

# СЕКЦИЯ ТЕПЛОВЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ

## ПЕРЕЧЕНЬ ДОКЛАДОВ

### **ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КПД КОТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА ПО МЕТОДИКЕ М.Б. РАВИЧА ПРИ СЖИГАНИИ РАЗЛИЧНЫХ ТОПЛИВ**

Джежора С.Н.  
Научный руководитель – к.т.н., доцент Тарасевич Л.А.

### **УЧАСТИЕ ТЕПЛОФИКАЦИОННОГО ЭНЕРГООБЛОКА В РЕГУЛИРОВАНИИ ЧАСТОТЫ И МОЩНОСТИ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ**

Иванов А.В.  
Научный руководитель – к.т.н., доцент Качан С.А.

### **СИСТЕМА КОМПЕНСАЦИИ ДАВЛЕНИЯ I КОНТУРА ВВЭР-1000**

Лешок В.И.  
Научный руководитель – к.т.н., доцент Чиж В.А.

### **ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТОПЛИВА НА АЭС С РЕАКТОРАМИ ВВЭР**

Исаев М.Ш., Бычкова Д.Н.  
Научный руководитель – к.т.н., доцент Качан С.А.

### **ПРОЕКТ ТЭЦ МОЩНОСТЬЮ 500МВт С РАЗРАБОТКОЙ САР ТЕМПЕРАТУРЫ СЕТЕВОЙ ВОДЫ**

Кулик К.Ю.  
Научный руководитель – к.э.н., старший преподаватель Кравченко В.В.

### **ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОЧИСТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ НАГРЕВА**

Яцко М.А.  
Научный руководитель – к.т.н., доцент Тарасевич Л.А.

### **ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОТОПИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ**

Яцко М.А.  
Научный руководитель – к.т.н., доцент Тарасевич Л.А.

### **ПОДЗЕМНОЕ ЗАХОРОНЕНИЕ ТВЕРДЫХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ**

Хроян В.В., Масюкевич А.С.  
Научный руководитель – к.т.н., доцент Качан С.А.

### **РАЗРАБОТКА АСР ТЕМПЕРАТУРЫ ПРЯМОЙ СЕТЕВОЙ ВОДЫ ДЛЯ МИНИ-ТЭЦ С ГПА**

Мышленник М.А.  
Научный руководитель – старший преподаватель Бузов А.Л.

### **АСР УРОВНЯ В БАРАБАНЕ КОТЛА НА АППАРАТУРЕ КР-500**

Букрей Т.С.  
Научный руководитель – к.э.н., старший преподаватель Кравченко В.В.

### **ПРОБЛЕМЫ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**

Мурашко В.Д.  
Научный руководитель – к.т.н., доцент Герасимова А.Г.

### **ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ**

Нестерова М.В.  
Научный руководитель – старший преподаватель Пантелей Н.В.

### **ВНЕДРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ВИБРОМОНИТОРИНГА ОСНОВНОГО И ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ТУРБИННОГО ЦЕХА**

Перевязчикова Д.А.  
Научный руководитель – старший преподаватель Пантелей Н.В.

**ПРОЕКТ ПРОМЫШЛЕННО-ОТОПИТЕЛЬНОЙ ТЭЦ С РАЗРАБОТКОЙ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ НЕПРЕРЫВНОЙ ДВУХСТУПЕНЧАТОЙ ПРОДУВКИ**

Рыбак А.А.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ – К.Э.Н., СТАРШИЙ ПРЕПОДАВАТЕЛЬ КРАВЧЕНКО В.В.

**СПЕЦВОДОЧИСТКА**

Черник А.И.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ – Д.Т.Н., ПРОФЕССОР КАРНИЦКИЙ Н.Б.

УДК 621.182

## ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КПД КОТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА ПО МЕТОДИКЕ М.Б. РАВИЧА ПРИ СЖИГАНИИ РАЗЛИЧНЫХ ТОПЛИВ

Джежора С.Н.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Тарасевич Л.А.

Составление теплового баланса по результатам периодически проводимых теплотехнических испытаний каждого котельного агрегата является частью общей задачи нормирования, учета и расхода топлива котельной установкой. Данные теплового баланса представляют характеристику экономичности котла. Объективность оценки определения КПД котлоагрегата является важным стимулом экономии топливно-энергетических ресурсов.

Существующие общие положения о порядке учета и контроля ТЭР не регламентируют методы анализа технического состояния и эффективности работы оборудования. Выбор методик обработки результатов теплотехнических испытаний осуществляется согласованным решением инженерно-технического персонала предприятия и специализированной наладочной организацией.

При определении КПД по различным методикам, как правило, получается неполное соответствие результатов. При использовании одних и тех же данных измерений невязка теплового баланса при подсчете КПД по различным формулам составляет обычно 0,2–0,3 %, а в некоторых случаях может достигать 1,0–1,5 %.

Таким образом, при неудовлетворительном выборе расчетного алгоритма оценка эффективности отдельных мероприятий по экономии топливно-энергетических ресурсов может оказаться искаженной.

В большинстве случаев по результатам теплотехнических испытаний котлоагрегата при определении КПД используется методика М.Б. Равича. В основе метода М.Б. Равича лежит ряд преобразований уравнений определения потерь с уходящими газами ( $q_2$ ) и потерь химической неполноты сгорания ( $q_3$ ).

Определение потерь  $q_4$ ,  $q_5$ ,  $q_6$  не отличается от нормативного метода. Определение КПД котлоагрегата вычисляется по обратному балансу.

Исходная идея преобразования уравнения определения потерь с уходящими газами заключается в формальной замене весьма малостабильной величины – теплоты сгорания топлива – значительно более постоянной для определения групп топлив характеристикой – жаропроизводительностью.

В этом случае формула М.Б. Равича определения потерь с уходящими газами имеет вид

$$q_2 = \frac{t_{yx} - l \cdot t_{ex}}{t_{\max}} \cdot [C' + (m - 1) \cdot B \cdot K'] \cdot 100$$

где  $m$  – коэффициент разбавления продуктов сгорания воздухом;

$l$ ,  $B$  – усредненные характеристики топлива, определяются по таблицам в зависимости от вида топлива;

$C'$ ,  $K'$  – поправочные коэффициенты, зависят от температуры продуктов сгорания;

$t_{\max}$  – индивидуальная топливная характеристика.

Таким образом, вместо громоздких вычислений удельных объемов и энтальпий продуктов сгорания в данном методе используются две обобщенные характеристики  $t_{\max}$  и  $B$  и два табличных параметра.

Однако рациональность исходной идеи скомпрометирована рядом искусственных упрощений, вводимых автором метода с целью сохранения компактности расчетной формулы для  $q_2$ . По приведенным в работе [1] оценкам сжигания газообразных топлив и мазута в сопоставлении с нормативным методом среднее отклонение  $\Delta q_2$  в сторону преуменьшения составляет 0,17 %, в сторону преувеличения – 0,13 %. Соответственно с

обратным знаком вносится методическая погрешность в оценку фактического КПД топливоиспользующего агрегата.

Ввод коэффициента  $l$  вносит уточнение в определение  $q_2$  при эксплуатационных значениях коэффициента избытка воздуха ( $\alpha$ ) в пределах 1,0–1,2. Если по каким-либо причинам топливо сжигается с более высоким  $\alpha$ , то расчетная потеря тепла оказывается заметно завышенной против фактической.

Особенно велико значение методической погрешности для забалластированных топлив. Так в случае индивидуального сжигания доменного газа при  $t_{\text{вх}}=30^\circ\text{C}$  расчетная потеря тепла с уходящими газами занижена на 0,95 %. Соответственно КПД котла или нагревательной печи оказывается искусственно завышенным примерно на 1 %.

Дополнительная погрешность определения  $q_2$  по методу М.Б. Равича возникает в результате необоснованного усреднения значений  $t_{\text{макс}}$  для некоторых видов топлив. Эта составляющая общей погрешности особенно заметна при сжигании забалластированных топлив и мазута. Во всех практических расчетах для доменного газа однозначно принимается  $t_{\text{макс}} = 1470^\circ\text{C}$ . Однако как показал статистический анализ состава доменных газов по 22 металлургическим заводам, действительное значение  $t_{\text{макс}}$  изменяется от 1400 до  $1535^\circ\text{C}$ .

Очевидно, что при принятии к расчету среднего значения  $t_{\text{макс}}$  для отдельных потребителей доменного газа систематическая относительная погрешность определения  $q_2$  может достигать 4,8 %, а дополнительная абсолютная погрешность определения КПД – 0,5 %.

Рекомендуемое [2] для мазутов значение  $t_{\text{макс}} = 2100^\circ\text{C}$  относится к обезвоженному мазуту марок М40 и М100. Используя справочные данные о теплоте сгорания и о теоретических удельных объемах продуктов сгорания нетрудно убедиться, что при сжигании мазутов различных марок с механическим распыливанием значение  $t_{\text{макс}}$  составляет 2060– $2140^\circ\text{C}$ , а при паровом распыливании снижается –  $1990\text{--}2030^\circ\text{C}$ . В последнем случае относительная погрешность определения  $q_2$  составляет около 4 %, а КПД оказывается завышенным в среднем на 0,4 %.

Поэтому в условиях ужесточения требований к экономии топливно-энергетических ресурсов практическое использование формулы М.Б. Равича определения потерь с уходящими газами рекомендуется применять в большей степени для предварительной оценки с дальнейшим уточнением по нормативному методу.

#### Литература

1. Равич, М.Б. Эффективность использования топлива. – М.: Наука, 1977. – 344 с.
2. Янкелевич, В.Я. Наладка газомазутных промышленных котельных. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 216 с.

УДК 621.311.22

## УЧАСТИЕ ТЕПЛОФИКАЦИОННОГО ЭНЕРГБЛОКА В РЕГУЛИРОВАНИИ ЧАСТОТЫ И МОЩНОСТИ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ

Иванов А.В.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Качан С.А.

Нормированное первичное регулирование должно осуществляться электростанциями с модернизированными энергоблоками, регулирование которых отвечает необходимым современным требованиям.

Для обеспечения качественного регулирования частоты при изолированной работе Белорусской объединенной энергосистемы (ОЭС) необходимо модернизировать системы регулирования и внедрить в ОЭС центральный автоматический регулятор частоты и мощности (ЦАРЧМ), воздействующий на блочное оборудование крупнейших ТЭС.

В настоящее время ТЭЦ составляет около половины всех генерирующих мощностей Белорусской ОЭС. Привлечение теплофикационных энергоблоков к регулированию частоты и мощности осложняется из-за необходимости обеспечения ими в первую очередь теплофикационной нагрузки, однако возможно при их работе с частичным отпуском теплоты.

Как видно из таблицы 1, где приведены сравнительные характеристики гидравлической (ГСР) и электрогидравлической (ЭГСР) систем регулирования и защиты, внедрение ЭГСР является одним из способов повышения качества регулирования частоты и работы оборудования в целом.

Таблица 1 – Сравнение технических характеристик ГСР и ЭГСР

п	Основные технические характеристики	Значение	
		ЭГСР	ГСР
	Общая степень неравномерности РВЧ	4...5%	5±0,5%
	Местная степень неравномерности РВЧ	2...10%	3,3±0,3%
	Степень нечувствительности РВЧ	0,02...0,06%	≤0,3%
	Динамическое повышение частоты вращения при сбросе электрической нагрузки	6...6,5%	≤9 %
	Точность поддержания		
	- электрической мощности	≤2,5 %	≤3 %
	- давления в отборах	±0,01МПа	±0,005МПа
	- температуры нагрева сетевой воды	±1°С	-

В электрической части системы регулирования заложены все функции регулирования, а также некоторые функции защиты (рис. 1).

Для проверки возможности и целесообразности привлечения теплофикационных энергоблоков к регулированию частоты и мощности, а также для отработки системы регулирования, которая позволила бы форсировать блок в [1], проведено исследование с использованием компьютерного тренажера.

В [1] предложено комбинированное воздействие на котельный регулятор мощности (КРМ), турбинный регулятор мощности (ТРМ) с одновременной форсировкой энергоблока воздействием на регулирующие клапана (РК) подачи пара на ПВД-8 и РК байпаса группы

ПВД по питательной воде. Выбранный способ воздействия на блок удовлетворяют требованиям Стандарта и обеспечивает нормальный запас первичного регулирования 12,5 МВт (рис. 2).

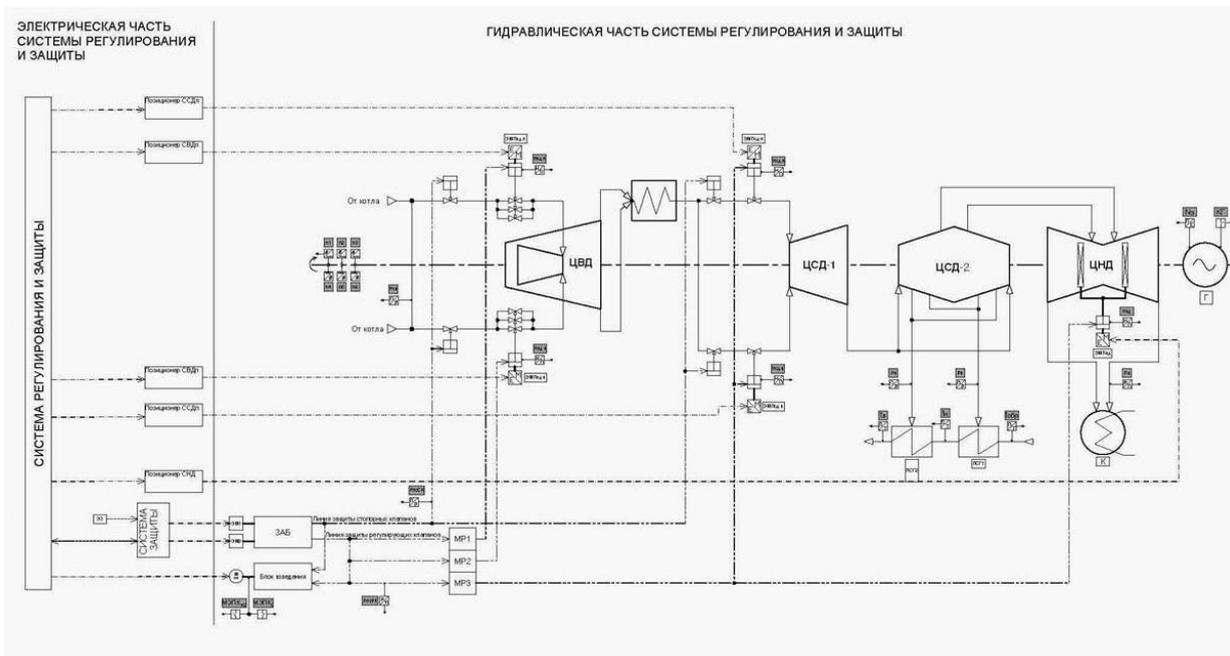


Рисунок 1 – Схема ЭГСР турбоустановки Т-250/300-240

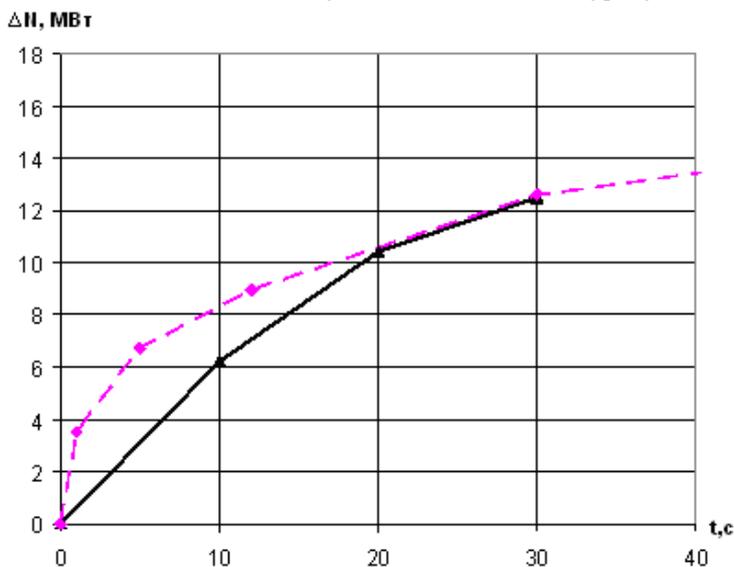


Рисунок 2 – График изменения электрической мощности блока (теплофикационный режим): сплошная линия – Стандарт СО-ЦДУ ЕЭС; пунктирная линия – открытие РК турбины на 15%, увеличение расхода топлива на 6000 нм³/ч, открытие клапана М504 на 80%, закрытие РК ПВД-8 на 70%

В работе [1] также разработана структурная схема автоматической форсировки теплофикационного энергоблока, которая обеспечивает регулирование мощности блока с учётом задания по электрической нагрузке, а также с учётом участия энергоблока в первичном и вторичном регулировании частоты и мощности энергосистемы.

**Литература**

1. Матвиенко К.С. Исследование участия теплофикационного энергоблока Т-250 в регулировании частоты и мощности в энергосистеме на базе его тренажерной модели. Автореф. дисс. канд. техн. наук - Москва - 2011.

УДК 621.182.12

**СИСТЕМА КОМПЕНСАЦИИ ДАВЛЕНИЯ I КОНТУРА ВВЭР-1000**

Лешок В.И.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Чиж В.А.

Система компенсации давления предназначена для компенсации объема теплоносителя при температурном расширении, для создания и поддержания давления в I контуре в заданном интервале, а также для ограничения отклонений давления в аварийных или переходных режимах.

Система компенсации давления выполняет следующие задачи безопасности:

- защита оборудования первого контура от превышения установленного давления;
- отвод остаточных тепловыделений от активной зоны через импульсно-предохранительные устройства компенсатора давления;
- прием и конденсация парогазовой смеси из системы аварийного парогазоудаления.

Система компенсации давления выполняет следующие задачи нормальной эксплуатации:

- компенсация объема теплоносителя при температурных расширениях I контура;
- плавная компенсация небольших возмущений давления I контура;
- создание давления в I контуре в период пуска реакторной установки;
- снижение давления в I контуре при расхолаживании реакторной установки;
- компенсация возмущений давления I контура в переходных процессах реактора;
- сбор и конденсация протечек через импульсно-предохранительные устройства компенсатора давления в режиме нормальной эксплуатации;
- прием и конденсация пара, сбрасываемого при срабатывании импульсно-предохранительных устройств компенсатора давления.

Функциональная схема системы компенсации давления I контура представлена на рисунке 1.

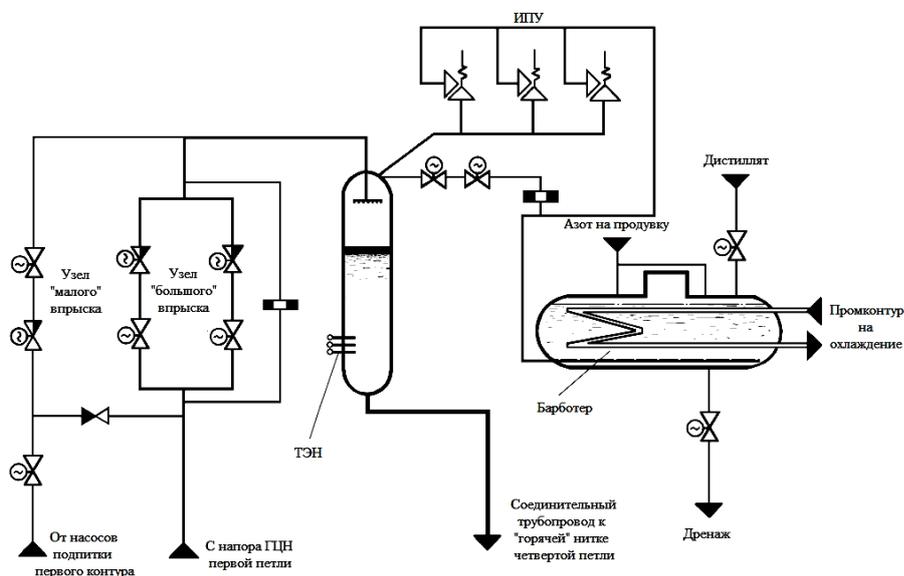


Рисунок 1 – Функциональная схема системы компенсации давления

Компенсатор давления соединен с «горячей» ниткой четвертой петли главного циркуляционного контура трубопроводом диаметром 400 мм, не имеющем арматуры. Через него осуществляется переток теплоносителя из первого контура в компенсатор давления и обратно при изменениях температуры первого контура.

В верхнее днище компенсатора давления врезан трубопровод «холодного» впрыска, соединяющий напорный трубопровод главного циркуляционного насоса первой петли с верхним парогазовым объемом компенсатора давления. Впрыск предназначен для снижения давления в компенсаторе давления и, следовательно, в первом контуре, а также для расхолаживания компенсатора давления. Трубопровод врезается в компенсатор давления через штуцер впрыска и соединяется внутри компенсатора с коллектором распылителей. «Холодный» впрыск условно разделяется на узел «малого» впрыска с трубопроводом диаметром 100 мм и узел «большого» впрыска с трубопроводом диаметром 200 мм.

