. **Агафонова, Н.А.** Аппроксимация характеристик регулирующих органов нелинейными по параметрам моделями / Н.А. Агафонова, Е.Д. Маршалов, Ю.В. Наумов // Вестник ИГЭУ. – 2007. – № 4. – С. 65 – 69.

УДК 621.039.51

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТНОГО, ТЕМПЕРАТУРНОГО И БАРОМЕТРИЧЕСКОГО КОЭФФИЦИЕНТОВ РЕАКТИВНОСТИ СИМУЛЯТОРА РЕАКТОРА ВВЭР-1000 В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕЖИМАХ НА ФУНКЦИОНАЛЬНОМ АНАЛИТИЧЕСКОМ ТРЕНАЖЕРЕ

В.К. Семенов, д-р техн. наук, Д.Н. Магницкий, инж.

Установленная на кафедре АЭС ИГЭУ модель функционального аналитического тренажера не оснащена альбомом нейтронно-физических характеристик топливной загрузки модели реактора ВВЭР-1000, поэтому эти характеристики должны определяться экспериментально.

При постоянном отравлении реактора ксеноном и самарием и неизменной концентрации борной кислоты изменение реактивности реактора при малых возмущениях определяется выражением [1]

$$\Delta\rho = \left(\frac{\partial\rho}{\partial T}\right)\Delta T_g + \left(\frac{\partial\rho}{\partial T}\right)\Delta T_u + \left(\frac{\partial\rho}{\partial p}\right)\Delta p_1 + \left(\frac{\partial\rho}{\partial H}\right)\Delta H. \quad (1)$$

Здесь ΔT_g , ΔT_u – температуры теплоносителя и топлива соответственно; Δp_1 – изменение давления в первом контуре; ΔH – изменение положения группы ОР СУЗ.

Температуры теплоносителя, топлива и тепловая мощность реактора связаны между собой уравнениями теплового баланса, которые для реактора с сосредоточенными параметрами имеют следующий вид:

$$m_u C_u \frac{dT_u}{dt} = N_T - kF(T_u - T_g); \quad (2)$$

$$m_g C_g \frac{dT_g}{dt} = kF(T_u - T_g) - \gamma_g C_g G(T_{\text{вх}} - T_{\text{вх}}), \quad (3)$$

где m_u , m_g – масса топлива и теплоносителя соответственно; C_u , C_g – удельные теплоемкости топлива и теплоносителя при постоянном давлении; k – эффективный коэффициент теплопередачи от топлива к теплоносителю; F – эффективная поверхность теплообмена; $\gamma_g G$ – плотность теплоносителя на входе в зону и его расход соответственно; T_u , T_g – средние температуры топлива и теплоносителя; $T_{\text{вх}} - T_{\text{вх}} = \Delta T$ – подогрев теплоносителя в активной зоне.

При малых возмущениях реактора, в процессе которых он переходит из одного стационарного состояния в другое, $\Delta \rho = 0$ и $\frac{dT_u}{dt} = \frac{dT_g}{dt} = 0$. Из этого следует

$$\Delta N_T = kF(\Delta T_u - \Delta T_g) = \gamma_g C_g G(T_{\text{вх}} - T_{\text{вх}}). \quad (4)$$

Последнее равенство позволяет баланс реактивности (1) выразить через входные или выходные параметры реактора следующим образом:

$$\left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)_{\text{вх}} \Delta T_{\text{вх}} + \left(\frac{\partial \rho}{\partial N}\right)_{A3} \Delta N_T + \left(\frac{\partial \rho}{\partial p}\right) \Delta p_1 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial H}\right) \Delta H = 0; \quad (5)$$

$$\left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)_{\text{вх}} \Delta T_{\text{вх}} + \left(\frac{\partial \rho}{\partial N}\right)_{\text{вх}} \Delta N_T + \left(\frac{\partial \rho}{\partial p}\right) \Delta p_1 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial H}\right) \Delta H = 0. \quad (6)$$

Здесь $\frac{\partial \rho}{\partial T} = \frac{\partial \rho}{\partial T_g} + \frac{\partial \rho}{\partial T_u}$ – суммарный температурный коэффициент реактивности по температуре топлива и теплоносителя; $\left(\frac{\partial \rho}{\partial N}\right)_{A3} = \frac{\partial \rho}{\partial T_u} \frac{1}{kF}$ – мощностной коэффициент реактивности при постоянной температуре теплоносителя в активной зоне; $\left(\frac{\partial \rho}{\partial N}\right)_{\text{вх}} = \frac{\partial \rho}{\partial T_u} + \frac{\partial \rho}{\partial T_g} \frac{1}{kF + \gamma_g C_g G}$ – мощностной коэффициент реактивности при постоянной температуре теплоносителя на входе в реактор.

Далее рассмотрим возмущения реактора, обусловленные каждой из причин в отдельности.

1. Возмущение изменением положения ОР СУЗ при $p_1 = \text{const}$. В этом случае уравнение (5) принимает вид

$$\left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right) \Delta T_{\text{вых}}^{(1)} + \left(\frac{\partial \rho}{\partial N}\right)_{A3} \Delta N_T^{(1)} + \left(\frac{\partial \rho}{\partial H}\right) \Delta H = 0. \quad (7)$$

2. Возмущение изменением температуры на входе в реактор при $p_1 = \text{const}$ и $H_{\text{СУЗ}} = \text{const}$:

$$\left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right) \Delta T_{\text{вых}}^{(2)} + \left(\frac{\partial \rho}{\partial N}\right)_{A3} \Delta N_T^{(2)} = 0. \quad (8)$$

3. Возмущение изменением давления в первом контуре при $H_{\text{СУЗ}} = \text{const}$:

$$\left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right) \Delta T_{\text{вых}}^{(3)} + \left(\frac{\partial \rho}{\partial N}\right)_{A3} \Delta N_T^{(3)} + \left(\frac{\partial \rho}{\partial p}\right) \Delta p_1^{(3)} = 0. \quad (9)$$

Система уравнений (7) – (9) содержит четыре неизвестных коэффициента реактивности, поэтому для ее разрешения должно быть записано еще одно уравнение.

Для этого определим изменение реактивности в ходе быстрого переходного процесса при возвратном перемещении ОР СУЗ, когда $p_1 = \text{const}$ и $T_{\text{ax}} = \text{const}$. Из уравнения (2) следует

$$\tau_u \frac{d\Delta T_u}{dt} = \frac{\Delta N_T}{kF} - \Delta T_u + \Delta T_e. \quad (10)$$

Здесь учтено, что $\Delta T_{\text{ax}} = 0$, а $\tau_u = \frac{m_u C_u}{kF}$ – характерное время теплопередачи. Учитывая сказанное, уравнение (3) запишем в виде

$$\tau_6 \frac{d(\Delta T_6)}{dt} = \frac{kF}{kF + \gamma C_6 G} \Delta T_u - \Delta T_6, \quad (11)$$

где $\tau_6 = \frac{m_6 C_6}{kF + \gamma C_6 G} \Delta(\Delta T)$ – характерное время нагрева теплоносителя.

