

УДК 621.039.524.441

ВОДООХЛАЖДАЕМЫЙ РЕАКТОР СО СВЕРХКРИТИЧЕСКИМ ДАВЛЕНИЕМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ: ОСОБЕННОСТИ РЕГУЛИРОВАНИЯ, РАЗОГРЕВА И РАСХОЛАЖИВАНИЯ

© 2013 г. А.Л. Сироткина, И.И. Лощаков

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
(ФГБОУ ВПО «СПбГПУ»), Санкт-Петербург

Поступила в редакцию 15.02.2013 г.

В работе рассматривается проблема регулирования водоохлаждаемого реактора со сверхкритическими параметрами теплоносителя. Оценивается влияние спектрального регулирования, строятся статические характеристики, предлагается вариант разогрева и расхолаживания реактора с ограниченным использованием борной кислоты.

Ключевые слова: водоохлаждаемый реактор, сверхкритическое давление, спектральное регулирование, статические характеристики.

Водо-водяные реакторы под давлением (реакторы типа ВВЭР) на сегодняшний день являются одними из наиболее распространенных. Имеется бесценный опыт эксплуатации, выявлены сильные и слабые стороны технических, конструктивных и технологических решений [1].

Основные недостатки ВВЭР – относительно низкая температура теплоносителя на выходе из активной зоны (320 °С), следовательно, невысокая эффективность энергоблока; высокий запас реактивности в начале кампании (около 20%) – множество поглотителей для компенсации.

Оба недостатка могут быть преодолены путем перехода к сверхкритическим параметрам теплоносителя. Повышение давления до 23,5 – 25,0 МПа и температуры теплоносителя до 380–540 °С позволит:

- резко повысить к.п.д. энергоблока. В расчетах, проведенных нами для двухконтурной установки, получен к.п.д. 40–41%, что хорошо согласуется с результатами исследования [2]. В одноконтурной установке средний к.п.д. составит $44\pm 1\%$, в канадских проектах (за счет повышения температуры теплоносителя до 625 °С) – 48% [3];

- избежать критического теплового потока, который может привести к пережогу твэлов [4];

- благодаря большому приросту энтальпии теплоносителя при прохождении через активную зону при сравнимой мощности иметь гораздо меньший расход – уменьшить потребляемую мощность ГЦН приблизительно в 3 раза;

- из-за резкого изменения плотности теплоносителя в окрестности точки "псевдофазового" перехода осуществлять регулирование реактора изменением спектра нейтронов.

К реакторным установкам (РУ) поколения IV будут предъявляться повышенные требования по маневренности. В связи с этим применительно к водоохлаждаемому реактору со сверхкритическим давлением теплоносителя (ВВЭР-СКД) должны быть рассмотрены следующие задачи:

- оценка возможностей применения спектрального регулирования: дополнительный запас реактивности, ухудшение теплоотдачи;

- построение статических характеристик;
- разработка возможных вариантов работы реактора в течение кампании с учетом изменения параметров при использовании спектрального регулирования;
- предложение возможных вариантов проведения разогрева и расхолаживания с ограниченным использованием борной кислоты.

В работе [5] нами показано, что современными промышленными средствами принципиально может быть изготовлено оборудования для реакторной установки со следующими параметрами (табл.1):

Таблица 1. Характеристики исследуемого реактора

Параметр	Значение
Тип реактора	Водо-водяной под давлением
Спектр	Тепловой
Тепловая мощность, МВт	1280
Рабочее давление, МПа	23,5
Температура на входе, начало/конец кампании, °С	365/345
Температура на выходе, начало/конец кампании, °С	381/379
Тип топлива	Диоксид урана UO ₂
Обогащение по ²³⁵ U, %	3,0
Геометрические характеристики корпуса реактора	
Максимальный внутренний диаметр, мм	2800
Толщина днища, мм	225,0
Толщина гладкой обечайки полукорпуса нижнего, мм	197,5
Толщина обечаек зоны патрубков, мм	285,0
Толщина фланца корпуса, мм	465,0
Диаметр патрубков подвода/отвода теплоносителя, мм	400,0