«Большой» впрыск выполнен в виде двух идентичных параллельных ниток, на каждой из которых установлены запорная и запорно-регулирующая арматура.

Линия «большого» впрыска имеет байпас диаметром 15 мм с дроссельной шайбой, обеспечивающей при четырех работающих главных циркуляционных насосах перепад давления 0,6 МПа и расход 1,5 м<sup>3</sup>/ч. Байпасная линия предназначена для организации постоянной циркуляции теплоносителя через трубопровод впрыска для поддержания его в разогретом состоянии, а также для перемешивания среды с целью выравнивания концентрации борной кислоты и реагентов в первом контуре и компенсаторе давления.

Узел «малого» впрыска состоит из обратного клапана, регулирующей арматуры и запорной арматуры. В трубопровод впрыска между обратным клапаном и регулирующим клапаном врезана линия впрыска в компенсатор давления от напорного коллектора системы подпитки-продувки первого контура. Этот трубопровод используется для расхолаживания компенсатора давления при отключенных главных циркуляционных насосах. Обратный клапан в этом случае предотвращает переток подпиточной воды в I контур.

К верхней части компенсатора через штуцер диаметром 200 мм присоединен коллектор импульсно-предохранительных устройств, на котором установлены три импульсно-предохранительных устройства. В состав каждого импульсно-предохранительного устройства входит главный клапан и два импульсных клапана. Один из импульсно-предохранительных устройств является контрольным, имеет дополнительное устройство с электроприводной арматурой для дистанционного открытия с блочного щита управления. Среда из компенсатора давления подводится к главным клапанам по трубопроводам диаметром 200 мм, а к импульсным клапанам - по трубопроводам диаметром 32 мм. Каждый импульсный клапан оснащен запорной арматурой для отключения от компенсатора давления и от главного клапана.

В коллектор, соединяющий объем компенсатора давления и импульсно-предохранительные устройства врезается трубопровод аварийного парогазоудаления из компенсатора и трубопровод отбора проб из парового объема компенсатора давления.

При срабатывании импульсно-предохранительных устройств среда из компенсатора сбрасывается в нижнюю часть барботажного бака проходит через слой дистиллята и конденсируется. При этом излишки конденсата удаляются в систему организованных протечек. Для предотвращения образования в объеме барботажного бака взрывоопасной газовой смеси предусмотрена подача азота в барботажный бак по трубопроводу диаметром 32 мм. Отвод газов из барботажного бака осуществляется в систему газовых сдувок. Барботажный бак имеет дренаж в систему организованных протечек и систему спецканализации.

По трубопроводу диаметром 32 мм в верхнюю часть компенсатора давления подается азот, предназначенный для создания первоначального давления в первом контуре. В этот трубопровод врезан воздушник компенсатора давления, предназначенный для удаления воздуха при заполнении. Кроме того, к трубопроводу подачи азота в компенсатор присоединена линия сброса азота в барботажный бак с арматурой и дроссельная шайба, ограничивающая расход до 60 м<sup>3</sup>/ч. Трубопровод сброса азота заведен в сбросной коллектор главных клапанов импульсно-предохранительных устройств.

Первоначальное давление в первом контуре создается подачей азота в компенсатор давления давлением 2,0 МПа для обеспечения нормальной работы главных циркуляционных

насосов. Выбор азота обусловлен его преимуществами перед другими газами - азот не вызывает коррозии конструкционных материалов, не взрывоопасен и легко получаем из воздуха. При разогреве первого контура и достижении температуры теплоносителя температуры насыщения при данном давлении производится перевод компенсатора давления с газового на паровой режим. При этом парогазовая смесь сбрасывается из компенсатора давления в барботажный бак по линии газовых сдувок. При расхолаживании производится обратный процесс подачи азота в компенсатор давления. Таким образом, возможна работа компенсатора в двух режимах: газовом и паровом.

При изменении средней температуры теплоносителя первого контура в переходных режимах, связанных с нарушениями в работе оборудования и при изменении мощности, часть его перетекает из компенсатора в первый контур или обратно по «дыхательному» трубопроводу. Ограничение отклонений давления от номинального значения достигается за счет сжатия или расширения паровой подушки в компенсаторе давления. Повышение давления осуществляется за счет испарения воды при включении трубчатых электронагревателей, а понижение давления происходит при конденсации пара за счет впрыска «холодной» воды в паровое пространство компенсатора давления. В зависимости от переходного процесса подача «холодного» теплоносителя замедляет или полностью прекращает рост давления в первом контуре. При работе в стационарном режиме в работе находятся первая и периодически вторая группы трубчатых электронагревателей, необходимые для компенсации тепловых потерь и подогрева воды, используемой для прогрева трубопроводов впрыска. В режимах разогрева или расхолаживания первого контура в работе могут находиться все группы трубчатых электронагревателей. Поддержание давления в этом случае осуществляется за счет создания в компенсаторе давления азотной подушки, которая в дальнейшем заменяется на паровую.

#### Литература

1. Моргунова Т.Х. Атомные электрические станции: Учебник для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. школа, 1978. – 360 с.: ил.
2. Тепловые и атомные электрические станции: Справочник / Под общ. ред. В.А. Григорьева, В.М. Зорина. – 2-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 608 с.: ил.

УДК 621.311.25

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТОПЛИВА НА АЭС С РЕАКТОРАМИ ВВЭР

Исаев М.Ш., Бычкова Д.Н.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Качан С.А.

Атомные электростанции – филиалы ОАО «Концерн Росэнергоатом», являясь современными предприятиями динамично развивающейся ядерной энергетики России, имеют высокий уровень техники и технологии, организации и культуры труда. На многих из них эксплуатируются водо-водяные энергетические реакторы корпусного типа с водой под давлением (ВВЭР), – аналогичные сооружаемым на Белорусской АЭС (рисунок 1) [1].



Рисунок 1 – Физический пуск блока № 4 ВВЭР-1000 Калининской АЭС в 2011 г.

Рассмотрим некоторые направления работ по увеличению производства энергии, снижению эксплуатационных расходов, повышению надежности и экономической эффективности АЭС для обеспечения их конкурентоспособности на энергетическом рынке.

Повышение тепловой мощности реакторов и эксплуатация их в циклах длительностью 18–24 месяца – это общепринятая тенденция в мировой практике.

С 2006 года она реализуется и на российских энергоблоках.

Повышение энерговыработки на энергоблоках АЭС с ВВЭР-1000 достигается за счет повышения мощности блоков до 104 % от нормативной ( $104 \%N_{\text{норм}}$ ) и выше, а также перехода на эксплуатацию блоков в 18-месячном топливном цикле (рисунок 2) [1].

После плановой ремонтной компании 2011 г. длительность работы топливных загрузок ВВЭР-1000 блоков № 1, 2 и 3 Калининской АЭС составила 325, 435 и 467 эффективных суток, блоков № 2 и 1 Ростовской АЭС – 309 и 433 эффективных суток соответственно [1].

В процессе реализации программы по увеличению энерговыработки на АЭС с ВВЭР был выполнен большой комплекс мероприятий по модернизации систем и оборудования.

Приоритетным способом улучшения использования топлива на АЭС с ВВЭР-1000 является поэтапное увеличение загрузки урана в тепловыделяющие сборки (ТВС). Увеличение объема топлива в ТВС в существующих габаритах активной зоны осуществляется двумя способами: за счет увеличения высоты топливного столба при сохранении габаритных размеров кассеты и изменения геометрических характеристик топливных таблеток (увеличение наружного диаметра и уменьшение или исключение центрального отверстия).

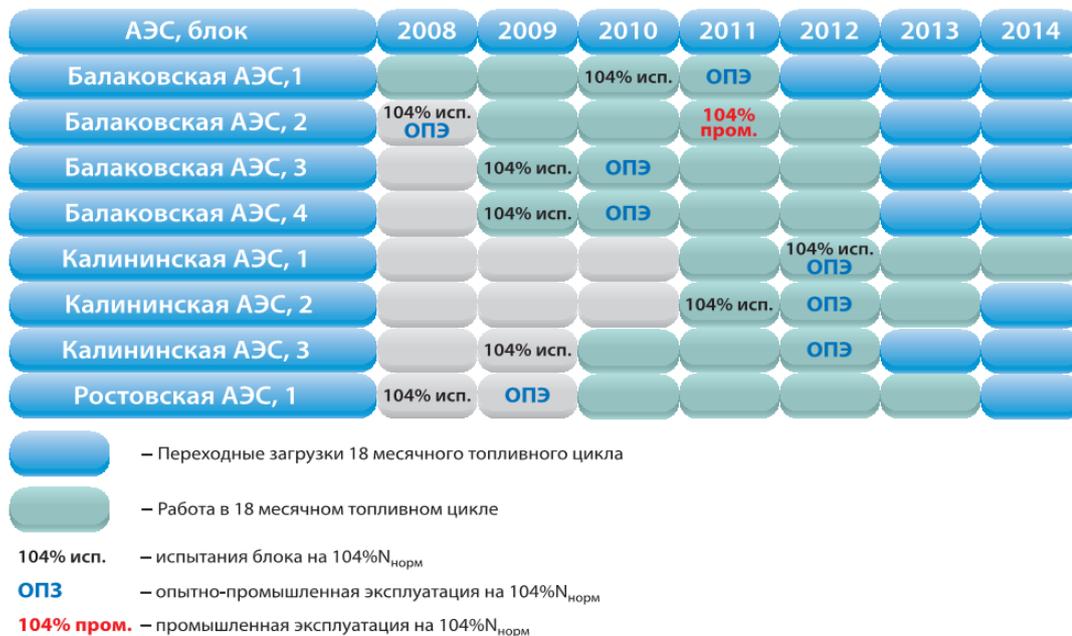


Рисунок 2 – График перевода энергоблоков ВВЭР-1000 на работу с повышенной мощностью в 18-месячном топливном цикле

На Калининской и Ростовской АЭС прошли опытную эксплуатацию технические решения по модернизации ТВС [2, 3]. В настоящее время на энергоблоках Ростовской АЭС эксплуатируются ТВС-2 М с увеличенным на 150 мм от базового аналога топливным столбом, что позволило обеспечить реализацию топливного цикла 3 x 18 мес. в условиях мощности АЭС 104 % от номинальной. На энергоблоках №№ 2 и 3 Калининской АЭС с 2010 г. эксплуатируются ТВСА-PLUS, имеющие унифицированный с ТВС-2М топливный пучок с увеличенным на 150 мм топливным столбом и обеспечивающие аналогичные условия эксплуатации. Загрузка урана в ТВС-2М и ТВСА-PLUS увеличена примерно на 6 % в сравнении с базовыми вариантами. На энергоблоке № 1 Калининской АЭС с 2006 г. в пятигодичном топливном цикле эксплуатируются ТВСА-АЛЬФА с увеличенной ураноемкостью за счет применения ТВЭЛов с топливными таблетками без центрального отверстия. Загрузка урана в ТВСА-АЛЬФА в сравнении с ТВСА увеличена на ~ 10 %.

Новые ТВС (рисунок 3) позволяют достигать весьма высоких выгораний ядерного топлива, что повышает экономическую конкурентоспособность действующих энергоблоков и ядерной энергетики в целом.

Внедрение модернизированных ТВС требует решения комплекса проблем, связанных с хранением и вывозом отработавшего ядерного топлива (ОЯТ): обеспечение вывоза отработавших тепловыделяющих сборок (ОТВС) с большой глубиной выгорания и высоким остаточным энерговыделением.

Также требуются обоснование безопасности реакторной установки при работе на повышенной мощности, разработка и внедрение мероприятий по модернизации другого оборудования для работы в условиях увеличенной мощности и удлиненного топливного цикла, в том числе обеспечение надежной работы электрического генератора.

Кроме того, переход на 18-месячную топливную кампанию, следовательно, на 18-месячный межремонтный период входит в противоречие с некоторыми действующими нормами и правилами, которые, необходимо пересмотреть и привести в соответствие с изменяющимися требованиями.

Увеличению коэффициента использования установленной мощности (КИУМ) и повышению энерговыработки на действующих энергоблоках способствуют и другие мероприятия. Например, применение на Калининской АЭС современной мобильной установки UWF-120-4 для очистки воды бассейнов выдержки и перегрузки топлива на

энергоблоке № 3 обеспечивает эффективную очистку воды этих бассейнов, позволяя сократить время на выполнение операций по очистке воды примерно в 4 раза.

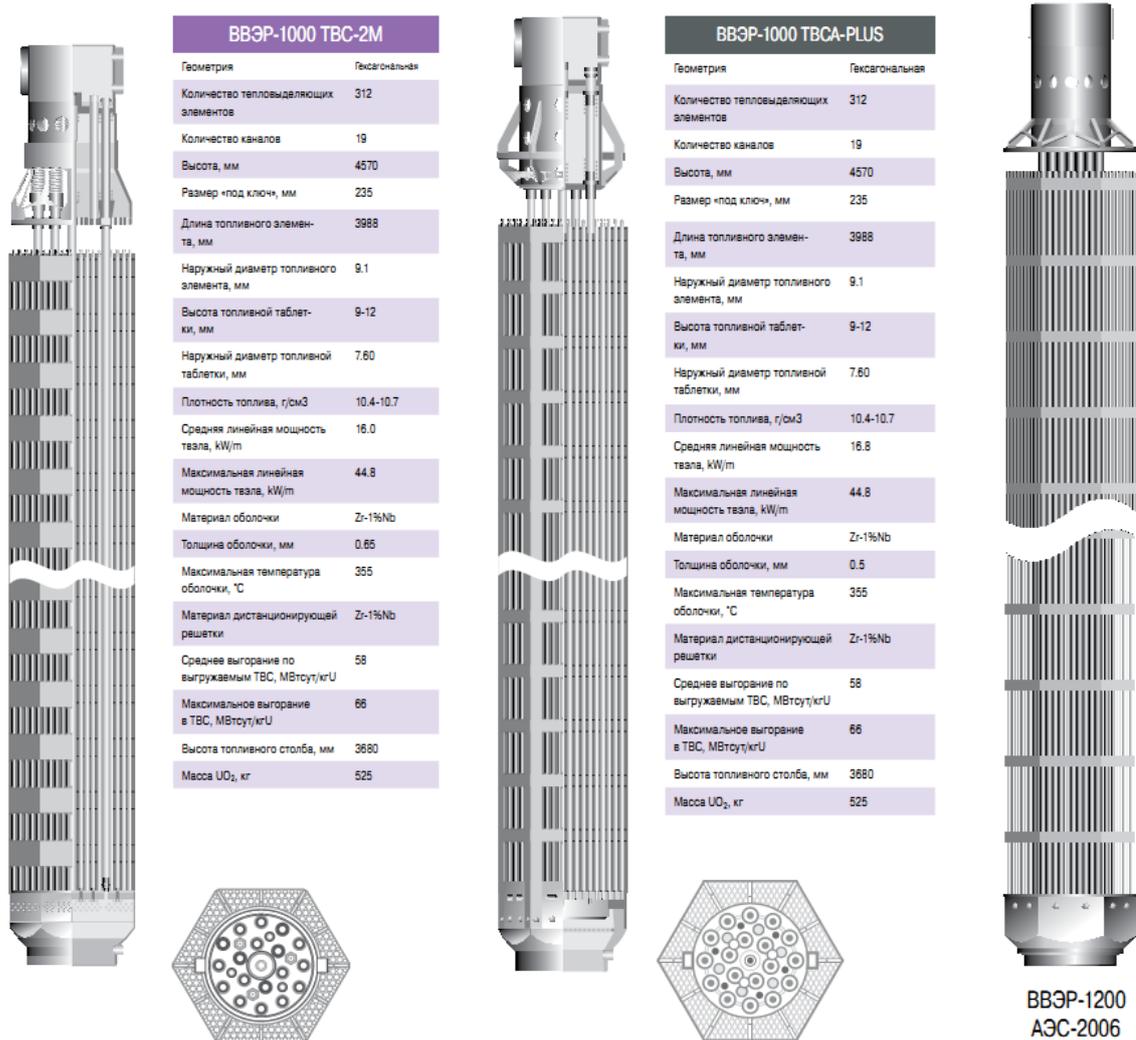


Рисунок 3 – Перспективные решения по ТВС ВВЭР

В 2010–2011 гг. на блоке № 3 Калининской АЭС и блоках №№ 3, 4 Нововоронежской АЭС внедрен этанол-аминовый водно-химический режим (ВХР) второго контура [1]. Дозирование этанол-амин позволяет снизить скорость коррозии конструкционных материалов во втором контуре, в несколько раз уменьшить вынос продуктов коррозии, что в свою очередь приводит к снижению в несколько раз скорости накопления шлама в парогенераторах, обеспечивает его надежную работу и долговечность. Исключение необходимости выполнять химическую отмывку парогенераторов каждые 4 года существенно снижает эксплуатационные расходы и сроки ППР [1].

#### Литература

1. Ю. Марков. Сплав молодости и опыта / Ежемесячный журнал атомной энергетики России «Росэнергоатом». – 2011. – № 11. – С. 34–37 ([www.rosenergoatom.info](http://www.rosenergoatom.info))
2. П. Лавренюк. Повышая надежность и ресурс: ядерное топливо для реакторов ВВЭР и РБМК. / Ежемесячный журнал атомной энергетики России «Росэнергоатом». – № 10. – 2011. – С. 14–17 ([www.rosenergoatom.info](http://www.rosenergoatom.info))
3. А. Сальников. В начале большого пути / Ежемесячный журнал атомной энергетики России «Росэнергоатом». – № 2. – 2012. – С. 34–39 ([www.rosenergoatom.info](http://www.rosenergoatom.info)).

УДК 681.5

## ПРОЕКТ ТЭЦ МОЩНОСТЬЮ 500МВт С РАЗРАБОТКОЙ САР ТЕМПЕРАТУРЫ СЕТЕВОЙ ВОДЫ

Кулик К.Ю.

Научный руководитель – к.э.н., старший преподаватель Кравченко В.В.

Теплоэлектроцентрали предназначены для обеспечения потребителя не только электрической энергией, но и теплом.

Для того чтобы покрывать меняющуюся в течение отопительного сезона тепловую нагрузку, температура воды в теплосети должна меняться в широких пределах, в зависимости от температуры наружного воздуха.

В этом случае отпуск тепла от ТЭЦ ведется по температурному графику (ТГ) теплосети. Такой температурный график рассчитывается для каждого источника отпуска тепла (ТЭЦ) с учетом покрытия совместной нагрузки отопления, горячего водоснабжения и вентиляции, а также с учетом способа включения подогревателей горячей воды.

При условии стабильности погоды, строго соблюдения гидравлического режима сети, сбалансированного подключения потребителей тепла и правильной работы тепловой автоматики на центральных тепловых пунктах он должен точно выполняться.

Однако на практике полного выполнения отопительного графика нет. В связи с этим возникает необходимость регулирования температур прямой и обратной сетевой воды.

Для поддержания температуры сетевой воды применяют сетевые подогреватели. Подогреватель теплофикационной сетевой воды предназначен для её подогрева до требуемой температуры, значение которой задают в зависимости от температуры наружного воздуха. Подогреватель – поверхностный теплообменник, по змеевикам которого с помощью сетевого насоса прокачивают воду. Снаружи змеевики обогревают паром. Основной регулируемой величиной подогревателя служит температура прямой сетевой воды тс.в., которую необходимо поддерживать на заданном уровне с высокой точностью. Обратная сетевая вода подается в подогреватель, где нагревается за счет пара, поступающего из отборов турбины. При этом неизбежные потери в тепловой сети восполняют за счёт подпиточной воды, которая поступает на всос сетевых насосов под избыточным давлением.

В данном докладе рассмотрим САР регулирования температуры прямой и обратной сетевой воды.