Так как $\tau_u \ll \tau_0$, то процесс будет быстрым, если его продолжительность будет меньше τ_0 , и будет носить возвратный характер. В таком процессе температура теплоносителя не успеет измениться, т.е. $\Delta T_0 \approx 0$. При этом условии уравнение (10) легко интегрируется следующим образом:

$$\Delta T_u = \frac{e^{-t/\tau_u}}{\tau_u k F} \int_0^t \Delta N(t') e^{t'/\tau_u} dt'. \quad (12)$$

Изменение реактивности в этом процессе определяется выражением

$$\Delta \rho = \left(\frac{\partial \rho}{\partial T_u} \right) \Delta T_u + \left(\frac{\partial \rho}{\partial H} \right) \Delta H. \quad (13)$$

Подставляя в (13) формулу (12), получим

$$\Delta \rho(t) = \left(\frac{\partial \rho}{\partial H} \right) \Delta H(t) + \left(\frac{\partial \rho}{\partial N} \right)_{\text{ex}} \frac{e^{-t/\tau_u}}{\tau_u} \int_0^t \Delta N(t') e^{t'/\tau_u} dt'. \quad (14)$$

Здесь ΔN – изменение нейтронной мощности, пропорциональное показанию тока ионизационных камер. В формуле (14) неизвестными величинами являются

$$k_1 = \frac{\partial \rho}{\partial H}, \quad k_2 = \left(\frac{\partial \rho}{\partial N} \right)_{\text{ex}}, \quad k_3 = \tau_u.$$

Согласно РД ЭО 0151-2004, нахождение указанных коэффициентов осуществляется методом оптимизации (регрессионного анализа) выражения (14). В силу того, что k_3 входит в указанное выражение под знаком интеграла, метод не чувствителен к выбору этой величины. Погрешность такого подхода может достигать 100 % [1].

Считая равенство (14) точным, проведем сшивку функций, стоящих в левой и правой частях уравнения, включая вторые производные. При $t = 0$ все три величины равны нулю: $\rho(0) = 0$, $\Delta H(0) = 0$ и $\Delta N(0) = 0$, и это ничего не дает для нахождения указанных коэффициентов. Для установления связи между коэффициентами продифференцируем исходное уравнение по времени и проведем сшивку по первым производным:

$$\frac{\partial \Delta \rho}{\partial t} = k_1 \frac{\partial \Delta H}{\partial t} - \frac{k_2}{k_3^2} \int_0^t \Delta N(t') \exp\left(\frac{t'-t}{k_3}\right) dt' + \frac{k_2}{k_3} \Delta N(t). \quad (15)$$

При $t = 0$ $\frac{\partial \Delta \rho}{\partial t} = b_2$ и $\frac{\partial \Delta H}{\partial t} = b_1$. Получаем

$$k_1 = \frac{b_2}{b_1}. \quad (16)$$

Для нахождения связи между коэффициентами k_2 и k_3 про дифференцируем по времени уравнение (16) и потребуем равенства вторых производных при $t = 0$:

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} = k_1 \frac{\partial^2 \Delta H}{\partial t^2} + \frac{k_2}{k_3^3} \int_0^t \Delta N(t') \exp\left(\frac{t'-t}{k_3}\right) dt' + \frac{k_2}{k_3} \frac{\partial \Delta N(t)}{\partial t} - \frac{k_2}{k_3^2} \Delta N(t). \quad (17)$$

Обозначая

$$\left(\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2}\right)_0 = b_3, \quad \left(\frac{\partial^2 \Delta H}{\partial t^2}\right)_0 = b_4 \quad \text{и} \quad \left(\frac{\partial \Delta N(t)}{\partial t}\right)_0 = b_5,$$

получим

$$\Delta \rho(t) - \frac{b_2}{b_1} \Delta H(t) = \frac{b_3 - \frac{b_2 b_4}{b_1}}{b_5} \int_0^t \Delta N(t') \exp\left(\frac{t'-t}{k_3}\right) dt'. \quad (18)$$

В этом уравнении неизвестной величиной является только коэффициент k_3 , который находится методом регрессионного анализа уравнения (18).

Подставляя найденное значение $\frac{\partial \rho}{\partial H}$ в уравнение (7), можно разрешить систему уравнений (7) – (9) относительно оставшихся коэффициентов реактивности $\alpha_T = \frac{\partial \rho}{\partial T}$, $\alpha_N = \left(\frac{\partial \rho}{\partial N}\right)_{A3}$ и $\alpha_p = \frac{\partial \rho}{\partial p}$. Для краткости вычислений введем следующие обозначения:

$$\begin{aligned} a_1 &= \Delta T_{\text{был}}^{(1)}, & a_2 &= \Delta N_T^{(1)}, & a_3 &= \Delta H, \\ a_4 &= \Delta T_{\text{был}}^{(2)}, & a_5 &= \Delta N_T^{(2)}, & a_6 &= \Delta T_{\text{был}}^{(3)}, \\ a_7 &= \Delta N_T^{(3)}, & a_8 &= \Delta p_1^{(3)}, & \alpha_{op} &= \frac{\partial \rho}{\partial H}. \end{aligned} \quad (19)$$

После подстановки введенных обозначений исходная система уравнений примет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} a_1\alpha_T + a_2\alpha_N + a_3\alpha_{op} &= 0, \\ a_4\alpha_T + a_5\alpha_N &= 0, \\ a_6\alpha_T + a_7\alpha_N + a_8\alpha_p &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

Определив из второго уравнения

$$\alpha_T = -\frac{a_5}{a_4}\alpha_N$$

и подставив его в первое уравнение, получим

$$\alpha_N = -\frac{a_3\alpha_{op}}{a_2 - \frac{a_1a_5}{a_4}}. \quad (21)$$

Барометрический коэффициент α_p найдем из третьего уравнения:

$$\alpha_p = \left(\frac{a_6a_5}{a_4a_8} - \frac{a_7}{a_8}\right)\alpha_N. \quad (22)$$

Таким образом, изложенная выше методика позволяет экспериментально найти все интересующие нас коэффициенты реактивности.

В соответствии с изложенной методикой расчета, эксперимент, выполненный по типовой программе ядерно-опасных экспериментов [2], дал следующие значения коэффициентов реактивности при $C_{\text{бор}} = 5,6$ г/кг: $\alpha_N = -2,92 \cdot 10^{-4} \%$ / МВт; $\alpha_T = -15,4 \cdot 10^{-3} \%$ / °С; $\alpha_p = 1,2 \cdot 10^{-3} \%$ / бар. Эти значения согласуются с нейтронно-физическими характеристиками типичных топливных загрузок реакторов ВВЭР-1000 [3].

Библиографический список

1. **Методики** расчета нейтронно-физических характеристик по данным физических экспериментов на энергоблоках атомных электростанций с реакторами ВВЭР-1000 (РД ЭО 0151-2004). – М.: Росэнергоатом, 2005.

2. РД ЭО 0150-2004. Типовые программы и методики проведения физических экспериментов на энергоблоках атомных электростанций с реакторами ВВЭР-1000. – М.: Росэнергоатом, 2005.