Данное исследование производится для установки с параметрами, приведенными в таблице 1. Рассматриваемая РУ – двухконтурная, с петлевой компоновкой. Это предполагает наличие выделенных парогенераторов. Их параметры были выбраны следующими (табл. 2):

Таблица 2. Основные характеристики парогенератора

Параметр	Значение
Тип парогенератора	Прямоточный
Параметры пара (давление, МПа / температура, °С)	15,0 / 360
Материал трубок ПГ	0X18H10T
Материал корпуса ПГ	10ГН2МФА
Параметры трубки ПГ (диаметр / толщина стенки, мм)	12x2
Число трубок ПГ	3928
Диаметр корпуса ПГ (внутренний), мм	952
Толщина стенки корпуса ПГ, мм	60
Толщина днища (крышки) корпуса ПГ, мм	120
Толщина трубной доски, мм	220

В работе [6] было показано, что при обогащении топлива по ²³⁵U $x = 3\%$

начальный запас реактивности составляет 11,0%. Для оценки дополнительной реактивности, которая выделится при постепенном увеличении перепада температур с 365/381 °С до 345/379 °С, использовалось двухгрупповое приближение диффузионно-возрастной теории, как наиболее простое, но в то же время позволяющее получить приемлемую точность оценки. В качестве допущения было принято, что микроскопические сечения взаимодействия практически неизменны при изменении перепада температур в указанных пределах. Было получено, что при использовании спектрального регулирования в течение кампании дополнительно к начальному запасу (11%) выделяется дополнительная реактивность (8,5%), и общий запас реактивности на кампанию составит 19,5%, что сравнимо с запасом реактивности у ВВЭР-1000.

В данном исследовании для расчетов изменения коэффициента теплоотдачи был использован подход, предложенный Б.Д. Дядякиным и А.С. Поповым [7]. Было получено, что при изменении перепада температур с 365/381 °С до 345/379 °С коэффициент теплоотдачи уменьшится не более, чем на 15%.

В качестве программы регулирования для реакторной установки с параметрами, приведенными в таблице 1 и таблице 2, была выбрана программа с постоянной средней температурой и переменным расходом теплоносителя. Средняя температура теплоносителя принята постоянной из-за относительно большого плотностного эффекта реактивности; преимущества использования переменного расхода теплоносителя в водо-водяных реакторах обоснованы в работе [8].

Переменность расхода теплоносителя позволяет кроме средней температуры зафиксировать еще один параметр. В качестве этого параметра была выбрана температура теплоносителя на входе в реактор; следовательно, температура на выходе из реактора также будет оставаться постоянной при любом уровне мощности. Изменение расхода будет пропорционально изменению мощности; изменение давления пара второго контура вычислялось исходя из уравнений теплопередачи, уравнений для изменения недогревов и проч. Был получен следующий вид статических характеристик (рис. 1):

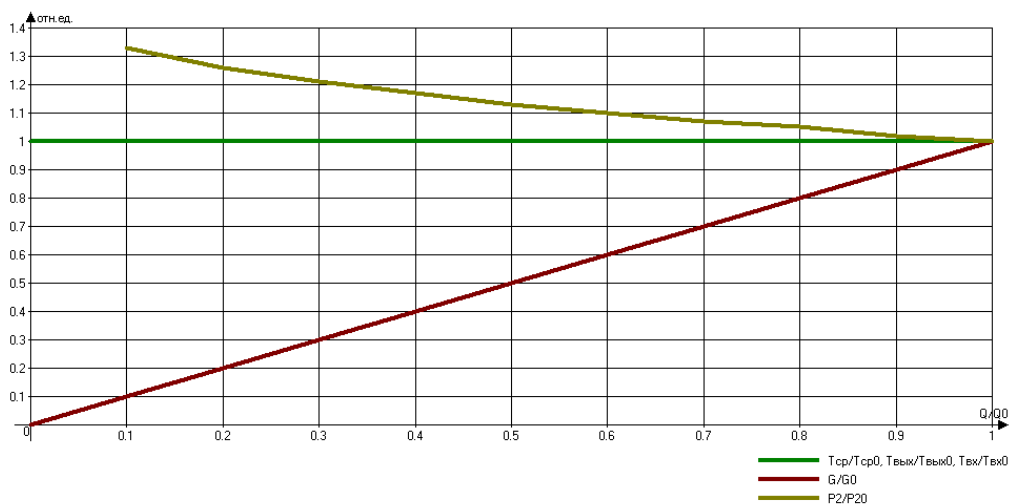


Рис. 1. Статические характеристики РУ
(программа с постоянной средней температурой теплоносителя)