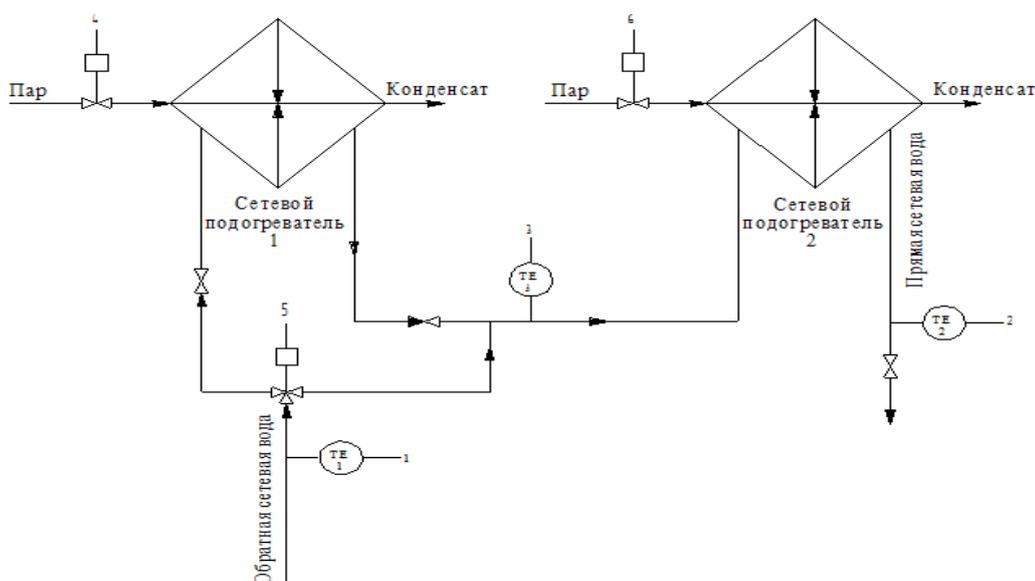


Рисунок 1 – Функциональная схема регулирования температуры сетевой воды

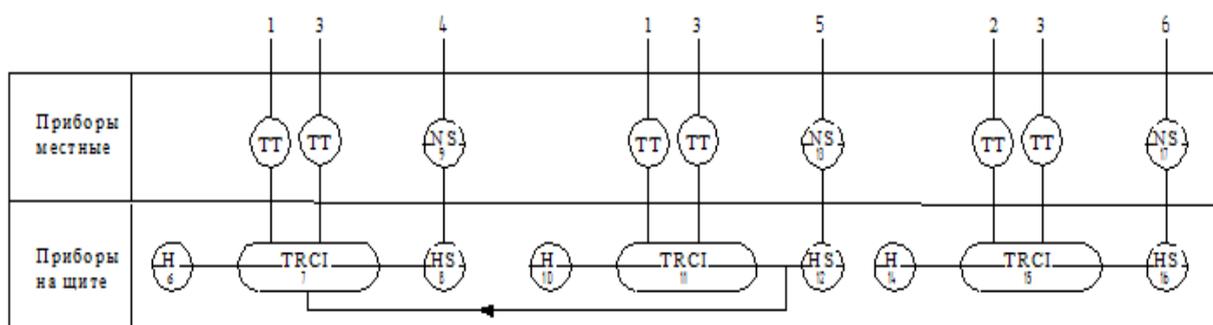


Рисунок 2 – Схема автоматизации

Заданные значения температур прямой и обратной сетевой воды зависят от температурного графика теплосетей, устанавливаемого в зависимости от температуры наружного воздуха.

Температура обратной сетевой воды, приходящей от потребителя измеряется с помощью датчика температуры ТЕ-1. Если температура воды ниже или равна значению, установленному температурным графиком, то в работу включается регулятор TRCI-7. Обратная вода поступает в сетевой подогреватель 1. Регулятор вырабатывает регулирующее воздействие, поступающее на исполнительный механизм 4, который изменяет положение регулирующего клапана. В результате изменяется расход пара, необходимого для подогрева воды. Затем вода поступает в сетевой подогреватель 2, где вторично подогревается и подается потребителю.

Регулирование температуры вторичного подогрева сетевой воды осуществляется с помощью регулятора TRCI-15, который подает сигнал регулирования на исполнительный механизм 6.

В случае, когда температура обратной воды превышает значение, установленное температурным графиком, в работу включается регулятор TRCI-11. Он вырабатывает регулирующее воздействие, которое поступает на исполнительный механизм 5, воздействующий на трехходовой регулирующей клапан. Обратная вода поступает на вход сетевого подогревателя 2 (минуя сетевой подогреватель 1), подогревается и подается потребителю.

### Моделирование АСР температуры сетевой воды

Таблица 1 – Исходные данные

Параметр	Значение
Коэффициент усиления объекта для опережающего участка	$K_{оп} = 7,4 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{T}/\text{ч}$
Большая постоянная времени опережающего участка	$T_{оп} = 25,4 \text{ с}$
Меньшая постоянная времени опережающего участка	$\sigma_{оп} = 2,54 \text{ с}$
Коэффициент усиления объекта для инерционного участка	$K_{ин} = 1,61 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{T}/\text{ч}$
Время по Кулакову	$T_k = 175 \text{ с}$
Время запаздывания	$\tau_y = 109 \text{ с}$

АСР температуры воды в теплообменном аппарате будет представлять собой каскадную САР:

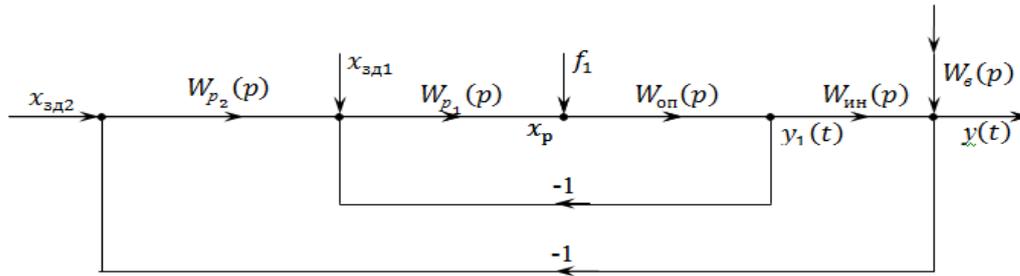


Рисунок 3 – Схема моделирования АСР температуры сетевой воды

где  $x_{зд1}$ ,  $x_{зд2}$  – заданные значения промежуточной и основной регулируемых величин соответственно;

$y(t), y_1(t)$  – основная и промежуточная регулируемые величины соответственно;

$f_1, f_2$  – внутреннее и внешнее возмущения соответственно;

$\varepsilon_1(t), \varepsilon(t)$  – ошибки регулирования соответственно внутреннего и внешнего контуров.

Динамика опережающего участка представлена в виде инерционного звена второго порядка:

$$W_{оп}(p) = \frac{K_{оп}}{(T_{оп}p + 1)(\sigma_{оп}p + 1)} = \frac{7,4}{(25,4p + 1)(2,54p + 1)} \quad (1)$$

Динамика инерционного участка представлена в виде инерционного звена первого и второго порядков с запаздыванием:

$$W_{ин}(p) = \frac{K_{ин} \cdot e^{-\tau_y p}}{(T_k p + 1)} = \frac{1,61 \cdot e^{-109p}}{(175p + 1)} \quad (2)$$

$W_в(p)$  – передаточная функция крайнего внешнего возмущения:

$$W_в(p) = \frac{K_в}{T_в p + 1} = \frac{5}{30p + 1} \quad (3)$$

$W_{p1}(p)$  – передаточная функция стабилизирующего регулятора:

$$W_{p1}(p) = \frac{K_{p1}(T_{и1}p + 1)}{T_{и1}p} \quad (4)$$

$W_{p2}(p)$  – передаточная функция корректирующего регулятора:

$$W_{p2}(p) = \frac{K_{p2}(T_{и2}p + 1)}{T_{и2}p} \quad (5)$$

Передаточная функция стабилизирующего регулятора:

$$W_{p1}(p) = \frac{1,074 \cdot (9,646p + 1)}{9,646p} \quad (6)$$

Передаточная функция корректирующего регулятора:

$$W_{p_2}(p) = \frac{0,499 \cdot (175p + 1)}{175p} \quad (7)$$

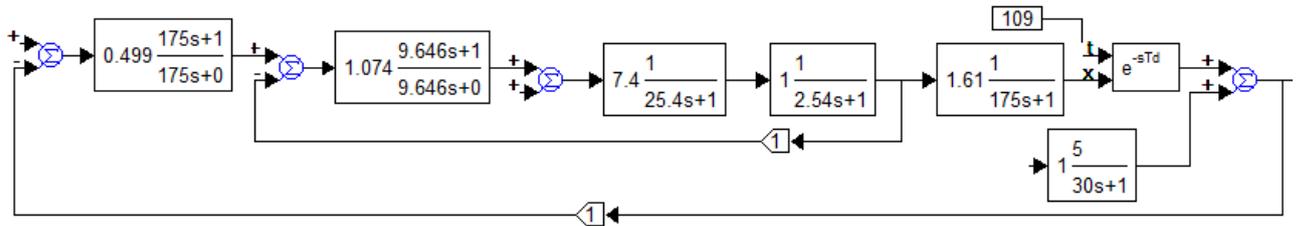


Рисунок 4 – Блок-схема схема типовой КСАР

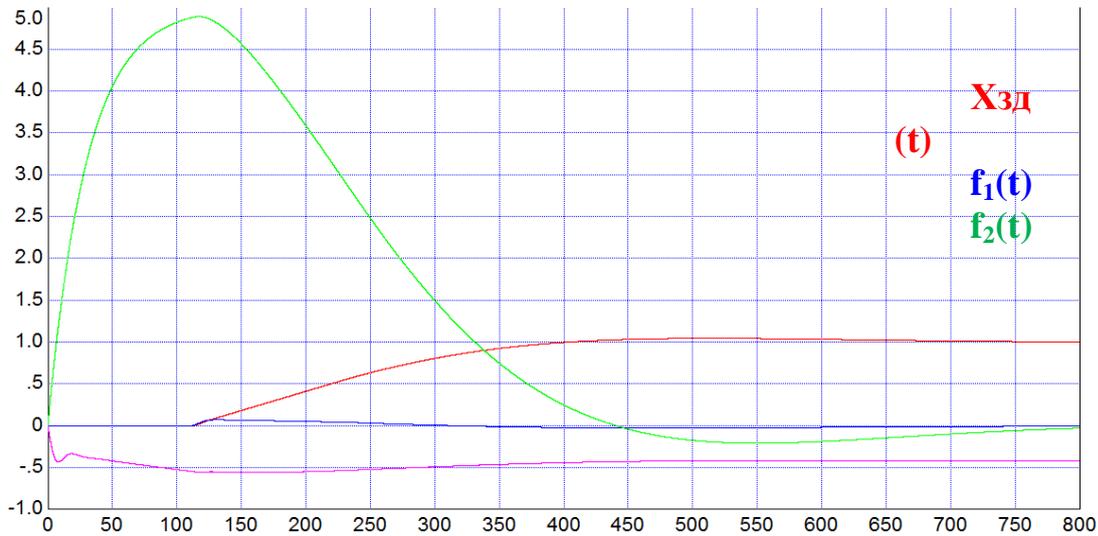


Рисунок 5 – Графики переходных процессов

Таблица 2 – Прямые показатели качества

	$t_n, c$	$A_{max1}^+$	$A_{max1}^-$	$\sigma_{max}, \%$	$\psi$
$x_{zd}(t)$	660	0,038	–	4,6	1
$f_1(t)$	300	0,04	0	–	1
$f_2(t)$	785	4,75	0,17	–	1
$x_p(t)$	–	–	0,57	–	–

### Выводы

В данном докладе была составлена функциональная схема, а так же схема автоматизации АСР температуры сетевой воды. При помощи математической схемы моделирования рассчитаны параметры оптимальной динамической настройки регуляторов. Из графиков на рисунке 5 видно, что система полностью отрабатывает внутренние и внешние возмущения, что от нее и требуется.

### Литература

1. Плетнев, П.Г. Автоматизированное технологических процессов и производств в теплоэнергетике. Учебное пособие для вузов – М.: Издательский дом МЭИ, 2007.
2. Кулаков, Г.Т. Инженерные экспресс-методы расчета промышленных систем регулирования». – Мн.: «Вышэйшая школа», 1984. – 192 с.
3. Кулаков, Г.Т. Анализ и синтез систем автоматического регулирования. – Мн.: УП «Технопринт», 2003. – 134 с.

УДК 658.264

## ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОЧИСТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ НАГРЕВА

Яцко М.А.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Тарасевич Л.А.

На предприятиях большой и малой энергетики в эксплуатации находится большое количество теплообменного оборудования, которое работает в различных температурных условиях. В качестве греющего агента применяется пар, горячая вода, нагретые продукты нефтепереработки и других производств. От состояния поверхности нагрева теплообменного оборудования зависит эффективность его работы.

Загрязнения поверхности нагрева теплообменного оборудования различными отложениями резко снижают коэффициент теплопередачи и это приводит к значительному увеличению расхода тепла. Характер отложений на теплообменной аппаратуре зависит от свойств греющего агента и нагреваемой среды.

Количество тепла  $Q$ , передаваемого от греющего агента нагреваемой среде, определяется по формуле

$$Q = k * F * \Delta t,$$

где:  $k$  – коэффициент теплопередачи,  $Вт/(м^2 * °C)$ ;

$F$  – температурный напор,  $°C$ ;

$\Delta t$  – поверхность теплообмена,  $м^2$ .

Связь коэффициента теплоотдачи, коэффициента теплопроводности материала стенки теплообменной поверхности и слоя загрязнений с коэффициентом теплопередачи выражается уравнением

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{d_n - d_{вн}}{\lambda_{ст}} * \frac{d_{вн}}{d_{ср}} + \frac{\delta}{\lambda_3} * \frac{d_n + 2 * \delta}{d_{ср.з}} + \frac{1}{\alpha_2}},$$

где:  $\alpha_1$  – коэффициент теплоотдачи внутри теплообменной трубы,  $Вт/(м^2 * °C)$ ;

$\alpha_2$  – коэффициент теплоотдачи снаружи теплообменной трубы,  $Вт/(м^2 * °C)$ ;

$d_{вн}$  – внутренний диаметр теплообменной трубы,  $м$ ;

$d_n$  – наружный диаметры теплообменной трубы,  $м$ ;

$d_{ср}$  – средний диаметр теплообменной трубы,  $м$ ;

$d_{ср.з}$  – средний диаметр слоя загрязнений,  $м$ ;

$\delta$  – толщина слоя загрязнений,  $м$ ;

$\lambda_{ст}$  – коэффициент теплопроводности материала теплообменных труб,  $Вт/(м * °C)$ ;

$\lambda_3$  – коэффициент теплопроводности загрязнений,  $Вт/(м * °C)$ .

Эту формулу можно представить в следующем виде

$$k = \frac{1}{R_1 + R_{ст} + R_3 + R_2},$$

где:  $R_1$  – термическое сопротивление со стороны внутренней стенки трубы;

$R_{ст}$  – термическое сопротивление материала стенки трубы;

$R_3$  – термическое сопротивление слоя загрязнений;

$R_2$  – термическое сопротивление со стороны наружной стенки трубы.

Для определения влияния отложений на коэффициент теплопередачи от стенки трубы к нагреваемой жидкости (для теплообменника-подогревателя мазута) произведены расчеты при различной толщине загрязнений. Результаты этих расчетов приведены в таблице.

$\alpha_2$ , $\frac{Вт}{м^2 * °С}$	$\delta = 0$	$\delta = 0.1 мм$	$\delta = 0.3 мм$	$\delta = 0.5 мм$	$\delta = 1.0 мм$	$\delta = 1.5 мм$	$\lambda$ , $\frac{Вт}{м * °С}$
	$k$ , $\frac{Вт}{м^2 * °С}$						
290	276.1	223.9	160.1	120.6	77.5	55.7	0.12
174	170.5	148.5	118.3	94.6	65.8	49.9	
58	56.8	54.5	49.9	45.2	37.1	31.3	
290	276.1	244.6	200.1	167	121.5	92.8	0.23
174	170.5	157.5	136.9	120.6	94	76.1	
58	56.8	56.0	52.2	55.6	45.4	40.5	
290	276.1	256.4	223.9	197.2	149.6	118.3	0.35
174	170.5	162.4	148.5	136.9	112.5	94	
58	56.8	56.8	54.5	52.9	48.7	45.2	
290	276.1	261	303.9	211	168.2	139.2	0.46
174	170.5	164.7	154.3	143.8	121.8	105.6	
58	56.8	55.7	55.3	53.9	50.6	47.6	

Из таблицы видно, что значение коэффициента теплопередачи значительно снижается в зависимости от толщины загрязнений.

Например: для коэффициента теплоотдачи от поверхности трубы  $\alpha_2 = 58 \text{ Вт}/(\text{м}^2 * \text{°С})$  и коэффициента теплопроводности загрязнений  $\lambda_3 = 0.12 \text{ Вт}/(\text{м} * \text{°С})$  коэффициент теплопередачи для труб с толщиной загрязнений  $\delta = 1.5 \text{ мм}$  в сравнении с чистой поверхностью трубы снижается на 45%.

Эффективным средством очистки поверхностей теплообмена от загрязнений является применение ультразвуковой аппаратуры. Способ ультразвуковой очистки заключается в применении упругих колебаний ультразвуковой частоты, возбуждаемых импульсным генератором и передаваемых объекту очистки с помощью магнитострикционного преобразователя, который приваривается к крышке теплообменника или к трубной доске.

Ультразвуковой способ очистки был применен на подогревателях мазута. Магнитострикционные преобразователи установлены по продольной оси теплообменника в центре передней крышки, соединены с трубной доской. Нагрев мазута осуществляется паром при давлении 0.6 МПа с температурой 170<sup>0</sup>С. Подогреватели подвергались чистке отложений 1 раз в 5–6 месяцев. Расход пара на подогрев 1 т мазута до внедрения ультразвуковой очистки составлял 0.122 т или 0.288 ГДж/т. Расход пара на подогрев мазута после внедрения ультразвуковой очистки составил 0.0676 т/т или 0.159 ГДж/т. Снижение расхода пара составило 45%.

Таким образом, проведенные исследования позволяют сделать вывод о том, что применение ультразвуковой очистки на теплообменном оборудовании позволяет существенно улучшить экономические показатели работы теплообменного оборудования.

#### Литература

1. Багиров И.Т., Кардаш И.М. Снижение энергозатрат на нефтеперерабатывающих заводах. – М.: Химия, 1972.

УДК 621.184

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОТОПИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ

Яцко М.А.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Тарасевич Л.А.

Резервы энергосбережения в системах отопления жилых зданий следует искать в управлении процессами вентиляции зданий. Полностью контролируемая приточно-вытяжная вентиляционная система делает экономически целесообразным переход к воздушному отоплению в зданиях. В этом случае пропадает необходимость в монтаже дополнительной инженерной системы водяного отопления для обогрева жилых помещений.

Для жилых зданий предыдущего поколения использование системы воздушного отопления было нецелесообразно по нескольким причинам. Объясняется это тем, что температура теплоносителя в системах воздушного отопления ограничена  $45^{\circ}\text{C}$ , для решения задачи достаточного обеспечения теплом уровень воздухообмена повышался до 3–5 кратного значения по сравнению с необходимым для целей проветривания помещений. Это приводило к существенному увеличению уровня теплопотерь зданий, а также к уносу влаги из помещений и снижению относительной влажности до 20–30 %. Такой уровень влажности приводил к повышенной электризации и запыленности воздуха в помещениях, что стимулировало увеличение количества заболеваний дыхательной системы, а также увеличивало количества аллергенов в атмосфере помещений.

При современных требованиях к теплозащите ограждающих конструкций после реконструкции уровень теплопотерь здания существенно уменьшится, соответственно снизится и необходимый объем воздуха в системе воздушного отопления.

Для зданий существующего жилого фонда легко рассчитать теплопотери через ограждающие конструкции в пересчете на  $1 \text{ м}^2$  жилой площади. Для 9-этажного здания с высотой этажа 2.5 м и площадью горизонтального сечения  $825 \text{ м}^2$  при  $R_{\text{опр}}=1 \text{ м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$  и  $R_{\text{ок}}=0.4 \text{ м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C} /\text{Вт}$  и при 20-и процентном остеклении теплопотери с воздухообменом для расчетной наружной температуры  $T_{\text{нр}} = -25^{\circ}\text{C}$  и для средней за отопительный период температуры наружного воздуха  $T_{\text{н.ср}} = -1,2^{\circ}\text{C}$  в расчете на  $1 \text{ м}^2$  жилой площади (50 % от общей) при номинальном воздухообмене ( $V_0=3 \text{ м}^3/\text{ч}$ ) в схеме воздушного отопления без рекуперации воздуха в % от полных теплопотерь составляют

37% при  $T_{\text{н}} = -25^{\circ}\text{C}$ 37 % при  $T_{\text{н}} = -1.2^{\circ}\text{C}$ 

Рассмотрим ситуацию, когда 60 % тепла, уносимого воздухообменом из помещения, возвращается обратно.

С рекуперацией тепла уходящего воздуха система отопления имеет вид (рисунок 1)

На вход системы отопления поступает воздух, подогретый до температуры  $T_2$ .

При этом, потребление тепла из теплосети уменьшится на величину возвращаемого тепла.

Таким образом, чтобы при номинальном воздухообмене ( $V_0=3 \text{ м}^3/\text{ч}$  на  $1 \text{ м}^2$  жилой площади) обеспечить температуру воздуха в помещении  $T_0 = 20^{\circ}\text{C}$  при  $T_1 = 45^{\circ}\text{C}$  необходимо увеличивать термосопротивление ограждающих конструкций и окон.