3. **Нейтронно-физические** характеристики 16-й топливной загрузки 2-го блока Калининской АЭС. – КаАЭС, 2008.

УДК 681.51:621.311.22

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕГУЛИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ

В.Д. Таланов, С.Б. Плетников, кандидаты техн. наук

Одним из способов повышения эффективности наладки типовых автоматических систем регулирования (АСР) в теплоэнергетике на этапе стендовых (отладочных) испытаний является более точная и полная адаптация систем к реальным условиям промышленной эксплуатации за счет применения эффективных моделей регулирующих, исполнительных и измерительных устройств систем автоматизации. При моделировании элементов АСР для целей наладки, таким образом, необходимо с большей степенью детализации описать те их свойства и характеристики, которые оказывают наибольшее влияние на качество работы системы в реальных условиях.

Для регулирования теплоэнергетических процессов на отечественных электростанциях применяются технические средства автоматизации различного аппаратно-технического исполнения – приборы серии ГСП, а также современные микропроцессорные средства отечественного и зарубежного производства.

Анализ современного состояния АСР в теплоэнергетике свидетельствует о преобладании в системах управления ТЭС и производственно-отопительных котельных аппаратных средств КАСКАД-1, 2, АКЭСР-1, 2 и др. По оценкам специалистов, количество только приборов серии АКЭСР, эксплуатируемых на объектах энергетики, составляет около 100 тыс. комплектов. В то же время последние 10 – 15 лет характеризуются широким внедрением в практику автоматизации в энергетике микропроцессорных контроллеров и программно-аппаратных комплексов.

Большинство авторов при решении задачи моделирования структуры АСР сводят ее к получению обобщенного алгоритма функционирования типовых регуляторов, например аналоговому ПИД-регулированию [1, 2]. Соответствие работы модели системы ее реальному прототипу оказывается значительно сниженным.

Ниже представлены модели элементов АСР, которые позволяют учитывать основные специфические особенности функционирования их реальных прототипов в промышленных условиях эксплуатации:

– аппаратных средств на примере регулирующего прибора серии АКЭСР-2;

– программируемых (микропроцессорных) средств на примере многофункционального прибора ПРОТАР-100.

Модель регулирующего устройства РП4-У-1М (АКЭСР-2). Модель релейно-импульсного регулятора реализует следующие функции регулирующего блока РП4-У-1М, входящего в состав комплекса аппаратуры АКЭСР-2:

- масштабирование входных сигналов;
- суммирование входных сигналов;
- введение задания и усиление сигнала отклонения (рассогласования) регулируемой величины от задания;
- демпфирование сигнала рассогласования;
- формирование выходного сигнала в соответствии с одним из следующих законов регулирования: пропорционально-интегральным совместно с исполнительным механизмом постоянной скорости; пропорциональным совместно с датчиком положения выходного органа исполнительного механизма; трехпозиционным или двухпозиционным;
- индикацию направления срабатывания.

Структурная схема модели показана на рис. 1.

Входные сигналы и сигнал задания поступают на входной сумматор, в котором происходит их алгебраическое суммирование и формируется сигнал рассогласования.

Сигнал рассогласования поступает на демпфер с регулируемой постоянной времени T_{ϕ} . С выхода демпфера сигнал рассогласования поступает на вход операционного усилителя-сумматора, выходной сигнал которого управляет трехпозиционным нуль-органом, имеющим регулируемую зону нечувствительности Δ . Операционный усилитель-сумматор и трехпозиционный нуль-орган охвачены функциональными обратными связями: гибкой отрицательной обратной связью, через инерционное звено и жесткой положительной обратной связью.

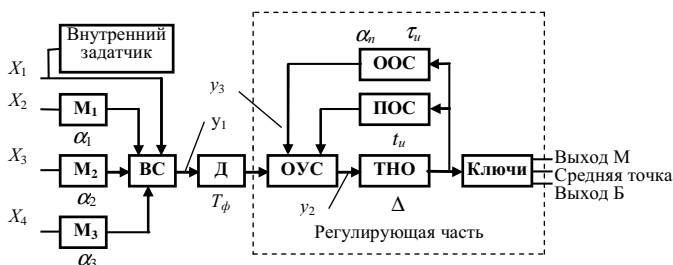


Рис. 1. Структурная схема модели регулирующего устройства РП4-У-М1: М1 – М3 – масштабаторы; ВС – входной сумматор (y_1 – контрольная точка); Д – демпфер; ОУС – операционный усилитель – сумматор (y_2 – контрольная точка); ТНО – трехпозиционный нуль-орган; ПОС – положительная обратная связь; ООС – отрицательная обратная связь (y_3 – контрольная точка)

При отключенной цепи отрицательной обратной связи прибор представляет собой трехпозиционное устройство с зоной нечувствительности и зоной возврата.

На выходе прибора формируются импульсы определенной скважности. Интегрирование этих импульсов при помощи исполнительного механизма постоянной скорости позволяет получить пропорционально-интегральный закон регулирования.

Изображение настроечной панели модели соответствует внешнему виду реального прибора и содержит элементы управления и настройки с аналогичными характеристиками (ключи управления, сигнальные лампы, переключки, дискретные переключатели) (рис. 2).

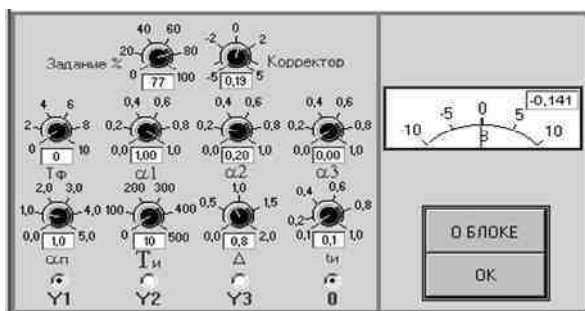


Рис. 2. Внешний вид настроечной панели блока РП4-У-1М

Модель многофункционального прибора ПРОТАР-100. Модель прибора ПРОТАР характеризуется наличием алгоритма импульсного

ПИД-регулирования с использованием модели широтно-импульсного модулятора (ШИМ) и блока ПДД²-регулирования (пропорционально-дифференциально-двойного дифференцирования) и реализацией всех заданных в прототипе функций, с возможностью их прикладного программирования.

Импульсное ПИД-регулирование и формирование сигнала рассогласования (F01). Сигнал рассогласования E формируется из демпфированного эквивалентного параметра P и двух составляющих задания Y_0 – исходного задания P_0 и оперативного задания d_0 :

$$E = \frac{1}{T_0 \cdot p + 1} \cdot P - Y_0, \quad (1)$$

где $Y_0 = P_0 + d_0$.

Блок самобалансировки вводит дополнительную составляющую в задание в ручном режиме:

$$Y_0 = P_0 + P_C + d_0, \quad (2)$$

где P_C – составляющая основного задания, вводимая блоком балансировки, причем $P_C = P - (P_0 + d_0)$, если $t_C > 0$; $P_C = 0$, если $t_C = 0$, где t_C – постоянная времени компенсации.