На рисунке 1 приняты следующие обозначения: $T_{ср}$ – средняя температура теплоносителя; $T_{вх}$, $T_{вых}$ – температура теплоносителя на входе и выходе из реактора соответственно; G – расход теплоносителя; P_2 – давление свежего пара второго контура; Q – тепловая мощность установки. Индекс "0" относится к параметрам на номинальном режиме работы.

Принятые конструктивные характеристики парогенераторов (табл.2) позволяют снижать мощность только до уровня 0,6 от номинальной (обусловлено возрастанием давления свежего пара второго контура).

Спектральное регулирование в данной установке предлагается для компенсации медленно протекающих процессов, например, выгорания топлива. Исходя из размера дополнительной реактивности (8,5%), имеющейся за счет увеличения перепада температур, можно предположить три принципиальных варианта изменения параметров в течение кампании:

- увеличение перепада температур с 365/381 °С до 345/379 °С в первой половине кампании, дальше – работа с постоянными параметрами за счет начального запаса реактивности (11,0%);
- увеличение перепада температур с 365/381 °С до 345/379 °С в конце кампании, до этого – работа с постоянными параметрами за счет начального запаса реактивности (11,0%);
- постепенное увеличение перепада температур в течение кампании.

Оптимальным представляется третий вариант работы реактора в течение кампании. Для него построено семейство статических характеристик; наиболее наглядный пример из которых (изменение расхода теплоносителя) приведен на рисунке 2:

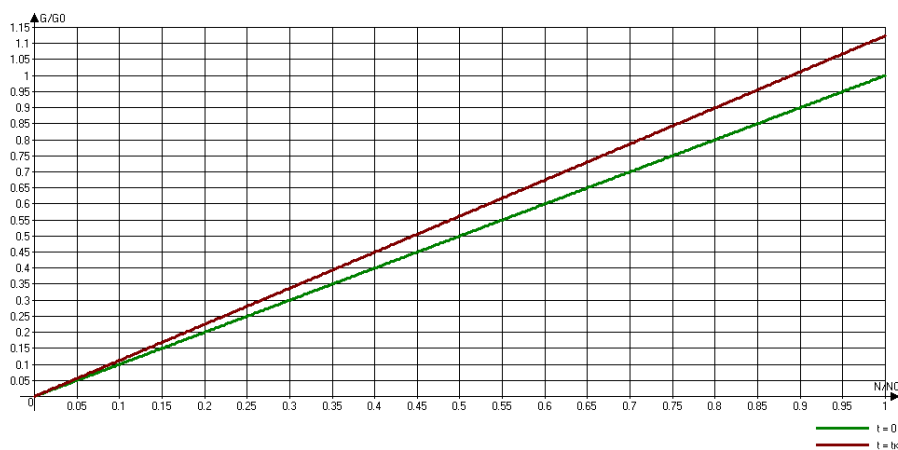


Рис. 2. Изменение расхода теплоносителя с изменением мощности в течение кампании

На рисунке 2 приняты следующие обозначения: G – расход теплоносителя; N – мощность реакторной установки; t – время; t_k – длительность кампании реактора. Индекс "0" относится к параметрам на номинальном режиме работы.

Оценка циклической прочности корпуса реактора показала, что скорости разогрева и расхолаживания должны быть более 20 К/ч и 30 К/ч соответственно. Отдельного внимания заслуживает использование борного регулирования. При переходе через точку «псевдофазового» перехода резко изменяется растворимость борной кислоты в воде; поэтому использование ее в реакторах ВВЭР-СКД во время работы исключено. Однако в связи с большим плотностным эффектом реактивности при расхолаживании реактора (особенно ближе к началу кампании) необходимо использование дополнительного средства компенсации реактивности, в качестве которого и может выступить борная кислота.