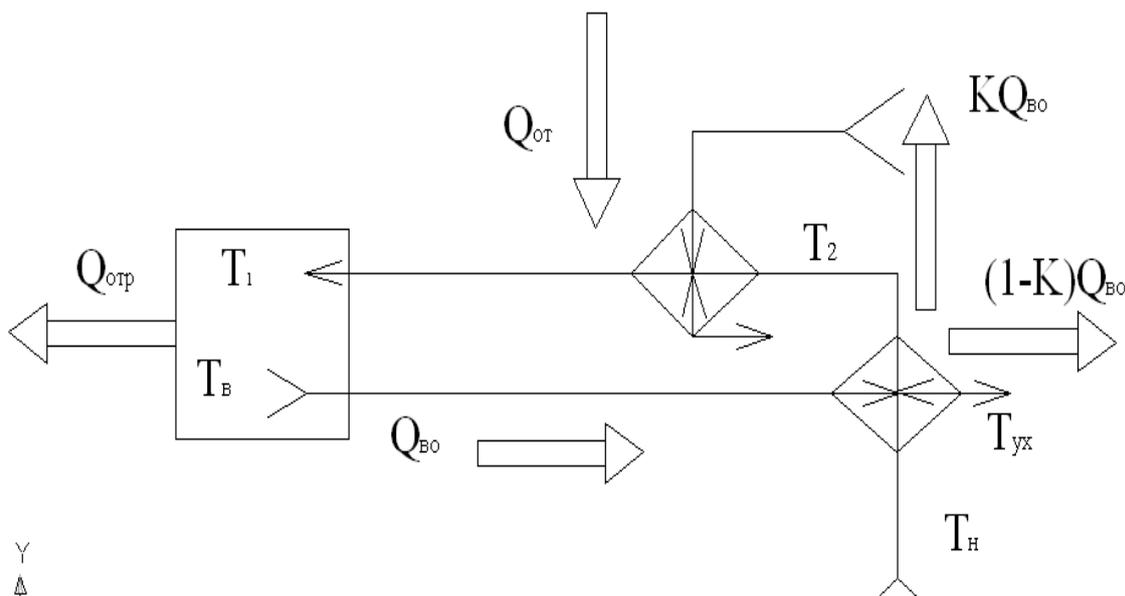


Рисунок 1 – Схема воздушного отопления с рекуперацией уходящего воздуха

В таблице 1 приведены рассчитанные значения термосопротивления ограждающих конструкций для обеспечения температуры воздуха в помещении  $T_e = 20^\circ\text{C}$  при номинальном ( $3 \text{ м}^3/\text{ч на м}^2$ ) воздухообмене.

Таблица 1

$T_n, ^\circ\text{C}$		-25	-20	-15	-10	-5	0	+5	+ 10
$R_{орг},$ $\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{Вт}$	$R_{ок} = 0,4$	18,82	9,07	5,44	3,55	2,39	1,6	1,03	0,6
	$R_{ок} = 0,5$	7,47	5,23	3,78	2,76	2	1,42	0,95	0,58
	$R_{ок} = 0,6$	5,3	4,08	3,14	2,4	1,8	1,3	0,9	0,56
	$R_{ок} = 0,7$	4,42	3,53	2,8	2,2	1,69	1,25	0,88	0,55

Полученные результаты показывают, что воздушное отопление помещений для зданий с низким потреблением энергии для отопления вполне можно совместить с системой воздухообмена.

Требуемое термосопротивление ограждающих конструкций вполне согласуется с цифрами, рассчитанными для зданий, не требующих отопления часть существующего в настоящее время отопительного сезона.

#### Литература

1. Данилевский Л.Н. Необходимые условия реализации проекта "Пассивный дом" в Республике Беларусь. Белорусский строительный рынок. – 2002 – № 8.
2. Апарцев М.М. Наладка водяных систем централизованного теплоснабжения. – Москва: Энергоавтомиздат, 1983.

УДК 621.039

## ПОДЗЕМНОЕ ЗАХОРОНЕНИЕ ТВЕРДЫХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

Хроян В.В., Масюкевич А.С.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Качан С.А.

Отсутствие долговременного решения обращения с отработавшим ядерным топливом (ОЯТ) является важнейшей проблемой глобальной индустрии атомной энергетики. Рассматриваются две схемы: окончательное захоронение (открытый топливный цикл; ОЯТ считается отходами) и переработка (частично замкнутый топливный цикл; ОЯТ рассматривается как сырье). Существует также позиция отложенного решения. Определяющим является экономический фактор, и, к сожалению, переработка, являясь более перспективным решением, пока остается менее экономичной [1, 2].

В любом случае после изъятия из реактора ОЯТ помещается на 5-6 лет в специально сконструированные бассейны, где оно охлаждается поглощающей теплоту и радиацию водой (рисунок 1), и несколько десятков лет ОЯТ хранится во временных хранилищах на территории АЭС, где излучаемая радиация снижается до 1% от первоначального значения.

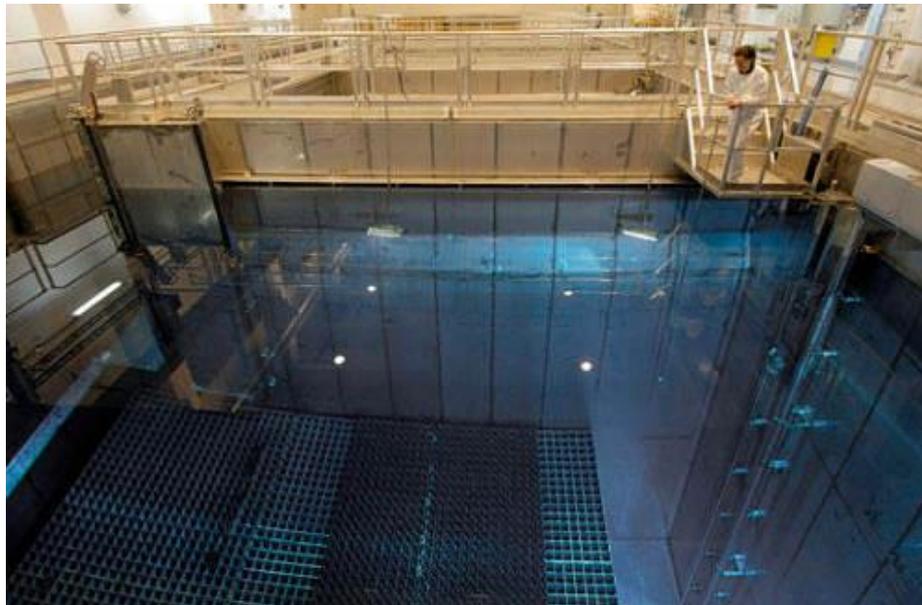


Рисунок 1 – Бассейн выдержки ОЯТ

Хотя годы назад практически каждая страна, эксплуатирующая несколько АЭС, имела планы по созданию постоянных хранилищ ОЯТ, на сегодняшний день ни одного постоянного геологического могильника для ОЯТ в мире не создано.

Пионерами таких разработок выступают Финляндия и Швеция, которые уже построили опытные хранилища постоянного типа, в которые поместили тестовые количества ОЯТ.

Финский могильник Онкало будет располагаться в скальной породе на глубине более 500 метров под дном Балтийского моря. Компанией Posiva в общей сложности должны быть проложены 7 км тоннелей, шахт и коридоров с удалением почти 150 тыс. м<sup>3</sup> породы (рисунок 2).

Проект стоимостью \$4,5 млрд либо продемонстрирует технические, социальные и политические достижения в вопросе захоронения ядерных отходов, либо отпугнёт другие страны от подобных идей.



Рисунок 2 – Финский постоянный могильник Онкало

В настоящее время проработана система захоронения с обеспечением нескольких степеней защиты: топливные сборки будут помещаться в герметичный чугунный кожух для предотвращения смещения сборок, чугунный кожух будет помещен в медную капсулу для защиты от коррозии, а между медными капсулами будет залита бентонитовая глина для обеспечения стабильного положения капсул в породе. Через глину может посредством диффузии проникать вода, но процесс настолько медлителен, что на преодоление слоя воде понадобятся миллионы лет.

Коммерческое использование должно начаться в 2020 году, а последняя ёмкость будет размещена под землёй только через сотню лет. По исчерпанию свободного пространства тоннель будет заполнен камнями и глиной, а вход закроет бетонная плита.

В 2020 году тепловыделяющие сборки (ТВС) будут изъяты из бассейнов около реакторов на Олкилуото и Ловииса, где они к тому моменту проведут 40 лет после 4-летней работы на АЭС, доставят в расположенную в Онкало защищённую комнату с толщиной стен в 1 м. С помощью удалённо контролируемой роботизированной руки инженеры проведут соответствующие операции перед помещением отработанного материала в медные канистры, в том числе просушивание. Конструкция из 12 топливных сборок может выделять до 2 кВт тепла, поэтому данная часть работы закончится быстро. Медные ёмкости выбраны потому, что в этой местности медь присутствует в породах и практически не изменяется со временем, потому условия для материала подходящие. Каждый медный цилиндр массой 26 тонн будет "запечатан" при помощи создания сварного соединения с крышкой высокоэнергетическими электронами.

Затем резервуары пройдут проверку на предмет дефектов и утечек рентгеновским излучением, ультразвуковым анализом и электромагнитными полями. Если тесты не выявят проблем, отработанное топливо будет опущено через шахты непосредственно к месту захоронения (рисунок 3).



Рисунок 3 – Заполнение хранилища

В Онкало должны быть захоронены 12000 тонн урана помимо изотопов и циркониевых стержней. Однако спрос на услуги Posiva ещё не гарантирован: всё больше стран учатся перерабатывать отработанное топливо и повторно использовать отделяемые от других элементов уран и плутоний.

Практически аналогичную технологию выбрали для захоронения ОЯТ в Швеции. Здесь также планируют складировать ОЯТ в скальных породах, возраст которых составляет около 1,8 млрд. лет и которые расположены на глубине около 500 метров.

В настоящее время около города Остхоммар, в гранитных породах на уровне 450 метров под землей создана исследовательская лаборатория, где контейнера для ОЯТ проходят натурные испытания (рисунок 4).



Рисунок 4 – Шведская капсула для захоронения ОЯТ

При этом шведская технология захоронения предусматривает технические решения по извлечению в будущем глубоко замурованного под землей ОЯТ для переработки.

#### Литература

1. Проблемы захоронения радиоактивных отходов (<http://ludiwosleaeskotlov.1bbs.info/viewtopic.php?t=566>)
2. Проблема ядерных отходов: в подземный тоннель на 100 тыс. лет / Денис Борн (<http://www.3dnews.ru/583893>).

УДК 621.18-5

## РАЗРАБОТКА АСР ТЕМПЕРАТУРЫ ПРЯМОЙ СЕТЕВОЙ ВОДЫ ДЛЯ МИНИ-ТЭЦ С ГПА

Мышленник М.А.

Научный руководитель – старший преподаватель Буров А.Л.

Современные котельные, реконструируемые в мини-ТЭЦ, должны удовлетворять следующим требованиям:

- обеспечение номинальной теплопроизводительности котлов;
- обеспечение высокой надежности и экономичности работы оборудования;
- обеспечение приемлемых экологических показателей;
- снижение влияния человеческого фактора;
- иметь малую стоимость капитальных и эксплуатационных расходов;
- работать в когенерационном режиме, т.е. вырабатывать два вида энергии – электрическую и тепловую, причем выработанная тепловая энергия должна полностью использоваться без сброса излишков в окружающую среду.

Появление энергетических двигателей внутреннего сгорания (ДВС), таких как газопоршневые агрегаты (ГПА) малой и средней мощности с высокими экономическими показателями (стоимость, КПД, эксплуатационные затраты) позволяет значительно расширить комбинированную выработку электроэнергии за счет вовлечения мелких потребителей, которые оказались вне возможностей традиционных паротурбинных ТЭЦ.

Основные преимущества мини-ТЭЦ на базе ГПА:

- обеспечивается более экономичное использование топлива;
- потребитель становится относительно независимым от энергосистемы, на него не распространяются ограничения по потреблению электроэнергии;
- электрическая и тепловая энергия, вырабатываемая собственно КГУ обходится потребителю значительно дешевле, чем энергия, получаемая от энергосистемы.

В данном докладе рассмотрим одно из преимуществ ГПА: использование тепла, полученного за счет охлаждения ДВС, а так же составим схему автоматизации для данного процесса.

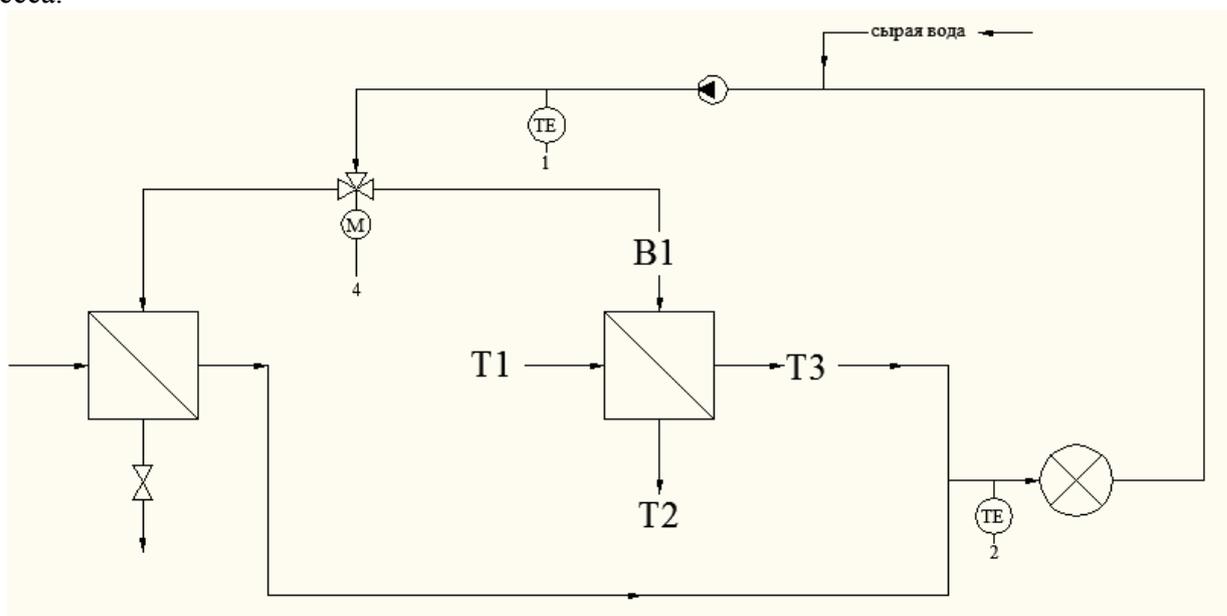


Рисунок 1 – Функциональная схема

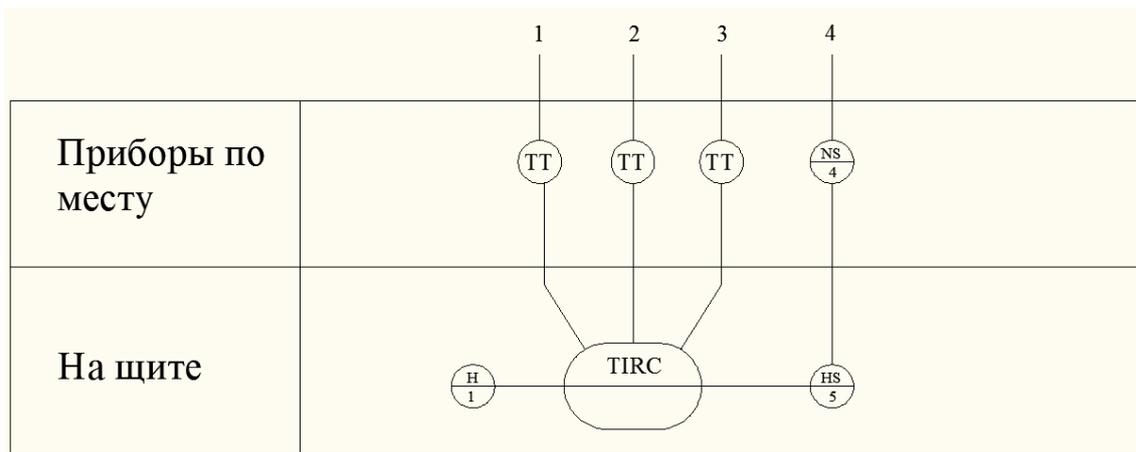


Рисунок 2 – Схема автоматизации

Схема работает по двум веткам. В первой нагрев воды для потребителя производится теплообменником, в котором греющей средой является сетевая вода от ГПА. Подпитка осуществляется сырой водой обычной врезкой в обратный трубопровод. В летнем режиме и при нормальной работе ГПА второй контур не задействуется, регулирующий клапан на левом теплообменнике закрыт.

При определенных условиях второй контур может работать независимо от первого контура, а также совместно:

- в случае останова ГПА или же срабатывания на ней технологических защит, на трехходовой клапан поступает сигнал, и вода идет на пароводяной теплообменник (левый), в котором греющий теплоноситель пар, вырабатываемый котельной – циркуляция воды осуществляется только по второму контуру.

- в зимнем режиме для достижения необходимой температуры теплоносителя, отдаваемого потребителю, работает и первый и второй контура. Регулирующий клапан на левом теплообменнике полностью открыт, а трехходовой клапан служит для разделения потока воды из обратного трубопровода. Режимы (зимний/летний) определяются с помощью датчика ТЕЗ (на схеме не указан), с которого сигнал о температуре наружного воздуха поступает на указанный выше регулятор.

### Моделирование АСР температуры воды теплообменного аппарата

Таблица 1 – Исходные данные

Параметр	Значение
Коэффициент усиления объекта для опережающего участка	$K_{оп} = 4,5 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{m}/\text{ч}$
Большая постоянная времени опережающего участка	$T_{оп} = 20 \text{ с}$
Меньшая постоянная времени опережающего участка	$\sigma_{оп} = 2 \text{ с}$
Коэффициент усиления объекта для инерционного участка	$K_{ин} = 1,5 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{m}/\text{ч}$
Большая постоянная времени инерционного участка	$T_{ин} = 103 \text{ с}$
Меньшая постоянная времени инерционного участка	$\sigma_{ин} = 18 \text{ с}$
Время по Кулакову	$T_{\kappa} = 121 \text{ с}$
Время запаздывания	$\tau_y = 40 \text{ с}$

АСР температуры воды в теплообменном аппарате будет представлять собой каскадную САР:

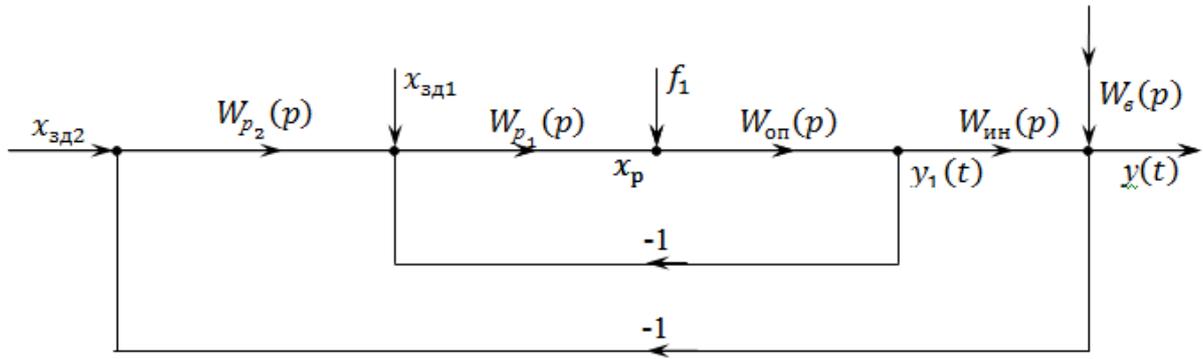


Рисунок 3 – Схема моделирования АСР температуры воды

где

$x_{зд1}, x_{зд2}$  – заданные значения промежуточной и основной регулируемых величин соответственно;

$y(t), y_1(t)$  – основная и промежуточная регулируемые величины соответственно;

$f_1, f_2$  – внутреннее и внешнее возмущения соответственно;

$\varepsilon_1(t), \varepsilon(t)$  – ошибки регулирования соответственно внутреннего и внешнего контуров.