Блок ПДД²-регулирования не пропускает на свой вход сигнал, значения которого находятся внутри установленной зоны нечувствительности δ .

Выходной сигнал алгоритма $E^1 = 0$ при $|E| < \delta / 2$.

При $|E| > \delta / 2$ выходной сигнал алгоритма связан с сигналом рассогласования ПДД²-зависимостью и ограничен по верхнему уровню величиной +0,22 %, а по нижнему уровню величиной –0,22 %:

$$E^1 = E \times C_1 \times \frac{T_0}{T_0 \times p + 1} \left(p + \frac{1}{t_1} + \frac{C_d \times t_d \times p^2}{t_d \times p + 1} \right), \quad (3)$$

где C_1 – коэффициент пропорциональности; t_1 – постоянная времени интегрирования; C_d – коэффициент дифференцирования; t_d – постоянная времени дифференцирования; T_0 – время цикла.

Широтно-импульсный модулятор осуществляет преобразование переменной E^1 в скважность импульсов. Время импульса определяется переменной dt , время паузы – переменной t_1 , скважность импульсов пропорциональна отношению C_1/t_1 .

Выход интегратора ШИМ формирует сигнал

$$Y^1 = \frac{1}{T_0 \cdot p} (E^1 - 0,22 \cdot Z). \quad (4)$$

Аналоговое ПИД-регулирование и формирование сигнала рассогласования (F02). Блок ПИД не пропускает на свой вход сигнал, значения которого находятся внутри установленной зоны нечувствительности δ .

Выходной сигнал алгоритма $Y^1 = 0$ при $|E| < \delta / 2$.

При $|E| > \delta / 2$ выходной сигнал алгоритма связан с сигналом рассогласования ПИД-зависимостью

$$Y^1 = E \cdot C_1 \cdot \left(1 + \frac{1}{t_1 \cdot p} + \frac{C_d \cdot t_d \cdot p}{t_d \cdot p + 1} \right), \quad (5)$$

где C_1 – коэффициент пропорциональности; t_1 – постоянная времени интегрирования; C_d – коэффициент дифференцирования; t_d – постоянная времени дифференцирования.

Кроме рассмотренных наиболее ответственных и сложно реализуемых функций F01 и F02 в модели прибора реализованы:

- F00 – ввод-вывод информации, конец программы;
- F10, F11, F12 – интегратор задания с управлением сигналами;
- F13 – кусочно-линейное преобразование;
- F14 – широтно-импульсное преобразование двухпозиционное;
- F15 – широтно-импульсное преобразование трехпозиционное;
- F16, F17, F18 – масштабирование и демпфирование сигналов;
- F19 – масштабирование и дифференцирование сигналов;
- F20 – F24 – группа функций, используемых многократно.

Модели регулирующих устройств представляют собой эмуляторы, реализованные в программной среде графического программирования LabVIEW 5.0, и могут применяться в составе различных программных и программно-аппаратных комплексов [3].

Для обеспечения требуемых функций моделей необходимо грамотно и эффективно организовать их работу. При построении программно-аппаратной структуры системы необходимо обеспечить многократное использование модулей некоторых элементов, причем каждый раз они должны работать с новыми данными, т.е. в одном цикле

расчета на модели обрабатывается информация для различных однотипных элементов структуры. Например, в структуре двухконтурной АСР с корректирующим и стабилизирующими регуляторами модуль релейно-импульсного регулирующего устройства может быть использован дважды. При этом необходимо обеспечить корректную запись и хранение соответствующей информации.

С этой целью были разработаны специальные алгоритмы функционирования типовых элементов АСР и реализованы в графической среде программирования LabVIEW. Модели элементов построены по единой технологии и включают два взаимосвязанных модуля: «Настройка элемента АСР» и «Модель элемента АСР» [4]. Структуры алгоритмов приведены на рис. 3.

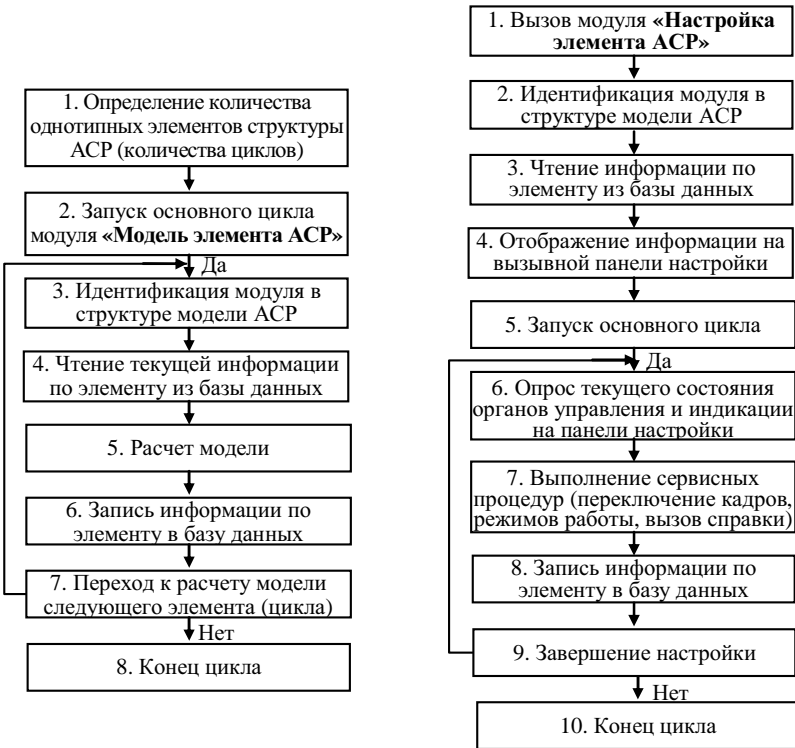


Рис. 3. Обобщенный алгоритм работы модели элемента АСР

Можно отметить, что в состав обеих структур входят общие алгоблоки, но имеются и отличительные особенности. Так, функционирование модулей «Модель элемента АСР» реализовано с использованием цикла с ограниченным количеством шагов по числу элементов (цикл FOR), а алгоритм модулей «Настройка элемента АСР» использует цикл с выходом по команде «Завершение настройки» (цикл While). Кроме того, его главной особенностью является работа с экранными формами отображения информации (положение органов управления и индикации на настроечных панелях).

Модули «Модель элемента АСР» являются основными, они функционируют постоянно с заданными параметрами модели. Модули «Настройка элемента АСР» обеспечивают изменение параметров функционирования модели элемента и применяются в случае необходимости коррекции заданных параметров.

Использование разработанных моделей в составе специализированных программных комплексов позволило повысить эффективность проектно-наладочных работ в плане приближения результата предварительной настройки на модели АСР к установленным (регламентируемым) критериям (показателям) качества работы реальной системы регулирования.

Кроме того, можно отметить, что разработанные модели (эмуляторы) регулирующих устройств являются действующими, и при соответствующей аппаратной поддержке возможно их использование с реальными ИМ (на лабораторных стендах или действующем оборудовании).