Нами предлагается постепенный ввод борной кислоты в процессе расхолаживания соответственно выделяющейся реактивности, но не раньше, чем при достижении теплоносителем температуры 300–320 °С.

Суммируя сказанное в статье, можно заключить:

- за счет использования спектрального регулирования в рассматриваемой

установке возможно получить запас реактивности, сравнимый с имеющимся в ВВЭР-1000, при меньшем обогащении и меньшей загрузке топлива;

– при использовании программы регулирования с постоянной средней температурой и переменным расходом теплоносителя отсутствуют дополнительные термические напряжения в конструктивных узлах реактора, однако, возрастание давления свежего пара второго контура ограничивает снижение мощности уровнем 0,6 от номинальной;

– для обеспечения циклической прочности конструктивных элементов реактора необходим разогрев и расхолаживание со скоростью, большей 20 К/ч и 30 К/ч соответственно. Борная кислота может использоваться как дополнительный орган компенсации реактивности, выделяющейся в ходе расхолаживания, однако, не ранее, чем по достижении теплоносителем температуры 300-320 °С.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Семченков, Ю.М. Перспективы развития АЭС с ВВЭР [Текст] / Ю.М. Семченков, В.А. Сидоренко // Теплоэнергетика. – 2011. - №5. – С. 2 – 9.
2. Силин, В.А. и др. Тепловая схема энергоблока АЭС с реактором, охлаждаемым водой сверхкритического давления [Текст] / В.А. Силин, В.М. Зорин, А.М. Тагиров и др. // Теплоэнергетика. – 2010. – №12.
3. Абдулкадыров, В.М. и др. Термодинамические циклы АЭС, работающих на сверхкритических параметрах воды [Текст] / В.М. Абдулкадыров, Г.П. Богословская, В.А. Грабежная // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2012. – №4. – С. 85–91.
4. Грабежная, В.А. и др. Теплообмен в трубах и пучках стержней при течении воды сверхкритического давления [Текст] / В.А. Грабежная, П.Л. Кириллов // Атомная энергия. – 2004. – 96(5).
5. Сироткина, А.Л. и др. Исследование технологичности основного оборудования реакторной установки со сверхкритическими параметрами теплоносителя [Текст] / А.Л. Сироткина, И.И. Лошаков // ХLI Неделя науки СПбГПУ: материалы научно-практической конференции с международным участием. Ч. III. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – С. 112–113.
6. Сироткина, А.Л. и др. Разработка реакторной установки ВВЭР-СКД со спектральным регулированием и петлевой компоновкой [Текст] / А.Л. Сироткина, И.И. Лошаков // Итоговая конференция конкурса научных работ студентов ОАО «Концерн Росэнергоатом» «Знания молодых ядерщиков – атомным станциям». – М. : НИЯУ МИФИ, 2012. – С. 39–40.
7. Кириллов, П.Л. и др. Справочник по теплогидравлическим расчетам. Том 1. Теплогидравлические процессы в ЯЭУ [Текст] / П.Л. Кириллов, В.П. Бобков, А.В. Жуков, Ю.С. Юрьев– М. : ИздАт, 2010. – 776с.
8. Башарат, Али и др. Регулирование энергоблоков АЭС с ВВЭР при изменении производительности ГЦН [Текст] / Али Башарат, И.И. Лошаков // Известия ВУЗов. Ядерная энергетика. – 2002. – №1. – С. 53–60.

Water-cooled reactor with supercritical pressure of heat-transfer: control, heating and cooldown peculiarities

A.L. Sirotkina, I.I. Loschakov

*St. Petersburg State Polytechnic University, 29 Politekhnikeskaya St., St. Petersburg, Russia 195251
e-mail: sashulena991@inbox.ru*

Abstract – In this article the problem of control under water-cooled reactor with supercritical heat-transfer parameters is handled. The influence of spectral control is evaluated, static characteristics are made, the variant of heating and cooldown of reactor with limited using of boric acid is suggested.

Keywords: water-cooled reactor, supercritical pressure, spectral control, static characteristics.