Динамика опережающего участка представлена в виде инерционного звена второго порядка:

$$W_{оп}(p) = \frac{K_{оп}}{(T_{оп}p + 1)(\sigma_{оп}p + 1)} = \frac{4,5}{(20p + 1)(2p + 1)} \quad (1)$$

Динамика инерционного участка представлена в виде инерционного звена первого и второго порядков с запаздыванием:

$$W_{ин}(p) = \frac{K_{ин} \cdot e^{-\tau_y p}}{(T_k p + 1)} = \frac{1,5 \cdot e^{-40p}}{(121p + 1)} \quad (2)$$

$$\text{где } T_k = T_{ин} + \sigma_{ин} = 103 + 18 = 121 \quad (3)$$

$W_в(p)$  – передаточная функция крайнего внешнего возмущения:

$$W_в(p) = \frac{K_в}{T_в p + 1} = \frac{5}{30p + 1} \quad (4)$$

$W_{p1}(p)$  – передаточная функция стабилизирующего регулятора:

$$W_{p1}(p) = \frac{K_{p1}(T_{и1}p + 1)}{T_{и1}p} \quad (5)$$

$W_{p2}(p)$  – передаточная функция корректирующего регулятора:

$$W_{p2}(p) = \frac{K_{p2}(T_{и2}p + 1)}{T_{и2}p} \quad (6)$$

Передаточная функция стабилизирующего регулятора:

$$W_{p_1}(p) = \frac{1,766 \cdot (7,596p + 1)}{7,596p} \quad (7)$$

Передаточная функция корректирующего регулятора:

$$W_{p_2}(p) = \frac{1,008 \cdot (121p + 1)}{121p} \quad (8)$$

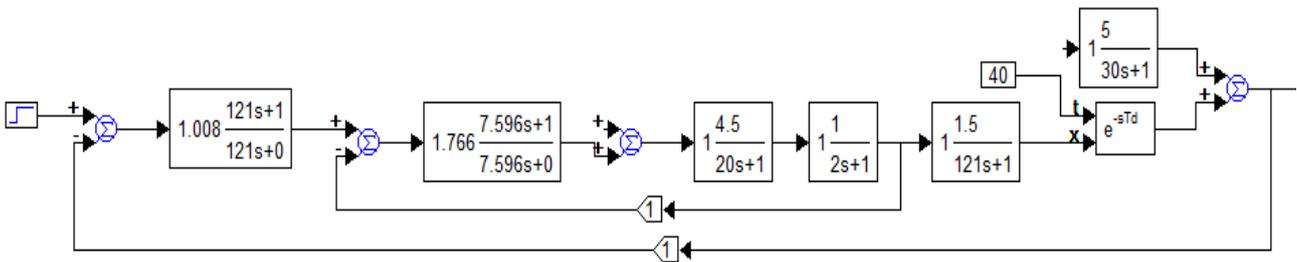


Рисунок 4 – Блок-схема типовой КСАР (динамика инерционного участка представлена в виде инерционного звена первого порядка с запаздыванием)

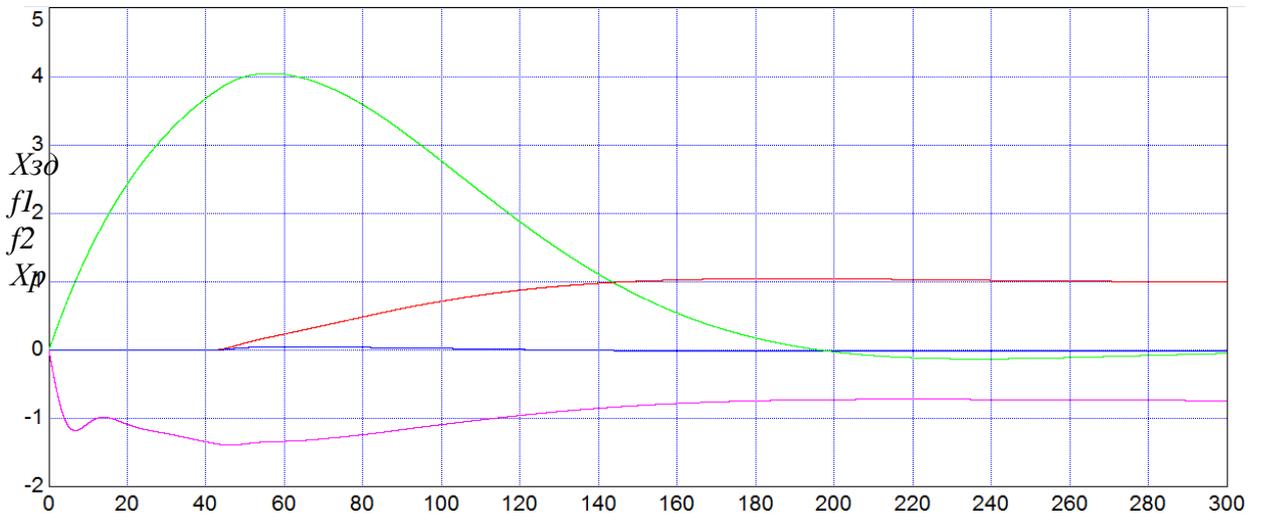


Рисунок 5 – Графики переходных процессов

Таблица 2 – Прямые показатели качества

	$t_{п}, c$	$A_{max1}^+$	$A_{max1}^-$	$\sigma_{max}, \%$	$\psi$
$x_{зд}$	240	0,038	–	4,6	1
$f_1$	121	0,04	0	–	1
$f_2$	300	4,04	0,13	–	1
$x_p$	–	–	1,39	–	–

### **Выводы**

В данном докладе были приведены основные преимущества мини-ТЭЦ на базе ГПА. Составлена функциональная схема, а так же схема автоматизации АСР температуры прямой сетевой воды. При помощи математической схемы моделирования рассчитаны параметры оптимальной динамической настройки регуляторов. Из графиков Рис. 5 видно, что система полностью отрабатывает внутренние и внешние возмущения, что от нее и требуется.

### **Литература**

4. Плетнев, П.Г. Автоматизированные технологических процессов и производств в теплоэнергетике. Учебное пособие для вузов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007.
5. Кулаков, Г.Т. «Инженерные экспресс-методы расчета промышленных систем регулирования». – Мн.: «Вышэйшая школа», 1984 г. – 192 с.
6. Кулаков, Г.Т. «Анализ и синтез систем автоматического регулирования». – Мн.: УП «Технопринт», 2003 г. – 134 с.

УДК 681.5

## **АСР УРОВНЯ В БАРАБАНЕ КОТЛА НА АППАРАТУРЕ КР-500**

Букрей Т.С.

Научный руководитель – к.э.н., старший преподаватель Кравченко В.В.

По уровню автоматизации теплоэнергетика занимает одно из ведущих мест среди других отраслей промышленности. Теплоэнергетические установки характеризуются непрерывностью протекающих в них процессов. Автоматизация параметров дает значительные преимущества:

- 1) обеспечивает уменьшение численности рабочего персонала, т.е. повышение производительности его труда,
- 2) приводит к изменению характера труда обслуживающего персонала,
- 3) увеличивает точность поддержания параметров вырабатываемого пара,
- 4) повышает безопасность труда и надежность работы оборудования,
- 5) увеличивает экономичность работы парогенератора.

Автоматизация парогенераторов включает в себя автоматическое регулирование, дистанционное управление, технологическую защиту, теплотехнический контроль, технологические блокировки и сигнализацию.

При автоматизации уровня в барабане котла одной из основных задач является регулирование расхода питательной воды и пара.

Для барабанных котлов водопаровой тракт разделен барабаном на паровую и водяную часть. Выходом тракта является паросборная камера, выходная среда – пар, расход пара определяет производительность котла, которая зависит от потребителей пара – паровых турбин. Расход пара измеряется с помощью специального сужающего устройства. Входом тракта является питательная магистраль, рабочая среда-питательная вода, расход которой также измеряется с помощью специального сужающего устройства.

Показателем баланса расхода пара и расхода питательной воды является уровень воды в барабане. Контроль уровня в барабане играет важную роль в протекании технологического процесса генерации пара.

Снижение уровня за пределы водомерного стекла, устанавливаемого на барабане, считается «упуском» воды, а превышение его верхней видимой части – «перепиткой». Расстояние между этими критическими отметками 400 мм.

В типовой САР реализовано в одном ПИ-регуляторе два принципа регулирования:

- 1) если убрать датчики расхода пара и питательной воды, то получится одноконтурная САР, где ПИ-регулятор будет называться регулятором стабилизации уровня на заданном уровне;
- 2) если убрать уровень и оставить соотношение двух расходов, то будет работать следящая система, где задающим сигналом будет расход пара, т.к. он диктуется потребителем, а отключающим сигналом будет расход питательной воды, т.е. в данном случае расход питательной воды отслеживает изменение текущего значения расхода пара.

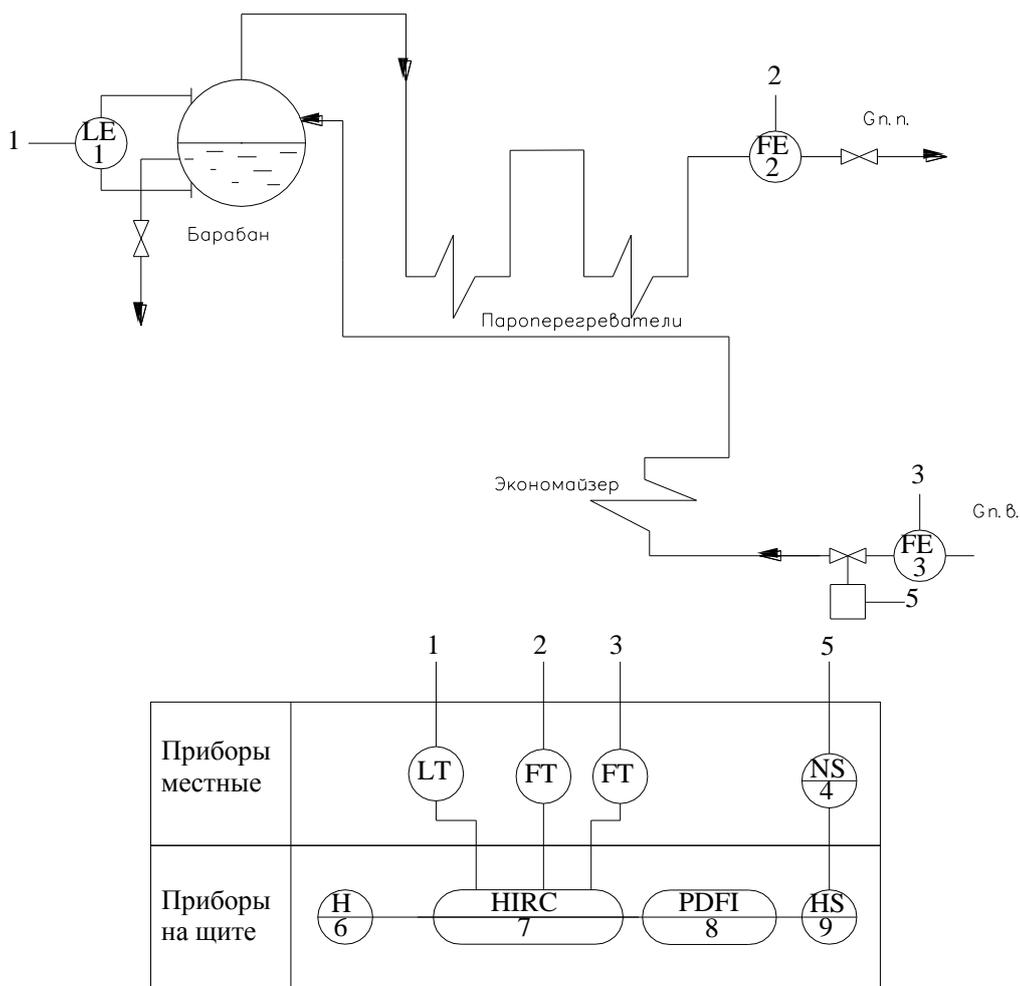


Рисунок 1 – Функциональная схема АСР уровня в барабане котла

На рисунке 1 изображено:

LE – первичный измерительный преобразователь для измерения уровня;

FE – первичный измерительный преобразователь для измерения расхода;

HIRC – регулятор температуры управляющий, регистрирующий, дающий команду на включение/отключение ИМ;

PDFI – прибор показывающий соотношение перепада давления;

NS – магнитный пускатель;

HS – ручное управление.

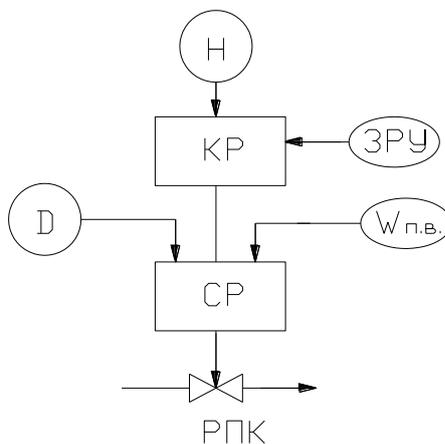


Рисунок 2 – КСАР РП барабанного котла

Таблица 1 – Прямые показатели качества

	Хзд			f1			
	$\sigma_m, \%$	$t_{P,c}$	$\psi$	$A_M$	$t_{P,c}$		
Клюев ( $\gamma=1$ )	-	367	1	1.10	717		
Дубровный ( $\gamma=0.87$ )	-	375	1	1.12	741		
Сибтехэнерго ( $\gamma=3$ )	-	460	1	1.38	880		
ПЗС 1 ( $\gamma=0.382$ )	-	430	1	1.28	810		
ПЗС 2 ( $\gamma=0.618$ )	-	391	1	1.17	758		
ПЗС 3 ( $\gamma=1.618$ )	-	354	1	1.06	712		
	f2~D			f2~Qr			Xp~ Qr
	$A_M^-$	$A_M^+$	$t_{P,c}$	$A_M^-$	$A_M^+$	$t_{P,c}$	
Клюев ( $\gamma=1$ )	-0.90	0.8	746	-	6.75	517	-6.1
Дубровный ( $\gamma=0.87$ )	-0.96	0.8	832	-	6.78	525	-6.0
Сибтехэнерго ( $\gamma=3$ )	-1.39	0.8	977	-	7.12	634	-5.2
ПЗС 1 ( $\gamma=0.382$ )	-1.25	0.8	965	-	7.01	598	-5.4
ПЗС 2 ( $\gamma=0.618$ )	-1.06	0.8	944	-	6.84	548	-5.9
ПЗС 3 ( $\gamma=1.618$ )	-0.87	0.8	731	-	6.67	499	-6.3

**Выводы**

В данной работе был использован объект без самовыравнивания.

При реализации П-регулятора метод ПЗС 3 ( $\gamma=1.618$ ) показал лучшие ППК в отличие от других методов.

При отработке f2~D статическая ошибка регулирования на 7% меньше, чем у метода Клюева и в 1.6 раз меньше, чем у метода Сибтехэнерго.

Так при отработке f1 статическая ошибка регулирования на 10% меньше, чем у метода Клюева и на 30% меньше, чем у метода Сибтехэнерго.

УДК 620.187:621.039:531

## ПРОБЛЕМЫ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Мурашко В.Д.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Герасимова А.Г.

Развитие ядерной энергетики происходит в жесткой конкурентной борьбе, как с традиционными технологиями производства электроэнергии, так и с альтернативными источниками. Ключевыми вопросами такой конкуренции являются безопасность и экономичность. Именно поведение конструкционных материалов эксплуатируемых и проектируемых ядерных реакторов определяет в значительной степени безопасную и экономичную работу атомных станций.

Роль конструкционных материалов состоит не только в обеспечении стабильности на весь период эксплуатации геометрии активной зоны и, в первую очередь, тепловыделяющих сборок (ТВС) и тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ), но и в удержании внутри ТВЭЛ продуктов деления топлива, сохранении работоспособности органов системы управления и защиты (СУЗ) и обеспечении минимальных последствий возможных аварийных ситуаций, т.е. по существу в решении ключевых вопросов безопасности реакторной установки.

Достижение высоких выгораний топлива ограничивается радиационной стойкостью материалов оболочек и чехлов тепловыделяющих сборок ТВС, а срок эксплуатации реакторов на тепловых нейтронах ограничивается ресурсом материалов корпусов и внутрикорпусных устройств [1].

### **Радиационная повреждаемость конструкционных материалов.**

Конструкционные материалы под действием облучения испытывают структурные превращения, оказывающие отрицательное влияние в первую очередь на механические свойства и коррозионную стойкость. Из всех видов облучения (нейтроны,  $\alpha$ - и  $\beta$ -частицы,  $\gamma$ -излучение) наиболее сильное влияние оказывает нейтронное облучение.

Нейтронное облучение материалов приводит к следующим изменениям характеристик материалов: упрочнению; низко- и высокотемпературному радиационному охрупчиванию; радиационной ползучести; радиационному росту и радиационному набуханию; появлению наведенной активности [2]. Поэтому одно из основных требований, предъявляемых к облучаемым материалам, – их высокая радиационная стойкость. *Радиационная стойкость* – способность материала сохранять в определенных допустимых пределах размеры, структуру и свойства при длительном воздействии радиационных излучений.

Модель радиационных повреждений, возникающих при соударении высокоэнергетических нейтронов с атомами кристаллической решетки показана на рисунке 1 [3].

Соударения вызывают смещения атомов или каскад смещений в решетке в зависимости от количества энергии, передаваемой нейтроном атому металла. Подвергшийся удару нейтроном первый атом, подобно бильiardному шару, ударяя по другим атомам, вызывает в решетке дополнительные смещения. В результате развития каскада образуются объемы с высокой концентрацией вакансий, по периферии окруженные зонами с повышенной плотностью межузельных атомов. Один нейтрон способен создать в алюминии более 6000 вакансий, в бериллии, с большей энергией межатомной связи, – более 450 вакансий.

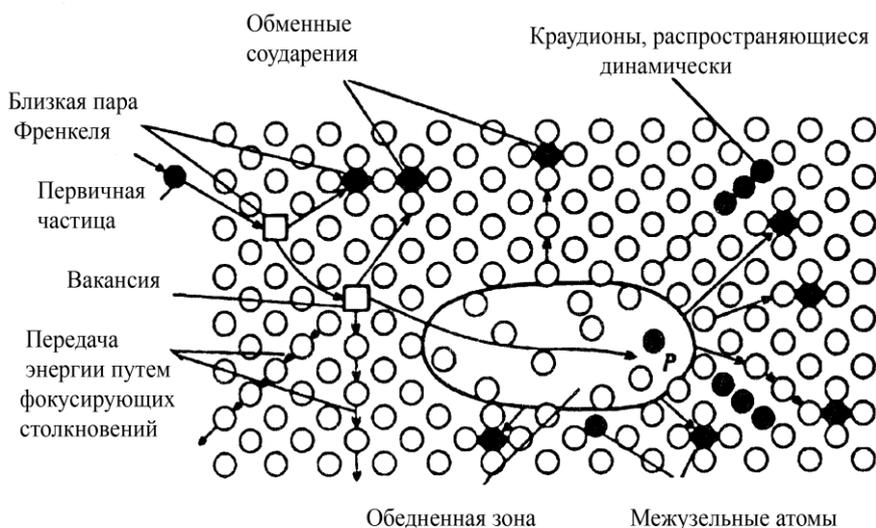


Рисунок 1 – Модель радиационных повреждений, возникающих при соударении нейтронов с атомами кристаллической решетки (модель Зеегера)

Помимо смещений большие нейтронные потоки за счет своей энергии возбуждают атомы, усиливают их колебания (это явление называют «радиационной тряской»), что сопровождается локальным повышением температуры. Рост температуры способствует радиационному отжигу, сопровождающемуся аннигиляцией вакансий и межузельных атомов. Высокие температуры и нейтронное облучение могут вызвать в материале ядерные реакции с образованием гелия, что в свою очередь приводит к появлению газовых пузырей по границам зерен.

Структурные изменения приводят к изменению механических свойств. В результате при температуре ниже температуры рекристаллизации – низкотемпературного облучения – металл упрочняется, но теряет вязкость и пластичность.

Действие низкотемпературного облучения на свойства напоминает наклеп – холодную пластическую деформацию. Однако, несмотря на такую аналогию, механизмы воздействия радиационного повреждения и наклепа на структуру материала принципиально различны, поскольку радиационное повреждение связано преимущественно с образованием точечных дефектов, тогда как деформационное упрочнение связано в основном с появлением линейных дефектов.

В условиях облучения выше температуры рекристаллизации (высокотемпературное облучение) роль точечных радиационных дефектов снижается. Вакансии и межузельные атомы частично аннигилируют друг с другом, частично взаимодействуют с примесями, дислокациями, границами раздела. Оставшиеся межузельные атомы и вакансии объединяются в кластеры, которые в свою очередь могут превращаться соответственно в дислокационные петли межузельного или вакансионного типа (рис. 2, [3]).

Высокотемпературное облучение активизирует диффузионные процессы и способствует распаду пересыщенных твердых растворов – старению. Этим объясняется высокотемпературная хрупкость аустенитных хромоникелевых сталей. Активизацией диффузионных процессов также объясняется снижение длительной прочности при облучении. Падение жаропрочности растет с увеличением температуры и интенсивности нейтронного потока.