Библиографический список

1. **Моделирование** автоматических регуляторов энергоблока 300 МВт Костромской ГРЭС / В.С. Рабенко [и др.] // Повышение эффективности теплоэнергетического оборудования: мат-лы рос. науч.-практ. конф. / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2000. – С. 45 – 46.
2. **Моделирование** объекта и автоматических систем регулирования мощности и тепловой нагрузки теплофикационной турбины / Н.И. Давыдов [и др.] // Теплоэнергетика. – 1998. – № 10. – С. 2 – 12.
3. **Особенности** моделирования теплоэнергетических объектов в среде LabVIEW / В.Д. Таланов, А.Ю. Мурзин, С.Б. Плетников // Повышение эффективности теплоэнергетического оборудования: мат-лы III науч.-практ. конф. / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2002. – С. 244 – 247.
4. **Технология** создания программно-аппаратных комплексов для наладки регуляторов теплоэнергетического оборудования / С.Б. Плетников, В.Д. Таланов, А.М. Демин // Повышение эффективности работы теплоэнергетического оборудования: мат-лы IV Всерос. науч.-практ. конф. / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2005. – С. 161 – 165.

УДК 681.3

ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ГАЗОТУРБИННЫХ И ПАРОГАЗОВЫХ УСТАНОВОК ТЭС С ПРИМЕНЕНИЕМ ПЭВМ

*Б.Л. Шелыгин, канд. техн. наук, А.В. Мошкарин, д-р техн. наук,
Н.С. Асташов, инж.*

С углублением процессов электрификации производственной и коммунально-бытовой сфер, развитием электротехнологий, согласно прогнозам, спрос на электроэнергию как наиболее удобный энергоноситель будет возрастать опережающими темпами по сравнению с другими энергоресурсами.

В настоящее время около 20 млн кВт всех мощностей электроэнергетики выработали свой эксплуатационный ресурс. В зависимости от масштабов экономического развития России, для надежного обеспечения потребностей страны в энергии необходим ввод новых электроэнергетических мощностей в размере 34 – 37 млн кВт к 2010 г. и 80 – 130 млн кВт к 2020 г.

Одним из главных направлений стратегии развития теплоэнергетики страны на период до 2020 г. является техническое перевооружение ТЭС и ввод новых генерирующих мощностей на базе прогрессивных технологий, преимущественно с использованием газотурбинных (ГТУ) и парогазовых (ПГУ) установок, оснащенных котлами-утилизаторами (КУ).

Определяющим является масштабный ввод ГТУ (4 млн кВт) и особенно высокоэкономичных ПГУ (23 млн кВт), что обеспечит около 27 % мощности всех вводимых тепловых электростанций. Около 57 % вводимой мощности ПГУ и ГТУ идет на замену демонтируемых и реконструируемых энергомощностей, две трети вводимых ПГУ приходятся на 2011 – 2015 гг.

Продолжительность строительства ПГУ составляет 1 – 3 года, что в 3 – 6 раз быстрее по сравнению с вводом в эксплуатацию паротурбинных установок и АЭС.

В 2005 г. доля числа часов использования установленных мощностей ГТУ и ПГУ в общей структуре электростанций составляла 24,6 %. К 2015 г. ожидается дополнительное повышение этой характеристики до 30,5 %, что существенно увеличит роль указанных установок в общем энергобалансе России.

Применение парогазовых установок, таких как ПГУ-325 или ПГУ-450, позволяет уменьшить удельные расходы топлива на

25 – 30 % по сравнению с наиболее совершенными паровыми энергоблоками сверхкритического давления. Еще более эффективными ПГУ могут быть при комбинированном производстве электрической и тепловой энергии.

Поэтому изучение схем и особенностей ГТУ и ПГУ, отдельных элементов и протекающих в них процессов при подготовке специалистов представляет актуальную задачу.

Наиболее эффективным методом обучения считается применение компьютерных технологий. При отсутствии достаточного учебно-методического материала на кафедре ТЭС ИГЭУ разрабатывается программный продукт (автоматизированная обучающая система) «Котлы-утилизаторы парогазовых установок ТЭС».

Ниже представлена первая, вводная, часть компьютерного учебника, посвященная эффективному изучению работы ГТУ и ПГУ электростанций.

Компьютерный учебник выполняется в операционной системе Windows с использованием графического редактора Corel Draw. Анимация разработана в среде Flash Macromedia с применением средств пакета Microsoft Office.

Представленный автоматизированный обучающий курс включает в себя следующие обучающие модули:

- общие особенности ГТУ;
- подготовка газового топлива к сжиганию в камерах сгорания ГТУ;
- парогазовые установки ТЭС.

В разделе «Общие особенности ГТУ» дается характеристика энергоустановки и описание процесса ее рабочего цикла [4, 5]. Приводятся варианты конструкций камер сгорания (КС) ГТУ и общая схема секционной КС с обозначением потоков сред и их рабочих параметров (рис. 1). Представлены зависимости для расчета значений мощности, расходуемой на привод компрессора ГТУ, и температуры воздуха за ним, а также графические зависимости температур в зоне горения КС ϑ_2 от значений коэффициента избытка воздуха в КС и теплоты сгорания Q_p^h сжигаемого топлива (рис. 2).

Приводится уравнение теплового баланса КС ГТУ и детально изучаются его составляющие. Расчетами [6] установлено, что при $Q_p^h = 29 - 46$ МДж/кг с увеличением α_c от 1,04 до 1,1 значение ϑ_2 снижается в пределах 1940 – 2160 °С.

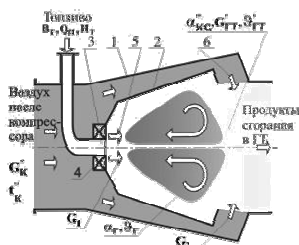


Рис. 1. Схема работы секционной КС: 1 – корпус КС; 2 – планенная труба; 3 – подвод топлива; 4 – завихритель первичного воздуха; 5 – воздух, поступающий в зону активного горения топлива; 6 – воздух, поступающий на расхолаживание продуктов сгорания КС перед газовой турбиной

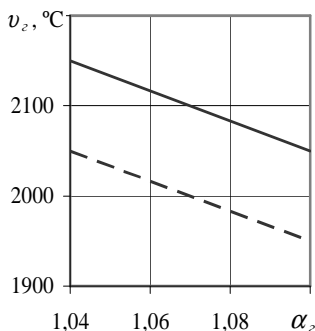


Рис. 2. Изменение температуры в зоне горения КС в зависимости от коэффициента избытка воздуха в зоне горения α и теплоты сгорания топлива: — — — — — $Q_n = 46 \text{ МДж/кг}$; — — — — — $Q_n = 29 \text{ МДж/кг}$

пуск электрической энергии составляет 0,34 – 0,51 кг у. т/кВт·ч.

В модуле «Подготовка газового топлива к сжиганию в КС ГТУ» детально изучаются:

- особенности сжигаемого в ГТУ природного газа и его продуктов;
- общая характеристика газового хозяйства ГТУ;
- схема блочного узла учета и очистки газов;
- схема дожимной компрессорной станции;
- схема подготовки топливного газа (рис. 4);

По условию надежной работы металла элементов газовой турбины, температура газов перед ГТ должна быть снижена до $t_{гм}' = 1000 - 1300 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Это достигается расхолаживанием продуктов сгорания за счет подачи за КС дополнительного воздуха. При этом коэффициент избытка воздуха в продуктах сгорания за КС составляет 3,0 – 4,0 (рис. 3).