При высокотемпературном облучении большими нейтронными потоками в аустенитных сталях и сплавах на основе  $Ni$ ,  $Ti$ ,  $Mo$ ,  $Zr$ ,  $Be$  зарождаются и растут вакансионные поры, а более подвижные межузельные атомы уходят на дальние стоки (краевые дислокации, границы зерен и др.), что приводит к заметному увеличению объема металла – радиационному распуханию.

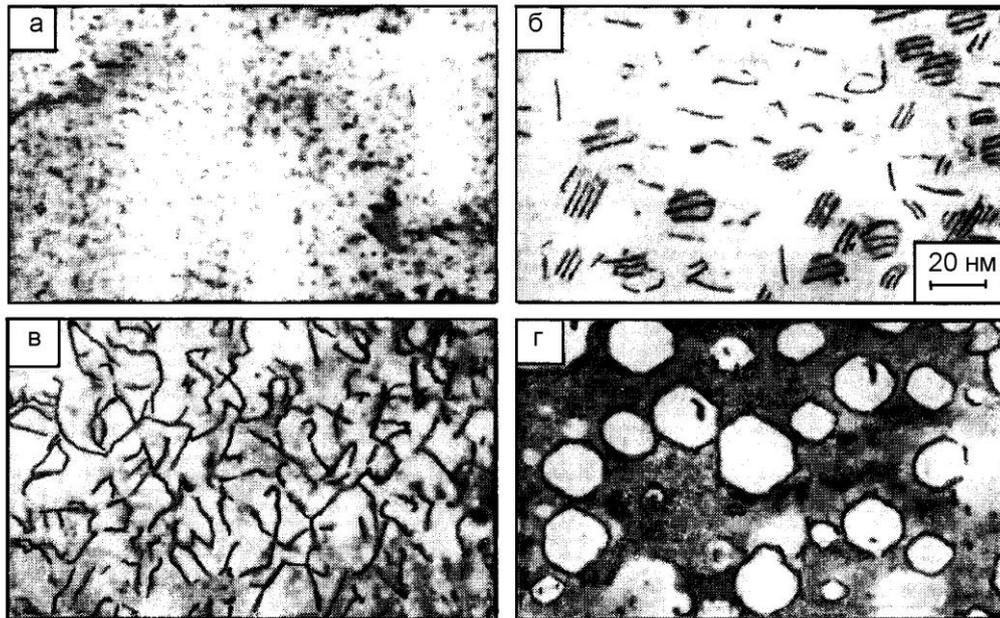


Рисунок 2 – Эволюция дефектной структуры аустенитной стали при облучении ионами хрома ( $E = 1$  МэВ):

- а – кластеры из точечных дефектов при облучении до 0,1 смещ/атом;
- б – дислокационные петли при 2 смещ/атом;
- в – дислокационная сетка при 15 смещ/атом;
- г – вакансионные поры при 100 смещ/атом

Объем аустенитных сталей, облученных при рабочей температуре  $450^{\circ}\text{C}$ , линейно растет с увеличением нейтронного потока. Объем может увеличиться на 20 % и более. Распухание усиливается в результате скопления в микропорах газов, образовавшихся при облучении. Легирование хромоникелевых сталей титаном, молибденом, ниобием снижает их распухание. Высокохромистые ферритные и перлитные стали с меньшей растворимостью водорода характеризуются меньшей склонностью к распуханию.

При облучении резко снижается коррозионная стойкость металлов и сплавов. Вода и водяной пар являются теплоносителями в водном и пароводяном трактах АЭС. Вследствие радиолиза меняется состав электролита – происходит разрушение молекул воды с образованием ионов и атомов кислорода, водорода и щелочной гидроксильной группы  $\text{OH}^-$ . Конструкционные реакторные материалы, подвергающиеся облучению, работают в контакте с водой и паром. Образующийся кислород окисляет металл, а водород его наводороживает и тем самым дополнительно охрупчивает. Радиолиз воды и увеличение концентрации гидроксильной группы способствуют растворению поверхностных оксидных пленок, в обычных условиях защищающих металл от коррозии.

Аустенитные хромоникелевые стали во влажном паре подвержены межкристаллической коррозии и коррозионному растрескиванию.

Радиационная стойкость количественно характеризуется максимальным значением поглощенной дозы (Грей), при которой материал становится непригодным для конкретных условий применения. Радиационная стойкость конструкционной стали имеет значение около  $5 \cdot 10^7$  Гр.

Предварительная радиационно-термическая обработка – облучение и отжиг – позволяет увеличить радиационную стойкость материалов в 10–15 раз.

При исследовании металлов на радиационную стойкость наиболее чувствительным является метод измерения электросопротивления, т.к. их электрическое сопротивление возрастает за счет образования радиационных дефектов [4].

**Материалы ядерных реакторов.** Целесообразность использования материалов в ядерных энергетических установках (ЯЭУ) определенного типа зависит от конструктивных особенностей ЯЭУ, используемого теплоносителя, энергетического спектра нейтронов и т.д. Как говорилось ранее, нейтронное облучение материалов приводит к следующим изменениям характеристик материалов: упрочнению; низко- и высокотемпературному радиационному охрупчиванию; радиационной ползучести; радиационному росту и радиационному набуханию; появлению наведенной активности. Именно эти характеристики, наряду с коррозионной стойкостью, являются приоритетными при оценке и сравнении различных конструкционных материалов. При разработке новых материалов главной задачей является достижение минимального или допустимого изменения этих характеристик с целью обеспечения требуемой надежности и долговечности элементов конструкции.

Требование малой активируемости или быстрого спада наведенной активности в настоящее время является обязательным при разработке проектов термоядерных реакторов (ТЯР) ввиду существенно большего, чем в активной зоне реактора деления, объема облучаемых конструкций.

Стали ферритно-перлитного и мартенситно-ферритного классов являются основными материалами для изготовления корпусов водо-водяных реакторов.

Нержавеющие стали и сплавы на основе никеля и хрома используются в качестве оболочек поглощающих элементов, пружинных элементов ТВЭЛов и ТВС и в отдельных случаях для дистанционирующих решеток ТВС. Для быстрых реакторов, работающих при более высоких температурах и энергонапряженности, используются жаропрочные холоднодеформированные аустенитные стали, хромистые мартенситно-ферритные стали, никелевые сплавы. Для первой стенки термоядерного реактора с гелиевым охлаждением основным материалом являются малоактивируемые хромистые стали, при охлаждении литием – сплавы ванадия, легированные титаном и хромом. Указанные материалы используются как в отечественных, так и зарубежных реакторах. Отличия состоят в легирующих элементах и технологии получения, которые, в конечном счете, и определяют их служебные характеристики.

#### Литература

1. Воеводин, В.Н. Конструкционные материалы ядерной энергетики – вызов 21 века // Вопросы атомной науки и техники// №2. – 2007. С. 10–22.
2. Воеводин, В.Н. Эволюция структурно-фазового состояния и радиационная стойкость конструкционных материалов/ В.Н. Воеводин, И.М. Неклюдов. – Киев: «Наукова думка», 2006. – 378с.
3. Солнцев, Ю.П. Материаловедение: Учебник для вузов / Ю.П. Солнцев, Е.И. Пряхин, Ф. Войкут. – М.: МИСИС, 1999. – 600с.
4. Амаев, А.Д. Радиационная повреждаемость и работоспособность конструкционных материалов/ А.Д. Амаев, А.М. Крюков, И.М. Неклюдов и др.; Под ред. А.М. Паршина и П.А. Платонова. – СПб.: Политехника, 1997. – 348с.

УДК 621.165

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Нестерова М.В.

Научный руководитель – старший преподаватель Пантелей Н.В.

Повышение эффективности работы системы технического водоснабжения электростанций можно рассмотреть на примере Гомельской станции, где был успешно произведен ряд модернизаций.

1 этап: Внедрение автоматизированной системы шариковой очистки конденсаторов турбин Т-180/210-130 ст.№1-3

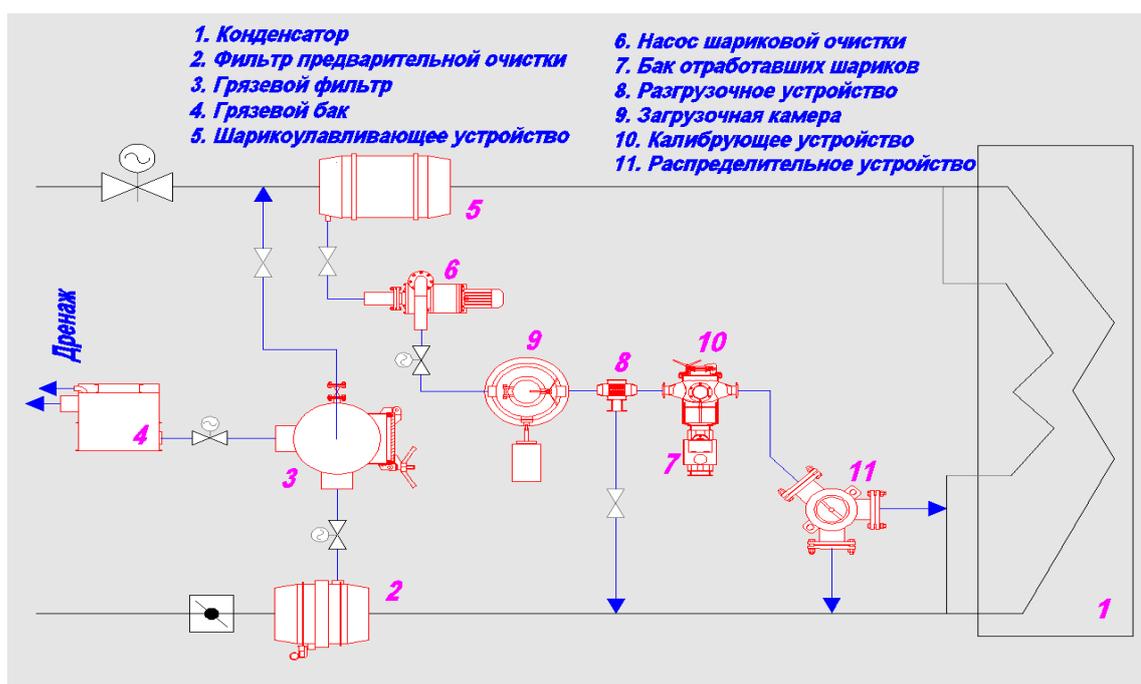


Рисунок 1 – Принципиальная схема системы шариковой очистки конденсатора 180-КЦС-1 турбоагрегата Т-180/210-130-1 ЛМЗ

Создание АСШО конденсаторов 180-КЦС-1 турбин Т-180/210-130 ст.№1÷3, исходя из опыта эксплуатации, позволило получить следующие результаты:

- снизить давление отработавшего пара в конденсаторе (вакуум), что привело к экономии топлива 2998 т.у.т./год и, кроме этого, уменьшить вредные выбросы в атмосферу, повысить экологичность работы оборудования энергоблоков в целом;
- существенно снизить эксплуатационные затраты на обслуживание конденсационной установки за счет исключения альтернативных методов очистки (промывка трубок высоконапорной установкой «Вома») – 30–35 тыс. долл. США /год;
- улучшить воднохимический режим и повысить надежность работы блока за счет сохранения неизменной жесткости основного конденсата;
- исключить коррозию конденсаторных трубок, значительно увеличив срок их службы.

2 этап: Реконструкция градирен № 1

С целью повышения эффективности работы градирен необходим комплексный подход при их реконструкции, а также всех взаимосвязанных с ними технологических узлов, оказывающих влияние на изменения эксплуатационных характеристик системы технического водоснабжения.

При реконструкции градирни № 1 были проведены следующие работы:

### 1) Реконструкция водораспределительной системы градири

Были установлены низконапорные водоразбрызгивающие сопла с разбрызгиванием вниз, что позволило при низких напорах воды перед ними обеспечить необходимую площадь орошения, эффективность разбрызгивания, предотвращение отложений в трубах.

Применение сопел с диаметром выходного отверстия 20 или 22 мм выравнивает аэродинамическое сопротивление между центральной и периферийной частями.

### 2) Замена оросительного устройства

Находящиеся в эксплуатации системы технического водоснабжения в процессе длительного срока эксплуатации, физического и морального износа оборудования и конструкций градири происходит ухудшение гидравлических характеристик, снижается охлаждающая эффективность.

Тепло-массообменное устройство градири (ТМУ) отвечает за охлаждение воды, в нём происходит до 90% всего теплосъема и охлаждения технологической воды. От эффективности и надёжности работы ТМУ зависит эффективность и надёжность работы всего оборудования предприятия.

Основное назначение ТМУ – создание развернутой поверхности воды и условий для беспрепятственной подачи воздуха к этой поверхности.

В зависимости от способа охлаждения воды в результате контакта с воздухом различают три типа оросителей:

- Плёночные ТМУ (асбоцементные, деревянные).

Охлаждение происходит в результате контакта воздуха с водяной плёнкой, образующейся на элементах при обтекании их падающей сверху водой. Применялись до 90-х годов.

- Капельно-плёночные ТМУ (из полимерных листов и трубок). Охлаждение происходит в результате контакта воздуха с водяной плёнкой, крупными и мелкими каплями. Низкая эффективность теплосъема вследствие кратковременного образования плёнки и малой степени дробления капель.

- Капельные ТМУ (оросители решётчатой структуры). Самые эффективные оросители, т.к. съём тепла с капель гораздо выше, чем с плёнки. Структура и величина поверхности охлаждения, образующейся при раздроблении воды в решетнике, активная поверхность охлаждения определяются свободной поверхностью капель, падающих с одних элементов на другие. Капли воды попадающие на элементы ударяются об них, дробятся, образуя новые капельные структуры с новой поверхностью контакта с воздухом. При этом многоярусный ороситель одновременно уменьшает среднюю скорость падения капель и перемешивание воды по пути ее движения.

Мировой практикой установлено, что по экономическим, тепловым и аэродинамическим показателям максимальный эффект в полимерных конструкциях достигается в оросителях имеющих решетчатую структуру.

### 3) Монтаж системы зимнего обогрева

Основными особенностями работы градири Гомельской ТЭЦ-2 в зимнее время года являются:

- значительные изменения тепловых нагрузок на градири (снижение нагрузок в ночное время и выходные дни с переходом работы блоков в режим теплового графика для соблюдения заданного диспетчерского графика выработки электрической мощности энергоблоками);

- в периферийной части градири система водораспределения выполнена таким образом, что от крайних сопел капли воды попадают на внутреннюю поверхность оболочки и вода по оболочке стекает вниз и попадает на опорную наклонную колоннаду вытяжной башни.

Снижение суммарной электрической нагрузки энергоблоков ТЭС или останов энергоблоков приводит к значительному снижению тепловых нагрузок на градири.

При отрицательных температурах наружного воздуха естественная тяга воздуха в градирне повышается, что приводит к снижению температуры охлажденной воды в градирне. При одновременном снижении температуры наружного воздуха и уменьшении тепловой нагрузки на градирню происходит более интенсивное снижение температуры охлажденной воды. Снижение температуры охлажденной воды в градирне приводит к обледенению градирни. Интенсивному обледенению наиболее подвержена периферийная часть градирни, кроме того появляется опасность образования шуги в циркуляционной воде.

При использовании системы с поворотными или съёмными щитами не всегда обеспечивается исключение обмерзания периферийной части градирни по причине прорыва потоков холодного воздуха через зазоры в щитах. А в связи с тем, что на периферии градирни всегда имеются участки с малой (незначительной) плотностью орошения то в этих зонах и может происходить интенсивное обмерзание технологических и конструктивных элементов градирни.

Наиболее эффективным методом предотвращения обледенения и регулирования температуры охлажденной воды после градирни является комбинированный метод – одновременное создания водяной завесы и установка на воздухоподводящих окнах градирни поворотных или съёмных щитов.

Поворотные щиты обеспечивают возможность в широком диапазоне регулировать расход воздуха, поступающего в градирню, и даже при малых тепловых нагрузках и низких температурах наружного воздуха обеспечить поддержание температуры охлажденной воды в требуемом диапазоне.

Создание водяной завесы при комбинированном методе исключает обмерзание технологических и конструктивных элементов по периферии градирни от потоков холодного воздуха, который прорывается через зазоры в щитах.

Водяная завеса создает дополнительное сопротивление на входе воздуха в подпоросительное пространство градирни, снижает тягу и уменьшает расход воды через ороситель градирни примерно на 25 %, это приводит к ухудшению охлаждающей способности градирни и увеличению температуры охлажденной воды в градирне, что препятствует обмерзанию периферийной части градирни.

#### 4) Монтаж перемычки между сливными циркуловодами

Из-за особенностей схемы подключения сливных трубопроводов после конденсаторов турбин к магистральным сливным циркуловодам происходит неравномерное распределение расходов воды между градирнями, а также между половинами каждой из градирен.

Для уменьшения неравномерности распределения потоков воды между охладителями и сливными магистральными циркуловодами была установлена перемычка (Ду 1600).

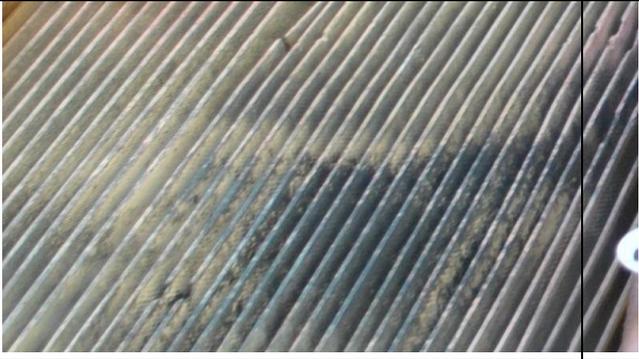
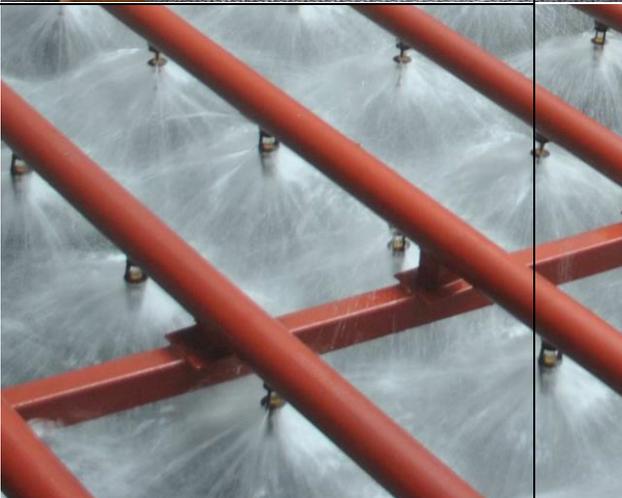
#### Эффективность реконструкции градирни № 1:

Повышение охлаждающей эффективности градирни № 1 на 4 °С за период года с положительными температурами наружного воздуха позволит дополнительно выработать 6,4 млн. кВт\*ч электроэнергии. Экономия топлива за счет улучшения вакуума в конденсаторах турбин - 1797 т.у.т/год.

Положительный опыт реконструкции и модернизации водоохлаждающего устройства градирни № 1 Гомельской ТЭЦ-2 далее можно использовать как при реконструкции существующих, так и при строительстве новых вентиляторных и башенных градирен не только на объектах Белорусской энергосистемы, но и на других промышленных предприятиях Республики Беларусь.

В таблице 1 можно увидеть сравнение результатов до модернизации и после.

Таблица 1 – Модернизация градирни №1  
После реконструкции

До реконструкции	После реконструкции
	
	
	
	

УДК 621.165

## **ВНЕДРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ВИБРОМОНИТОРИНГА ОСНОВНОГО И ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ТУРБИННОГО ЦЕХА**

Перевязчикова Д.А.

Научный руководитель – старший преподаватель Пантелей Н.В.

Отечественный и зарубежный опыт показывает, что внедрение средств диагностирования является одним из важнейших факторов повышения экономической эффективности использования оборудования в промышленности. Назначение диагностики – выявление и предупреждение отказов и неисправностей, поддержание эксплуатационных показателей в установленных пределах, прогнозирование состояния в целях полного использования доремонтного и межремонтного ресурса.

Диагностика проводится в условиях неполноты и неопределенности информации, и поэтому неизбежен компромисс между пропусками дефекта и необоснованными заключениями о неисправности объекта.

Вибродиагностическими методами решаются две основные задачи диагностики эксплуатируемых агрегатов: распознавание состояния эксплуатируемого агрегата и выявление причин и условий, вызывающих неисправности, которые следует устранить.

Используя упрощенные математические модели колебаний в динамических системах, ранее накопленный опыт и широкие, достаточно тонкие экспериментальные исследования единичных объектов, получают информацию о диагностических признаках, например опасных колебаниях. На этой основе оценивают состояние всего парка эксплуатируемых машин. В дальнейшем используют статистику парка машин и результаты их диагностирования, проводя коррекцию критериев оценки состояний исследуемой системы, параметров состояний и их диагностических признаков, т.е. реализуют обратную связь на основе диагностирования парка машин.

Разнообразие дефектов, обнаруживаемых методами вибрационной диагностики, и сложность сигналов, порождаемых неисправностями колебаниями деталей агрегатов, заставляет при выявлении и измерении диагностических параметров проводить разнообразную обработку сигналов:

- разделение вибрационного сигнала в частотно-фазовой и временной областях на «элементарные» сигналы, т.е. на компоненты, обусловленные различными факторами, каждый из которых является самостоятельным источником, вызывающим колебания;
- пространственное разделение вибрационных сигналов;
- восстановление форм выделенных «элементарных» сигналов;
- линейные и нелинейные преобразования сигналов (фильтрацию, нормализацию, интегрирование, дифференцирование и т.д.);
- измерение отдельных параметров и статистических характеристик сигналов;
- измерение характеристик взаимосвязи сигналов.

Выбор способа обработки сигнала и соответствующей структурной схемы измерительного канала определяется постановкой диагностической задачи, особенностями исследуемого и выделяемого сигналов, особенностями конструкции обследуемого оборудования и прочими факторами.

### **Организация работ по исследованию вибрации Категории оборудования и мониторинг**

Оборудование разделяют на категории в зависимости от потенциальной возможности и значимости внеплановых отказов, а также сложности обслуживания. Как правило, большая часть роторных агрегатов может быть отнесена к одной из следующих пяти категорий:

–1-я категория – критические основные агрегаты большой единичной мощности, где внеплановый отказ или авария сопровождаются значительными потерями продукции,

серьезными экологическими последствиями и др.; в эту категорию включают непрерывно эксплуатируемые безрезервные турбоагрегаты, компрессора и насосы единичной мощностью свыше 1 МВт;

–2-я категория – критические основные агрегаты средней единичной мощности, где внеплановый отказ или авария сопровождаются значительными потерями продукции, серьезными экологическими последствиями и др.; в эту категорию включают непрерывно эксплуатируемые безрезервные турбоагрегаты, компрессора и насосы единичной мощностью от 0,2 до 1 МВт;

–3-я категория – критические или, возможно, склонные к внеплановым отказам и авариям основные агрегаты со сложным ТУ, где внеплановый отказ или авария подвергнет опасности остановки, но не прервет основное производство; в эту категорию включают резервированные турбоагрегаты, компрессора и насосы единичной мощностью свыше 200 кВт;

–4-я категория – критическое вспомогательное оборудование, требующее необременительного обслуживания; в эту категорию включают компрессора и насосы единичной мощностью менее 200 кВт;

–5-я категория – некритическое вспомогательное оборудование, технологические обвязки (трубопроводы, аппараты, арматура).

Оборудование 1-й категории и наиболее ответственные позиции оборудования 2-й и 3-й категорий целесообразно оснащать стационарной аппаратурой контроля рабочих параметров, т. е. применять непрерывный контроль, позволяющий быстро распознать состояние и продиагностировать агрегат. Поскольку этот способ является дорогостоящим, в промышленной практике существует ограниченный ряд агрегатов, где непрерывный контроль может окупить вложенные средства. Периодический вибромониторинг агрегатов 2-й и 3-й категории, если на них не установлена стационарная система контроля рабочих параметров, следует проводить обязательно.

Масштаб охвата периодическим мониторингом (распознаванием состояния) агрегатов 4-й и 5-й категорий зависит от многих факторов, индивидуальных для каждого предприятия, немаловажное место среди которых занимают наличие специалистов виброизмерительного оборудования, а также результаты функционально-стоимостного анализа.

### **Проведение измерений**

Диагностические измерения и исследования вибрации оборудования можно разделить на следующие виды: контрольные измерения работающего агрегата, специальные диагностические измерения работающего агрегата, а также обследование остановленного агрегата.

*Контрольные измерения* предназначены для распознавания прогнозирования технического состояния агрегата с учетом влияния на состояния технологических режимов эксплуатации оборудования. Контрольные измерения в свою очередь можно разделить на текущее контрольное измерение вибрации и полное контрольное измерение вибрации.

Текущее контрольное измерение позволяет с минимальными трудозатратами обеспечить мониторинг состояния оборудования в период между более дорогими полными контрольными измерениями вибрации и, в большинстве случаев, вовремя обратить внимание на изменение состояния оборудования, если оно происходит.

Полное контрольное измерение вибрации производится без вмешательства в режим эксплуатации агрегата и, в основном ограничивается измерением трех составляющих вибрации в контрольных измерительных точках (как правило, на опорах). Иногда в контрольные измерительные точки включают точки основания (рамы, фундаментных болтов), статора, и других частей агрегата, в которых вибрация измеряется только в случае достижения значением параметра вибрации какой-либо из контрольных точек установленного допустимого значения.

Полное контрольное измерение позволяет распознать состояние агрегата, выяснить причины вибрации и при необходимости построить последующие работы таким образом, чтобы выделить из группы вероятных действительную причину.

*Специальные диагностические измерения и обследование остановленного агрегата* предназначены для выявления дефектов и причин их возникновения, оценки и прогнозирования степени развития дефектов и разработки рекомендаций по их устранению.

В большинстве случаев период развития механических дефектов агрегата, прежде чем последний окажется в предельном состоянии, достаточен для их обнаружения средствами и методами периодического вибромониторинга. Период развития дефекта зависит от многих факторов (например, от вида износа) и может составлять от нескольких минут или часов (при заедании) до многих месяцев (при абразивном износе). Поэтому интервал периодических измерений вибрации обычно выбирают исходя из перечня контролируемых дефектов и режима эксплуатации оборудования.

Различают несколько этапов проведения виброизмерений: после ремонта и монтажа, после завершения процесса приработки, на начальном этапе эксплуатации, в процессе эксплуатации, после нарушений технологического режима, после изменения состояния агрегата и перед остановкой агрегата на ремонт.

### **Организация системы ТО предприятия**

Применяемые в настоящее время виды технического обслуживания оборудования представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Характерные особенности влияния различных подходов к техническому обслуживанию на производственный процесс и межремонтные интервалы

Вид обслуживания	технического	Характерные особенности
Реактивное обслуживание	(реагирующее)	Повышенная вероятность значительных внеплановых остановок оборудования и перебоев в работе
Планово-профилактическое обслуживание		Всеобъемлющее обслуживание оборудования для профилактики внеплановых остановов и сбоев в работе
Обслуживание по фактическому состоянию	по техническому	Обслуживание только дефектного оборудования в сочетании с профилактикой внеплановых остановов
Проактивное обслуживание		Продление межремонтного интервала и интервала между обследованиями

Цель периодического *планово-профилактического обслуживания* состоит в исключении отказов оборудования и непредвиденных расходов (которые, например, могут произойти при реактивном обслуживании) путем планирования и проведения технического обслуживания ранее момента вероятного среднестатистического отказа.

Базисом деятельности служит обычно 52-недельный план-график ТО, составляемый службой главного механика (ремонтной службой), которая определяет и отслеживает бюджет и основу повседневной деятельности службы ремонта, а также выполняет многие другие административные функции, такие, как отслеживание списка и пополнение запасных частей для ТО, хранение истории агрегатов, функционально-стоимостной анализ обслуживания и др.

Техническое и промышленное обеспечение ППР базируется на том, что имея статистические данные истории отказов оборудования и зная характеристики развития процессов изнашивания узлов механизма в зависимости от наработки, можно определить и установить такой срок эксплуатации оборудования (межремонтный интервал), при котором вероятность интенсивного износа и отказов мала. Ревизия и замена компонента

оборудования по прошествии очередного фиксированного межремонтного интервала значительно уменьшает вероятность внезапного отказа.

Основная идея *обслуживания по фактическому техническому состоянию* состоит в устранении отказов оборудования путем применения методов распознавания технического состояния оборудования по совокупности его виброакустических характеристик, выявления имеющихся или развивающихся дефектов и определения оптимальных сроков проведения ремонтных работ.

Техническая база ОФС основана на том, что существует взаимосвязь между возможными техническими неисправностями агрегата и диагностическими параметрами, которые можно контролировать.

Основой обслуживания по фактическому техническому состоянию является вибромониторинг оборудования. Наблюдение за развитием и применением средств измерений показывает, что предприятия (особенно крупные) начинают осуществлять программу ОФС именно с распознавания и определения состояния оборудования при помощи мониторинга вибрации и, получив экономический эффект, внедряют и другие технические новинки в этой области. Затраты на вибромониторинг и вибродиагностику, в случае добросовестного, обоснованного и систематического применения, обычно окупаются за время от 2 до 6 месяцев использования.

Обслуживание оборудования по фактическому техническому состоянию базируется на применении ряда методов технической диагностики и распознавания технических состояний, которые, в сочетании, позволяют определять большую часть различных дефектов, возникающих в технологическом оборудовании предприятия.

Идея *проактивного технического обслуживания* оборудования заключается в обеспечении максимально возможного межремонтного срока эксплуатации оборудования за счет применения современных технологий обнаружения и подавления источников отказов.

Основой ПАО являются:

- идентификация и устранение источников повторяющихся проблем, приводящих к сокращению межремонтного интервала оборудования;
- устранение или значительное снижение факторов, отрицательно влияющих на межремонтный интервал или срок эксплуатации оборудования;
- распознавание состояния нового и восстановленного оборудования с целью проверки отсутствия признаков дефектов, уменьшающих межремонтный интервал;
- увеличение межремонтного интервала и срока эксплуатации оборудования за счет проведения монтажных, наладочных и ремонтных работ в точном соответствии с техническими условиями и регламентом.

ПАО базируется на применении нескольких компонентов, сочетание которых дает максимальный эффект:

- анализ причин внеплановых остановов, аварий, укороченных межремонтных интервалов, включающий выявление повторяющихся проблем, возникающих при эксплуатации оборудования;
- безукоризненное соблюдение требований технических условий при монтаже и ремонте агрегата и исследование вибрации при выводе из ремонта могут значительно продлить последующий межремонтный интервал;
- оценка технического состояния агрегата после ремонта;
- входной и выходной контроль;
- кадровое обеспечение ПАО.

### **Программа обеспечения надежности механического оборудования**

Реализация программы ОНМО заключается в определении необходимого баланса объемов выполнения стратегий ППР, ОФС и ПАО. Эти стратегии повышения надежности отнюдь не являются независимыми. Их рациональное совместное выполнение усиливает результат, компенсируя недостатки каждой из них, и приводит к достижению максимальной и стабильной производительности оборудования. Основой ОНМО является ОФС. Точная

информация о состоянии механического оборудования, обеспечиваемая проведением вибромониторинга, делает возможным и рентабельным на основе функционально-стоимостного анализа правильный баланс ППР и ПАО. Кроме экономического, технического и информационного эффекта, который ОФС обеспечивает в достаточно короткий период, современные технические средства контроля и повышение квалификации специалистов, необходимые для осуществления ОФС, обеспечивают прочный фундамент для внедрения других программ ОНМО.

Программа ОНМО при реализации должна обеспечить:

–исключение внеплановых остановок (внезапных отказов) оборудования при достижении максимально длительного полезного срока службы дорогостоящего оборудования;

–постоянное наличие (представление) информации о состоянии оборудования, позволяющее судить о состоянии общей производительности, а также прогнозирование и планирование потребности в обслуживании;

–обеспечение равномерной прогнозируемой и обоснованной загрузки ремонтного персонала, совместное планирование графиков и объемов обслуживания ремонтными и технологическими службами;

–снижение эксплуатационных затрат предприятия, увеличение прибыли, повышение безопасности труда, охраны окружающей среды, качества продукции и сокращение отходов.

Эффективное приложение практики ОНМО может значительно уменьшить вероятность внезапного отказа, особенно в начальный и заключительный период эксплуатации.

Функционально-стоимостной анализ – это исследование полезного эффекта создаваемой продукции, приходящегося на единицу затрат с целью оптимизации технических решений и значений параметров продукции или ее составных частей. В данном случае под продукцией понимается сама программа ОНМО. С первого шага реализации программы ОНМО следует утвердить на уровне руководителя предприятия показатели (индексы), по которым будет происходить оценка ее действенности, и обеспечить регистрацию этих показателей заинтересованными службами предприятия.

Внедрение технологии вибромониторинга и диагностики оборудования на современном этапе является актуальным решением задачи повышения экономической эффективности использования оборудования в промышленности.

#### Литература

1. Ширман А.Р., Соловьев А.Б. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования // Москва, 1996. – С. 1-1–3-22.

УДК 681.5.03

## ПРОЕКТ ПРОМЫШЛЕННО-ОТОПИТЕЛЬНОЙ ТЭЦ С РАЗРАБОТКОЙ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ НЕПРЕРЫВНОЙ ДУХСТУПЕНЧАТОЙ ПРОДУВКИ

Рыбак А.А.

Научный руководитель – к.э.н., старший преподаватель Кравченко В.В.

Задачами данного проекта являются:

1. Разработка вариантов автоматизации непрерывной продувки барабанного котла БКЗ-420 на современной аппаратуре.

2. Разработка структурной, функциональной и принципиальной электрической схемы управления.

### Основания для проектирования

Химический состав воды, циркулирующий в барабанных котлах, оказывает существенное влияние на длительность их безостановочной работы и безремонтной компании. К основным показателям качества котловой воды относят общее солесодержание (концентрация солей в пересчете на соли NaCl мг/кг). Повышение общего солесодержания может привести к уносу солей котловой воды в пароперегреватель и проточную часть турбоагрегата. Поддержание общего солесодержания котловой воды в пределах нормы осуществляют с помощью непрерывной и периодических продувок из барабана в специальные расширители. Потери котловой воды с продувкой восполняют питательной водой в количестве, определяемом уровнем воды в барабане котельного агрегата. Непрерывная продувка служит для удаления избытка соли NaCl и оксидов кремния SiO<sub>2</sub>, скапливающихся в котловой воде в процессе парообразования. Регулирование непрерывной продувки осуществляют воздействием регулятора продувки на регулировочный клапан на линии продувки.

На вход ПИ-регулятора поступают сигналы по расходу пара  $D_{пн}$  и расходу продувочной воды  $D_{пр}$ , а также корректирующий сигнал по солесодержанию солей NaCl. Расход воды непрерывной продувки колеблется в пределах 0,5–2 % максимальной производительности парового котла. В пусковых режимах допускается до 5%.

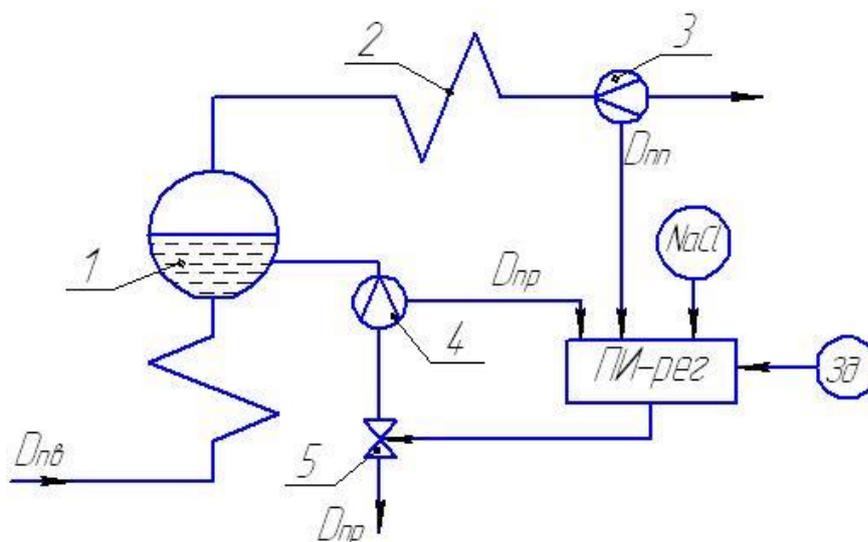


Рисунок 1 – Схема регулирования непрерывной продувки:

1 – барабан к/а, 2 – пароперегреватель, 3 – датчик расхода свежего пара  $D_{пн}$ , 4 – датчик расхода продувочной воды  $D_{пр}$ , 5 – регулирующий орган продувки, ПИ-рег – регулятор продувки, Зд – задатчик ручного управления.

В ходе выполнения проекта были рассмотрены 2 варианта аппаратуры компании «Siemens»: «Simatic S7–1200» и «Simatic S7–300».

Для решения поставленной задачи выбрал следующие элементы: Контроллеры измерительные «Simatic S7–1200» на базе центрального процессора CPU 1211C и модуля ввода–вывода аналоговых сигналов SM 1231; 2 расходомера и блоки питания выбрал на базе аппаратуры «Метран», АЖК-3102 анализатор жидкости кондуктометрический промышленный стационарный. Программируемые контроллеры «Simatic S7–1200» – это новое семейство системных микроконтроллеров для решения самых разных задач автоматизации различного уровня. Эти контроллеры имеют модульную конструкцию и универсальное назначение.

### ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Рассчитаем параметры оптимальной динамической настройки каскадной системы автоматизированного регулирования и провести анализ оптимальных переходных процессов при основных возмущающих воздействиях.

Объект регулирования представлен в виде двух участков:

$$1) \text{ Опережающего } W_{оп}(p) = \frac{k_{оп}}{(T_{оп}p+1) \cdot (\sigma_{оп}p+1)}, \quad (1)$$

$$2) \text{ Инерционного } W_{ин}(p) = \frac{k_{ин} \cdot e^{-\tau_y p}}{(T_k p+1)}, \quad (2)$$

Для регулирования используется:

$$1) \text{ Стабилизирующий ПИ-регулятор: } W_{p1}(p) = \frac{K_{p1}(T_{и1}p+1)}{T_{и1}p}, \quad (3)$$

2)

$$3) \text{ Корректирующий ПИ-регулятор: } W_{p2}(p) = \frac{K_{p2}(T_{и2}p+1)}{T_{и2}p}, \quad (4)$$

Исходные данные приведены в таблице 1.