Объясняется понятие электрического КПД ГТУ брутто.

Фирмой Siemens разработан ряд конструкций ГТУ мощностью 60 – 200 МВт [4], значения КПД которых находятся в пределах 30 – 35 %. В частности, при температуре газов перед ГТ 1040 $^\circ\text{C}$ и на выходе 538 $^\circ\text{C}$, расходах воздуха 355 кг/с, топлива 6,23 кг/с и степени сжатия воздуха в компрессоре 10,6 КПД ГТУ в автономном режиме равен 33,1 %. При этом с учетом доли энергозатрат на собственные нужды энергоустановки удельный расход условного топлива на отпуск электрической энергии составляет 0,34 – 0,51 кг у. т/кВт·ч.

- общие требования к элементам системы газоснабжения;
- меры безопасности при эксплуатации систем газоснабжения.

Как известно [2 – 4], при всех достоинствах ГТУ (небольшие размеры и стоимость, высокая маневренность) для них характерны низкие значения КПД и высокий удельный расход топлива.

Эффективность использования в энергоустановках теплоты сжигаемого в КС топлива может быть достигнута за счет установки на ТЭС парогазовых установок. В случае утилизации теплота уходящих из ГТУ газов при температурах 500 – 600 °С может использоваться для выработки пара высоких параметров.

Показана целесообразность надстройки цикла Брайтона (цикл ГТУ) циклом Ренкина (цикл ПГУ) [3 – 5].

В энергетике реализован ряд тепловых схем ПГУ, имеющих особенности технологических процессов. Наибольшее распространение получили ПГУ с котлами-утилизаторами. В этих установках значительная часть теплоты уходящих из ГТУ газов передается рабочей среде водопарового тракта ПТУ на нагрев воды, парообразование и перегрев пара до требуемых параметров.

В уходящих из ГТУ газах при $\alpha_{\text{вх}} = 2,5 - 4,0$ концентрация кислорода достигает значений $O_2 = 13 - 16 \%$, что позволяет использовать дан-

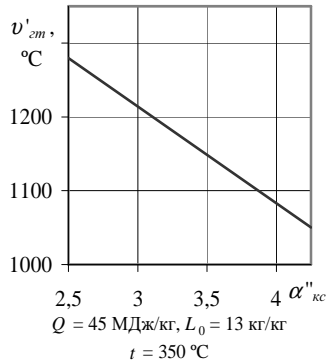


Рис. 3. Изменение температуры газов за КС в зависимости от коэффициента избытка воздуха в продуктах сгорания

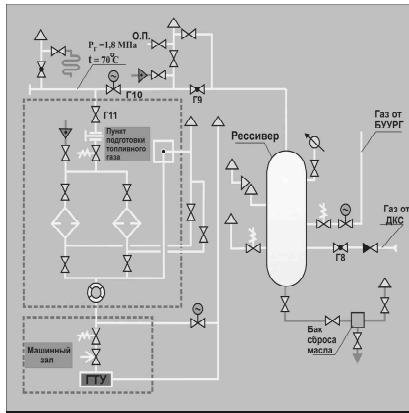


Рис. 4. Пункт подготовки топливного газа

ную среду в качестве окислителя дополнительно сжигаемого топлива. Поэтому в целях повышения температуры пара за КУ в схему ПГУ включается КС дополнительного топлива [4].

Представлен вариант и описание бездеаэрационной схемы ПГУ с циклом одного давления рабочей среды, в которой КУ барабанного типа содержит три поверхности нагрева (экономайзерную, испарительную и пароперегревательную).

Так как температура конденсата за ПТ ниже 45 °С, для предотвращения низкотемпературной коррозии экономайзера необходим предварительный нагрев питательной воды:

- путем рециркуляции части нагретой в низкотемпературной поверхности воды;
- за счет поверхностного подогревателя конденсата с использованием пара низкого давления ПТ.

Показано, что противоречия и недостатки рассмотренного варианта устраняются предложением двухконтурных схем ПГУ (рис. 5) двух давлений рабочей среды [1 – 4].

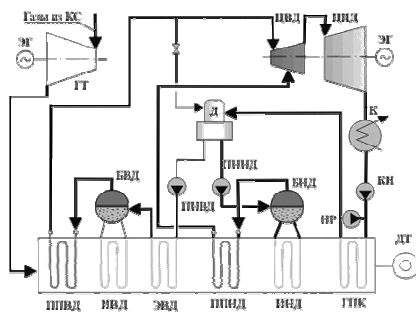


Рис. 5. Двухконтурная схема ПГУ

При этом повышенная сложность энергоустановки компенсируется наилучшими технико-экономическими показателями. Контуры высокого и низкого давлений не связаны между собой по пару. Питательная вода в контуры подается насосами ПНВД и ПННД. В состав данного варианта ПГУ входит котел-утилизатор (например, марки П-88 с горизонтальной компоновкой поверхностей нагрева). Конденсат турбины, предварительно нагреваемый в ГПК, направляется в деаэратор Д.

После ППВД перегретый пар с $p_{ПЕ} = 7,3$ МПа и $t_{ПЕ} = 481$ °С направляется в ЦВД паровой турбины. Для повышения экономичности установки в среднюю часть ЦВД подается пар из ППНД с параметрами $p_{ПЕ} = 0,7$ МПа, $t_{ПЕ} = 227$ °С.

Использование для выработки пара двухконтурного КУ позволяет снизить температуру уходящих газов до 105 – 120 °С (рис. 6) при повы-

шении КПД ПГУ до 52 % . В случае ПГУ с трехконтурным КУ и с температурой газов на входе t_{KV} до 1350 °С температура газов за КУ может быть снижена до 90 – 100 °С при повышении КПД ПГУ до 59 % .

По окончании изучения всех разделов пользователю программным продуктом предлагаются контрольные вопросы для оценки знаний усвоенного материала. На основании протокола руководитель занятий выставляет заслуженные оценки.

Программный продукт предназначен для занятий со студентами теплоэнергетических специальностей. Материал может использоваться в учебных центрах при подготовке и переподготовке специалистов энергетических предприятий.