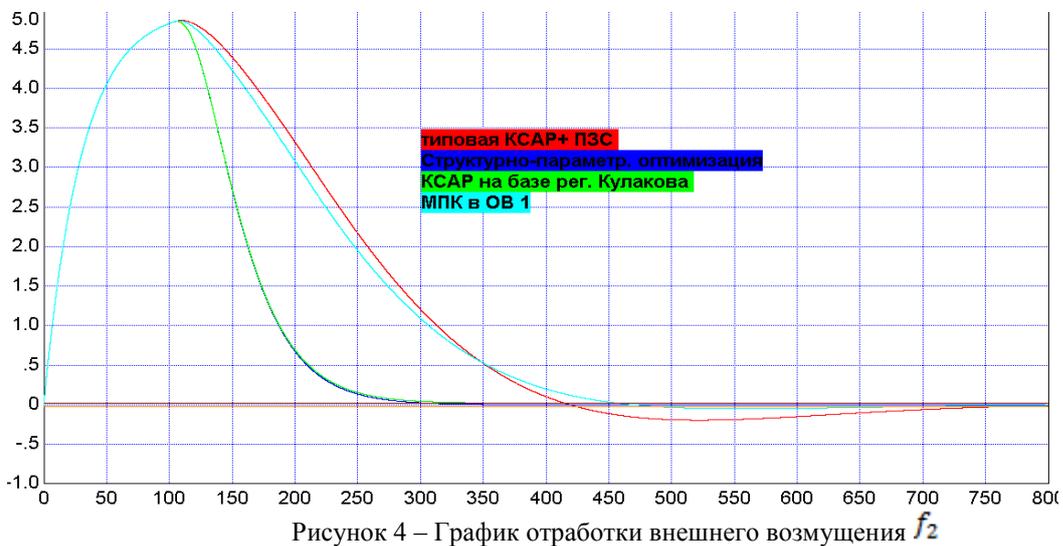
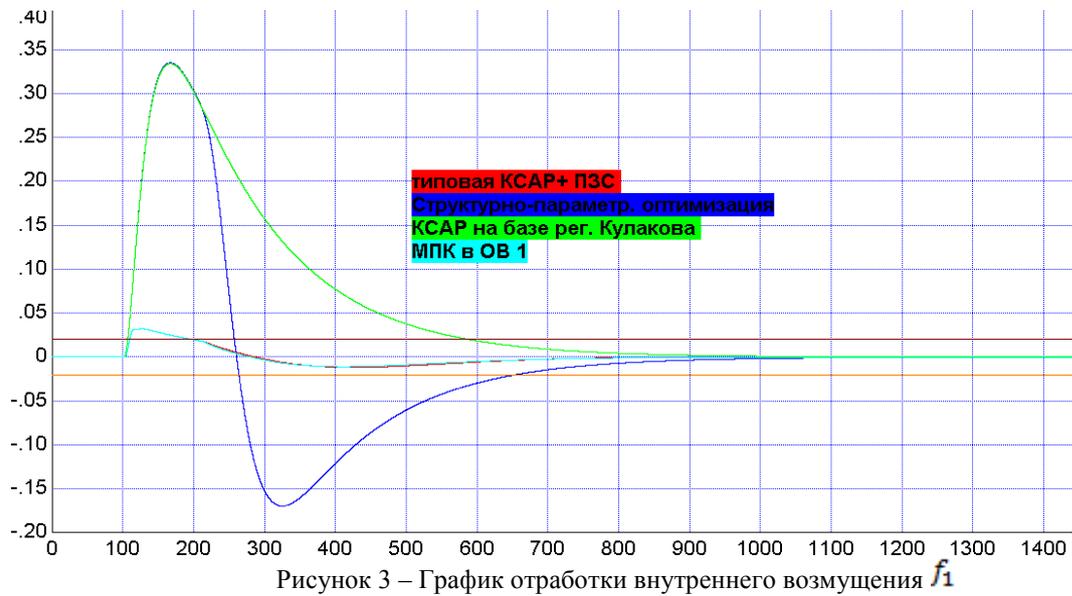
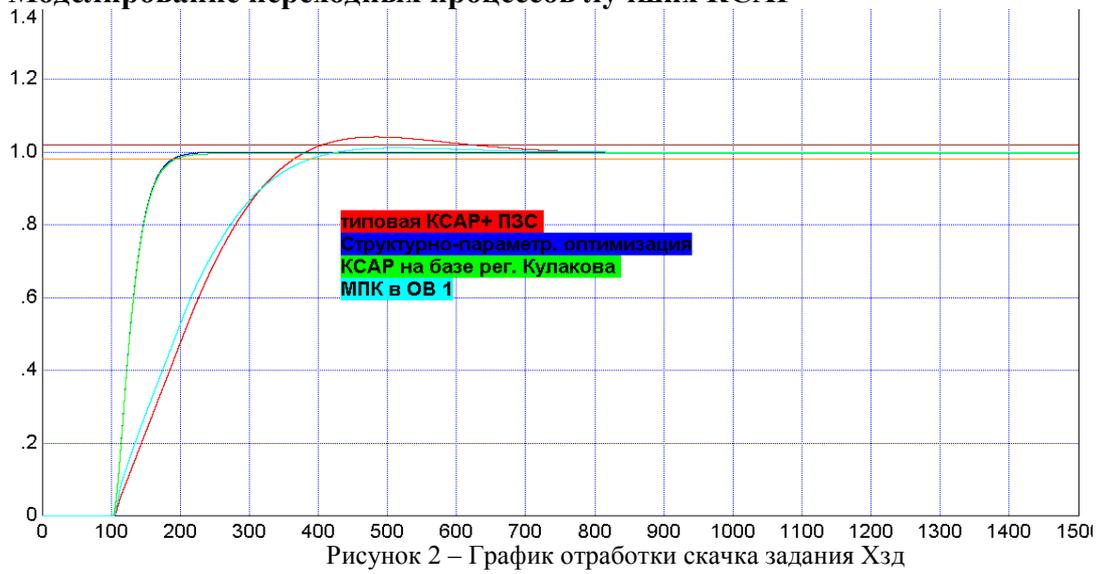
Таблица 1 – Исходные данные для настройки

Параметры системы	Значения
$K_{оп}, \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{т/ч}}$	6,0
$T_{оп}, \text{с}$	23,0
$\sigma_{оп}, \text{с}$	2,3
Кин	1,2
$T_k, \text{с}$	140,0
$\tau_y, \text{с}$	102
Внешнее возмущение	$W_{в}(p) = \frac{5}{30p+1}$

Для выбора оптимальных параметров настройки регуляторов в проекте было проведено сравнение следующих методов: метод БНТУ, метод БНТУ с учетом феномена Золотого сечения, структурно-параметрическая оптимизация КСАР на базе передаточной функции оптимального регулятора, реализация каскадной САР на базе регулятора Кулакова, несколько зарубежных методов, МПК в ОВ-1(с заменой корректирующего ПИ-регулятора на ПИД). В каждом пункте кроме стандартной методики расчёта методов, были предложены также и их модернизации, направленные на улучшения качества регулирования по

сравнению с базовым методом. В итоге было выбрано 4 лучших метода, их сравнительный анализ приводится ниже.

### Моделирование переходных процессов лучших КСАР



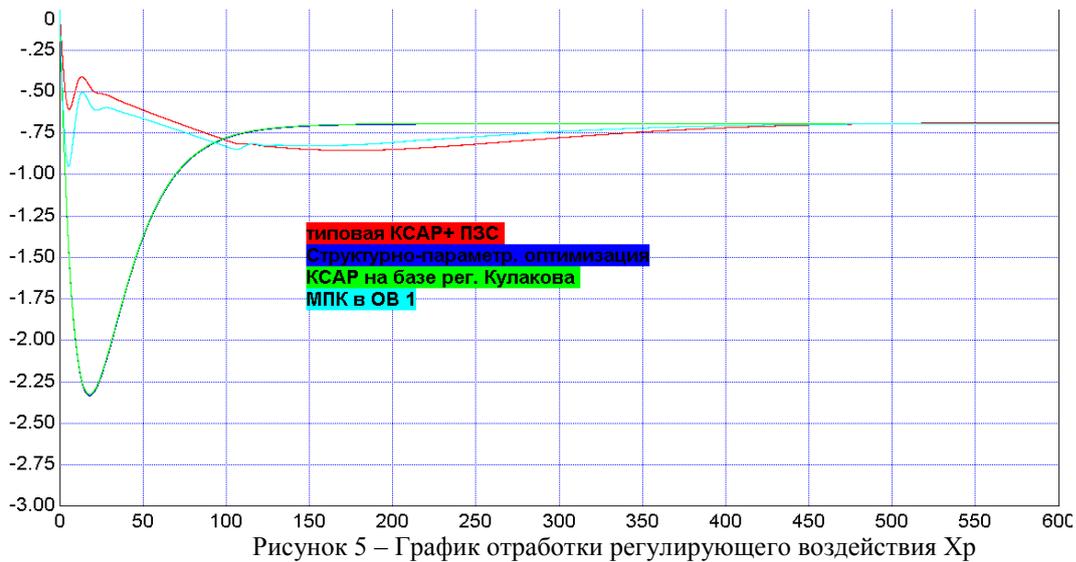


Таблица 2 – ППК регулирования лучших КСАР

	Типовая КСАР (+ПЗС)	Структ.-парам. оптимиз.	МПК в ОВ 1	КСАР на базе регул. Кулакова
Показатели качества при отработке скачка задания, $x_{зд}$				
$t_p, c$	616,07	188,69	391,07	190,71
$A_{1+}^{max}$	1,04	–	–	–
Показатели качества при отработке крайнего внешнего возмущения, $f_2$				
$t_p, c$	752,11	330,84	454,18	334,75
$A_{1+}^{max}$	4,84	4,84	4,84	4,84
Максимальное регулирующее воздействие, $x_p^M$				
$A_{1-}^{max}$	-0,61	-2,3	-0,94	-2,3
Показатели качества при отработке крайнего внутреннего возмущения, $f_1$				
$t_p, c$	202,29	642,8	202,29	600,0
$A_{1+}^{max}$	0,031	0,33	0,031	0,33

Из анализа таблицы 2 можно сделать следующие выводы:

- 1) При отработке Хзд СПО и КСАР на базе Кулакова показали лучшие результаты. С помощью этих методов мы уменьшили время полного регулирования в 3,1 раза.
- 2) При отработке внутреннего возмущения  $f_1$  метод МПК в ОВ-1, а также типовая КСАР имеют лучшие ППК благодаря использованию ПЗС.
- 3) При отработке крайнего внешнего возмущения СПО и КСАР на базе Кулакова имеют лучшее время полного регулирования (в 2,3 раза меньше, чем у типовой КСАР).

#### Литература

7. Плетнев, П.Г. Автоматизированное технологических процессов и производств в теплоэнергетике. Учебное пособие для вузов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007.
8. Паспорт микропроцессорного регулятора «Simatic S7-1200».
9. Кулаков, Г.Т. Инженерные экспресс-методы расчета промышленных систем регулирования. – Мн.: «Вышэйшая школа», 1984. – 192 с.
10. Кулаков, Г.Т. Анализ и синтез систем автоматического регулирования. – Мн.: УП «Технопринт», 2003. – 134 с.

## СПЕЦВОДООЧИСТКА

Черник А.И.

Научный руководитель – д.т.н., профессор Карницкий Н.Б.

Все жидкие радиоактивные отходы АЭС разбиты на четыре группы:

- группа I – бессолевые воды организованных протечек, воды взрыхления ионитовых фильтров;
- группа II – трапные воды;
- группа III – солевые отходы, в которые входят воды регенерации, регенерационные растворы, воды лабораторий;
- группа IV – прочие отходы.

Разделение ЖРО в соответствии с указанными группами необходимо для того, чтобы сократить масштабы энергоемкого выпаривания, заменив его ионным обменом или обратным осмосом, предотвратить загрязнение всех видов ЖРО пенообразующими веществами и отравление сорбентов при ионировании.

При этом их делят на две группы: группа I – смешанные ЖРО (трапные воды, регенерационные растворы, дезактивационные растворы); группа II – малосолевые отходы, содержащие детергенты, и воды спецпрачечных и душевых.

Назначение систем обращения с ЖРО заключается в локализации, переработке и отверждении последних для последующего их длительного хранения (захоронения).

При эксплуатации энергоблока с реактором ВВЭР для переработки ЖРО предусмотрена система, включающая в себя семь видов специальной водоочистки (СВО). Часть системы СВО относится к установкам реакторного отделения (СВО-1 и СВО-2), а часть - к установкам спецкорпуса (СВО-3, СВО-4, СВО-5, СВО-6 и СВО-7).

### СВО-1

Система байпасной очистки теплоносителя первого контура СВО-1 предназначена для очистки теплоносителя от дисперсных продуктов коррозии конструкционных материалов и является системой нормальной эксплуатации. К основному оборудованию системы СВО-1 предъявляются требования по 1-й категории сейсмостойкости. Система работает при температуре и давлении первого контура. Фильтры включаются в работу вместе с главными циркуляционными насосами и работают непрерывно. Отключение фильтров проводится только при остановке главного циркуляционного насоса. Основное оборудование и арматура системы СВО-1 расположены в герметичной оболочке энергоблока. Они рассчитаны на аварийные параметры, возникающие в герметичной оболочке при авариях с разуплотнением трубопроводов первого контура, и должны сохранять при этом свою работоспособность. При нарушениях нормальной эксплуатации и авариях система СВО-1 отключается.

В состав системы входят: четыре механических высокотемпературных фильтра, загруженных высокотемпературным сорбентом, четыре фильтра-ловушки и фильтр-контейнер.

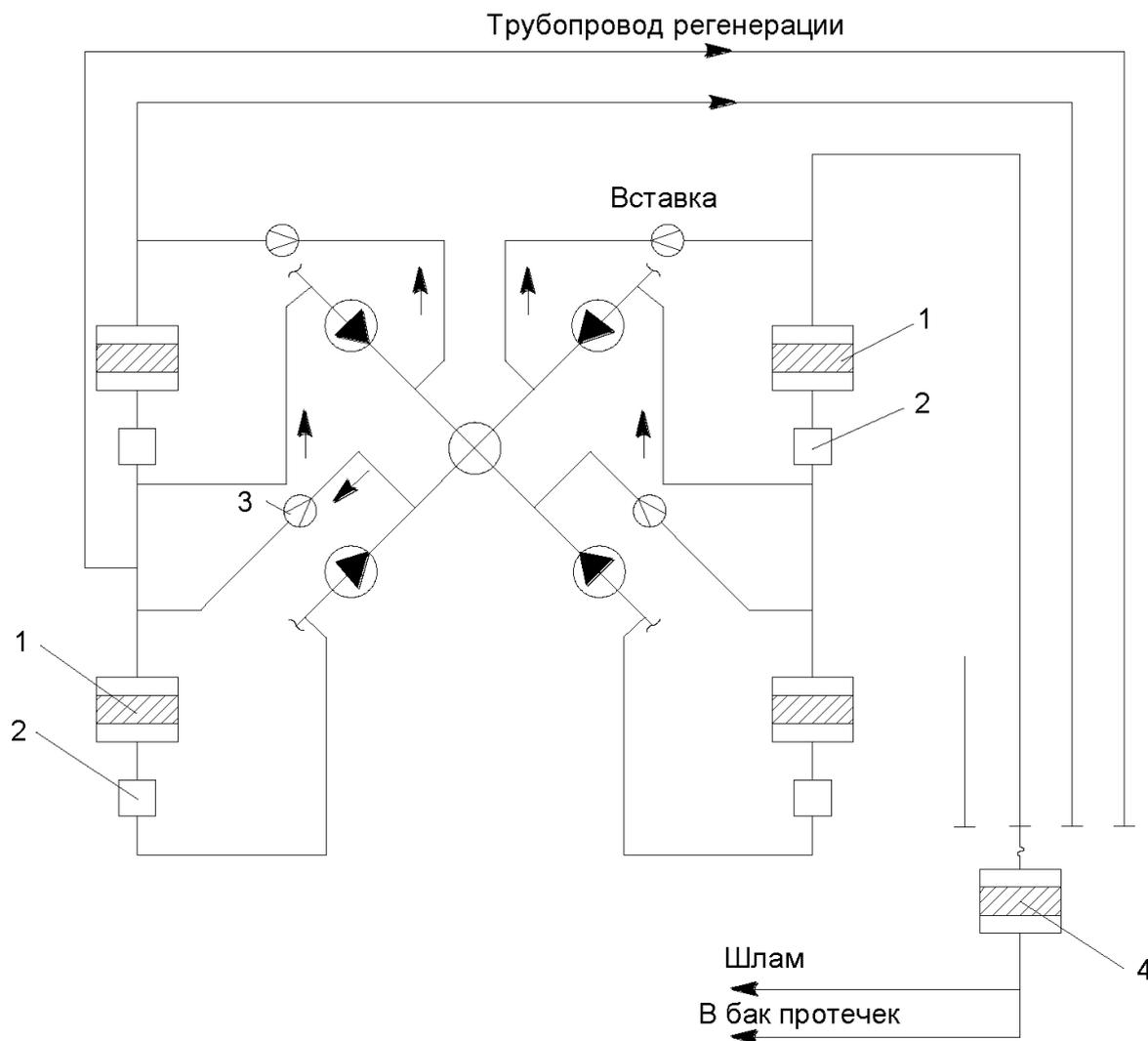


Рисунок 1 – Система СВО-1

1 – механические фильтры; 2 – фильтры-ловушки;  
3 – ограничитель течи (дрозсель); 4 – фильтр-контейнер.

Система СВО-1 состоит из двух подсистем: подсистемы основного потока (ее назначение – очистка теплоносителя) и подсистемы вспомогательных трубопроводов и фильтра-контейнера (для возможности выполнять регенерацию и дезактивацию механических высокотемпературных фильтров).

#### СВО-2

Система СВО-2 предназначена для очистки теплоносителя в ходе всех операций, связанных с изменением концентрации борной кислоты в первом контуре, для снижения активности или концентрации хлоридов в теплоносителе при разогреве первого контура во время пуска, а также для очистки организованных протечек контура в период нормальной эксплуатации.

Протечки от насоса организованных протечек и продувочная вода от петель главного циркуляционного контура поступают на две нитки фильтров, включающих в себя Н-катионитные, К-, Li-, Na-катионитные,  $\text{VO}_3$ -катионитные фильтры и ловушки зернистых материалов. Очищенная от примесей в ионной форме вода через ловушку зернистых материалов направляется в деаэратор подпитки.

Система СВО-2 размещается в реакторном отделении. Арматура, установленная на трубопроводах системы, располагается в смежном боксе, дистанционные приводы арматуры выводятся в помещение их обслуживания. Установка СВО-2 имеет системы

технологического и радиационного контроля, автоматического регулирования, дистанционного управления и технологической сигнализации.

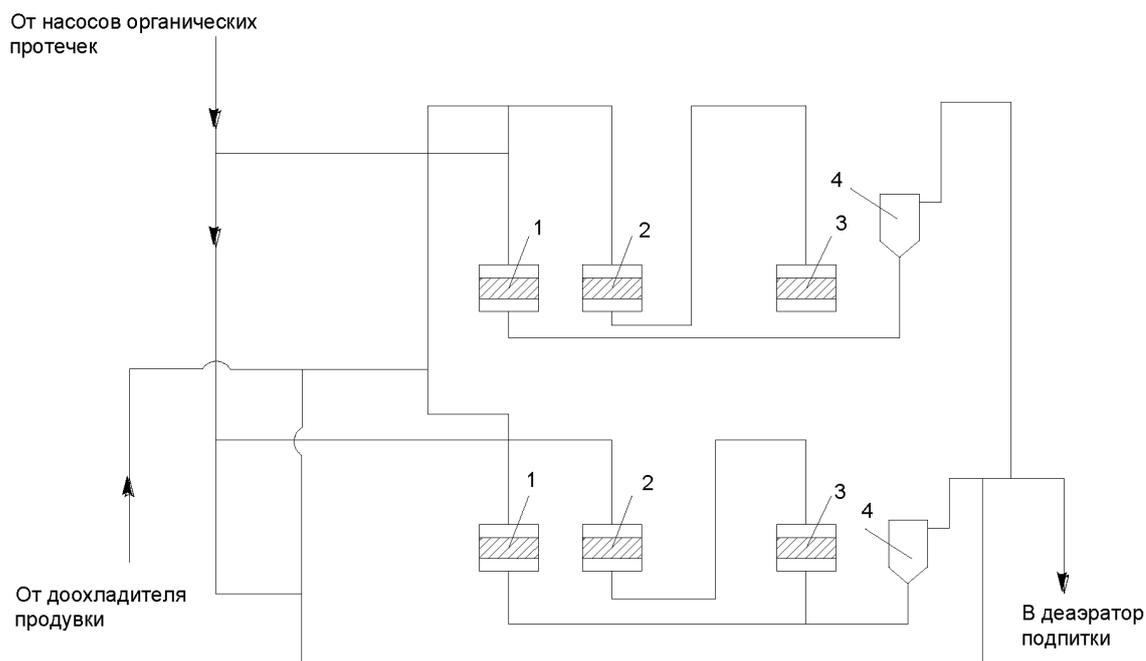


Рисунок 2 – Система СВО-2;

1 – H-катионитные фильтры; 2 – K, 3-Li, Na-катионитные фильтры;  
3 – VO<sub>3</sub>-катионитные фильтры; 4 – фильтры-ловушки.

### СВО-3

Система СВО-3 предназначена для очистки трапных вод: неорганизованных протечек объектов реакторного отделения и технического водоснабжения; вод дезактивации; регенерационных вод (после регенерации и взрыхления ионообменных фильтров всех видов спецводоочистки); возвратных вод узла хранения жидких радиоактивных отходов; вод с повышенным уровнем активности из контрольных баков установок СВО-4, СВО-5, СВО-6, СВО-7.

Система СВО-3 имеет связь со следующими системами: очистки воды топливного бассейна; промконтра охлаждения потребителей; отверждения ЖРО; промежуточного хранения отработанных сорбентов; воды собственных нужд; сбора неорганизованных протечек гермообъема; сбора дренажей; пара собственных нужд; газовых сдувок; сбора и возврата конденсата; очистки продувочной воды парогенераторов; сжатого воздуха; приготовления химических реагентов.

В установке СВО-3 используются методы выпаривания, дегазации, механической фильтрации и ионного обмена.

### СВО-4

Система СВО-4 предназначена для очистки вод бассейна выдержки отработавшего ядерного топлива и вод баков аварийного запаса раствора борной кислоты.

Необходимость очистки воды бассейнов выдержки отработавшего топлива обусловлена требованием обеспечения необходимого водно-химического режима в бассейнах, в том числе требованием достаточной прозрачности воды для выполнения транспортно-технологических операций с тепловыделяющими сборками.

Установка работает периодически.

Очистка воды осуществляется фильтрованием в механическом, Н-катионитном и анионитном фильтрах. Очищенная вода поступает в бассейны выдержки или в баки слива вод бассейна перегрузки, откуда насосами подается на заполнение бассейнов перегрузки.

Система СВО-4 обеспечивает замкнутый цикл водооборота с поддержанием требуемого водно-химического режима в бассейне выдержки, емкостях аварийного запаса борной кислоты, баке слива теплоносителя первого контура.

#### **Литература**

1. Копылов, А.С. «Спецводоочистка на атомных электростанциях»/ Копылов, А.С. – Москва, 1988. – 208 с.
2. Чиж В.А., Карницкий Н.Б., Нерезько А.В. «Водоподготовка и водно-химические режимы ТЭС и АЭС», 2010. – 351 с.