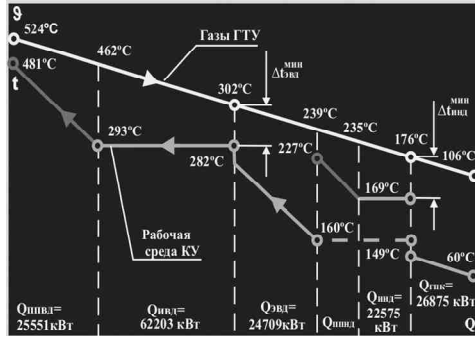


Рис. 6. Изменение температур газов и рабочей среды в зависимости от тепловосприятий поверхностей нагрева двухконтурного КУ марки П-88

Библиографический список

1. **Мошкарин, А.В.** Состояние и перспективы развития энергетики Центра России / А.В. Мошкарин, А.М. Смирнов, В.И. Ананьин; под ред. А.В. Мошкарин / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново: Центрэнерго, 2000.
2. **Мошкарин, А.В.** Анализ направлений отечественной теплоэнергетики / А.В. Мошкарин [и др.]; под ред. А.В. Мошкарин / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2002.
3. **Мошкарин, А.В.** Основы энергетики: курс лекций для студентов энергетических вузов / А.В. Мошкарин [и др.]; под ред. А.В. Мошкарин. В 2 ч. – Ч. 1. Теплоэнергетика / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». – Иваново, 2005.
4. **Цанев, С.В.** Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций: учеб. пособие для вузов / С.В. Цанев, В.Д. Буров, А.Н. Ремезов; под ред. С.В. Цанева. – М.: МЭИ, 2002.
5. **Щукин, А.А.** Теплотехника /А.А. Щукин [и др.]; под ред. И.Н. Сушкина. – М.: Металлургия, 1973.
6. **Доверман, Г.И.** Расчет котельных агрегатов с использованием современных программных продуктов: учеб. пособие / Г.И. Доверман, Б.Л. Шельгин, А.В. Мошкарин, Ю.В. Мельников; ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». – Иваново, 2007.

УДК 536. 24:621.184. 53

ДИНАМИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ ТЕПЛООБМЕНА В РЕГЕНЕРАТИВНЫХ ВОЗДУХОПОДОГРЕВАТЕЛЯХ

*С.Н. Кадников, д-р техн. наук, М.Ю. Ометова, канд. техн. наук,
Г.В. Рыбкина, инж.*

Применение регенеративных воздухоподогревателей в различных отраслях промышленности обеспечивает эффективное энергосбережение, что особенно актуально в связи с быстрым ростом цен на энергоносители. Однако на практике полностью реализовать их технологические возможности не удается, что объясняется недостаточной точностью методик проектирования регенераторов. В известных приближенных методиках [1, 6] расчет ведется в предположении о стационарности режимов теплообмена, что приводит к ошибкам при определении их конструктивных и технологических параметров. Как показывает математическое моделирование с использованием современных численных методов, при проектировании необходимо учитывать динамику процессов теплообмена, которая играет в регенераторах весьма существенную роль.

С целью обосновать это утверждение рассмотрим результаты математического моделирования процессов теплообмена в регенеративном теплообменнике с использованием дифференциальных уравнений в частных производных. В качестве расчетной области использовалась одна секция регенеративного воздухоподогревателя с учетом ее симметрии при следующих размерах [1]: высота 2 м, ширина шахты (сторона квадрата) $a = 100$ мм, толщина кирпичной насадки $b = 60$ мм. Теплоносителем являлась смесь $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{N}_2$ с температурой $T_m = 900$ °С, при начальной температуре дутья (воздуха) 20 °С. Расчет проводился с учетом переходного процесса установления режима нагрева насадки при заданной температуре газа на выходе из шахты 400 °С и дутья – 500 °С. Рассматривался режим противотока при скорости движения газов и воздуха $V = 1$ м/с. Математическая модель включала уравнение теплопроводности в насадке (кирпиче)

$$\frac{\partial T_n}{\partial t} = a_n \left[\frac{\partial^2 T_n}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_n}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_n}{\partial z^2} \right] \quad (1)$$

и уравнение энергии в теплоносителе (в воздухе в режиме охлаждения использовалось аналогичное уравнение)

$$\frac{\partial T_m}{\partial t} + V \frac{\partial T_m}{\partial z} = \frac{1}{c_p \rho} \left[\lambda(z) \frac{\partial^2 T_m}{\partial x^2} + \lambda(z) \frac{\partial^2 T_m}{\partial y^2} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda(z) \frac{\partial^2 T_m}{\partial z^2} \right) \right]. \quad (2)$$

Зависимость теплофизических параметров c_p , ρ , λ от температуры устанавливалась по средним значениям температуры газов по длине шахты в установившемся режиме работы теплообменника. Зависимость $\lambda(z)$ для газов определялась с учетом увеличения степени турбулизации потока газа на начальном участке шахты (прямоугольного канала) [2]. При этом на участке стационарного турбулентного движения для смеси $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{N}_2$ теплопроводность λ принималась равной 0,4 Вт/(м·К), для воздуха – 0,5 Вт/(м·К). Эти значения были определены с учетом средней температуры теплоносителя ≈ 625 °С, воздуха ≈ 310 °С в стационарном режиме работы теплообменника.

Процесс теплообмена между теплоносителем и насадкой моделировался граничными условиями вида

$$\lambda_n \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha_k (T - T_1) + q_{\text{изл}}, \quad (3)$$

где λ_n – коэффициент теплопроводности насадки, Вт/(м·К); T_1 – температура поверхности кирпича (стенки); α_k – коэффициент конвективного теплообмена, Вт/(м²·К); $q_{\text{изл}}$ – плотность теплового потока излучения газа, Вт/м² [3]:

$$q_{\text{изл}} = \frac{c_0 \left[\varepsilon_z \left(\frac{T_i}{100} \right)^4 - \varepsilon_c \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 \right]}{\frac{1}{\varepsilon_z / \varepsilon_z^\infty} - \frac{1}{\varepsilon_c} - 1}, \quad (4)$$

где $\varepsilon_z^\infty, \varepsilon_c^\infty$ – предельные степени черноты газа и стенки [3]; $\varepsilon_z, \varepsilon_c$ – коэффициенты теплового излучения соответственно при температуре газа и стенки; c_0 – излучательная способность черного тела, Вт/(м²·К⁴).

Возможность такого способа учета энергии излучения газа обусловлена тем, что поток газовой смеси, имеющий степень черноты порядка 0,1 [4] при данных поперечных размерах шахты и давлении, близком к нормальному, можно считать оптически прозрачной средой [4]. В этих условиях поглощение газом энергии излучения можно не учитывать, по-

скольку самонагрев газа в этих условиях будет мал. В качестве температуры T_i использовалась средняя температура частичного объема газа прямоугольного сечения, примыкающего к точке, в которой определяется граничное условие (2). Кроме теплопередачи через основные рабочие поверхности насадки, в данной модели учитывались такие же потоки тепла через ее торцы. Для этого применялись граничные условия конвективного типа, причем в качестве внешней температуры принималась средняя температура газа (теплоносителя, воздуха) по торцевому сечению шахты.

С использованием данной модели моделировался как процесс установления, так и квазистационарный режим работы регенератора. Учитывалось время переключения между периодами нагрева и охлаждения, которое принималось равным 10 с. Режим считался установившимся, если время периодов нагрева и охлаждения различалось не более чем на 5 %.

Численная реализация данной модели была осуществлена методом сеток [5] с применением явных схем аппроксимации, адекватно отражающих динамический процесс теплообмена. Контроль точности проводился по балансу тепловой энергии.

В результате численных экспериментов была получена следующая картина тепловых процессов в регенераторе.

В начале первого периода нагрева возникает короткий динамический волновой процесс (с длительностью ≈ 2 с), в течение которого дымовой газ охлаждается с 900 °С на входе шахты до 250 °С на выходе (рис. 1).

Одновременно насадка нагревается на 16 % от максимальной величины, т.е. довольно заметная часть тепловой энергии от газа к насадке передается с большой скоростью. Затем после окончания волнового процесса начинается процесс медленного нагрева насадки с постепенным увеличением температуры газа на выходе шахты. Первоначальный период нагрева составляет около 1 ч и значительно превышает соответствующий период нагрева в установившемся режиме. После окончания первого периода нагрева в течение 10 с происходит перекидка клапанов. В течение этого интервала времени газ в шахте остается неподвижным, продолжая отдавать свою энергию насадке. После этого в режиме противотока начинается короткий (≈ 2 с) волновой процесс нагрева воздуха (рис. 2). Волна холодного воздуха проникает в шахту и выталкивает горячий теплоноситель. В конце этого отрезка времени по всей длине шахты устанавливается квазистационарное распределение температуры, меняющееся от 20 до 520 °С. Это ключевой интервал, в течение которого воздух нагревается до максимальной температуры в начале шахты. Именно эта максимальная температура воздуха (дутья) и определяет основной показатель работы регенератора – дли-

тельность подачи дутья. После окончания волнового процесса начинается медленное охлаждение дутья до заданного температурного уровня (450 °С). После этого происходит следующая перекидка клапанов и начинается новый цикл нагрева и охлаждения. В установившемся режиме, который возникает по окончании 6 – 7 периодов (для данного типа регенератора), время нагрева составляет 5,2 мин и время охлаждения – 5 мин. Картина динамического и теплового процесса в последующих периодах в качественном смысле повторяет картину первого цикла.

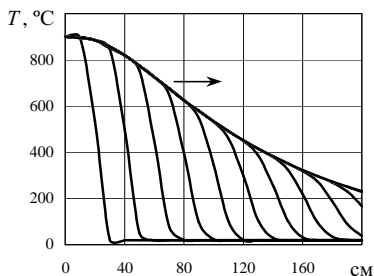


Рис. 1. Динамика движения волны газа в течение первых 2 с первого этапа нагрева

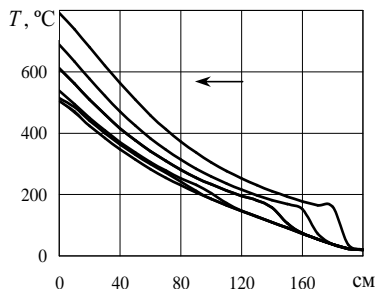


Рис. 2. Динамика движения волны воздуха в течение первых 2 с первого этапа охлаждения

На рис. 3, 4 представлены графики распределения температур теплоносителей вдоль шахты для различных моментов времени. Они показывают, что в установившемся режиме работы регенератора температуры теплоносителей зависят от времени. Из этого следует, что для данного типа регенератора характерен динамический или квазистационарный режим работы.

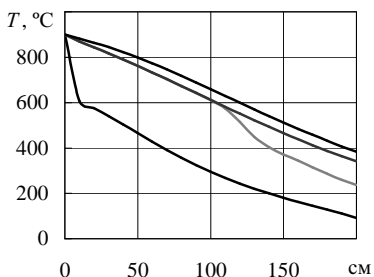


Рис. 3. Распределение температур горячего теплоносителя вдоль шахты для различных моментов времени с интервалом 75 с в стационарном режиме

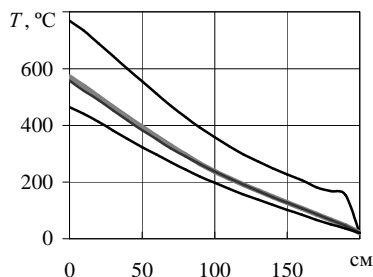


Рис. 4. Распределение температуры дутья вдоль шахты для различных моментов времени с интервалом 75 с в стационарном режиме

На рис. 5 представлены зависимости от времени усредненных по выходному сечению шахты значений температур насадки, теплоносителя и дутья. Их анализ показывает, что максимальная скорость теплообмена достигается на коротких отрезках времени (≈ 2 с). Кроме этого, на основных отрезках времени нагрева и охлаждения зависимость температур от времени является почти линейной, что может быть использовано при построении приближенных методик.

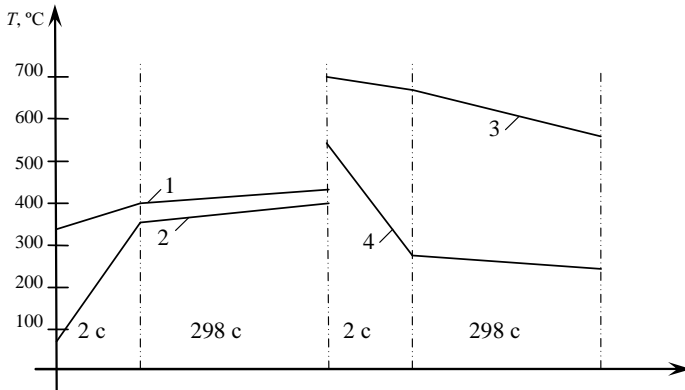


Рис. 5. Зависимости усредненных температур насадки (1), (3), теплоносителя (2) и дутья (4) от времени

Заключение

Результаты исследования динамических режимов, проведенные на разработанной математической модели, показали, что при проектировании регенеративных теплообменников необходимо учитывать динамику процессов теплообмена. Это обусловлено тем, что в начале периода нагрева за относительно короткий отрезок времени (≈ 2 с), значительно меньший периода нагрева (≈ 300 с), происходит передача ≈ 16 % общей тепловой энергии теплоносителя в шахте. В то же время в начале периода охлаждения в течение такого же короткого отрезка времени достигается максимальная температура дутья, которая в течение периода охлаждения (≈ 300 с) уменьшается до заданного расчетного значения (450 °C). Следует отметить, что эти закономерности можно выявить только при использовании математических моделей, основанных на современных численных методах.

Библиографический список

1. **Лемлех, И.М.** Высокотемпературный нагрев воздуха в черной металлургии / И.М. Лемлех, В.А. Гордин. – М.: Металлургиздат, 1983. – 357 с.
2. **Кутателадзе, С.С.** Основы теории теплообмена / С.С. Кутателадзе. – Новосибирск: Наука, Сибирск. отд-ние, 1970. – 660 с.
3. **Ключников, А.Д.** Теплопередача излучением в огнетехнических установках / А.Д. Ключников, Г.П. Иванцов. – М.: Энергия, 1970. – 400 с.
4. **Блох, А.Г.** Теплообмен излучением: справочник / А.Г. Блох, Ю.А. Журавлев, Л.Н. Рыжков. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 432 с.
5. **Самарский, А.А.** Теория разностных схем / А.А. Самарский. – М.: Наука, 1977. – 360 с.
6. **Хаузен, Х.** Теплопередача при противотоке, прямотоке и перекрестном токе: пер. с нем. / Х. Хаузен. – М.: Энергоиздат, 1981. – 384 с.