***А.Л. Сироткина, студ.; рук. И.И. Лощаков, д.ф.-м.н., проф. (СПбГПУ, Санкт-Петербург)***

**работа водоохлаждаемого реактора на сверхкритических параметрах теплоносителя с переменной мощностью**

"Энергетической стратегией России на период до 2030 года", утвержденной Правительством РФ от 13.11.2009 [1], обозначены следующие задачи, являющиеся приоритетными для отрасли:

- повышение эффективности использования ресурсов на протяжении всего топливного цикла (от добычи и переработки до регенерации и утилизации);

- масштабное техническое и технологическое обновление сектора;

- повышение эффективности энергетики, как экологическое (снижение вредных выбросов), так и экономическое (повышение эффективности преобразования энергии первичных источников - топлива - в электро- и тепловую энергию).

Сооружение установок поколения IV, к которым относятся водоохлаждаемые реакторы со сверхкритическими параметрами теплоносителя (ВВЭР-СКД), позволит приблизиться к решению этих задач.

Возрастающая неравномерность потребления электроэнергии (особенно в Европейской части России при расположении мощных ГЭС преимущественно на крупных реках за Уралом), значительный износ основных генерирующих мощностей тепловой энергетики на органическом топливе - по этим причинам все чаще поднимается вопрос об участии АЭС в покрытии переменной части графика нагрузок (например, см. [2]). К моменту сооружения энергоблоков поколения IV эти требования станут, очевидно, более жесткими.

В связи с вышесказанным возникает задача обоснования возможности использования ВВЭР-СКД на переменных режимах мощности с обеспечением наибольшей надежности установки. Эта задача обширна, и в данном исследовании нами рассматривается ее часть, касающаяся работы реактора на переменных режимах мощности.

В качестве объекта исследования нами была выбрана установка со следующими параметрами (табл.1):

**Таблица 1 - Основные параметры исследуемой установки**

|  |  |
| --- | --- |
| Характеристика | Значение |
| Тип реактора | Водо-водяной под давлением |
| Спектр | Тепловой |
| Мощность (тепл./эл.), МВт | 1280 / 525 |
| Давление (рабочее), МПа | 23.5 |
| Температура на входе в реактор (начало/конец кампании), °С | 365 / 345 |
| Температура на выходе из реактора (начало/конец кампании), °С | 381 / 379 |
| Тип установки | Двухконтурная |
| Тип ПГ | 4 шт., прямоточные |
| Параметры "свежего" пара 2 контура | 15 МПа, 360 °С |

Причины выбора установки с параметрами, приведенными в табл.1, следующие:

- тепловой спектр не предусматривает использование реактора в качестве бридера (наработчика вторичного ядерного горючего), для которого наиболее эффективна работа на постоянной (максимальной) мощности;

- средняя мощность выбрана исходя из обеспечения технологичности основного оборудования реакторной установки (т.е. возможности изготовления на современной российской промышленной базе) [3];

- турбоустановка на докритических параметрах пара (с небольшим перегревом относительно температуры насыщения) является более пригодной для использования в переменных режимах, чем установка на сверхкритических параметрах либо на влажном паре.

Активная зона объемом 12.8 м3 набрана из 85 ТВС (топливо - UO2) с различным по радиусу обогащением: 30 ТВС на периферийной зоне - 4.4%, средняя зона (38 ТВС) - 3.0%, центральная зона (17 ТВС) - 2.0%. Каждая ТВС содержит 234 твэла.

Для обеспечения эффективного замедления по всей высоте активной зоны в конструкцию ТВС включены т.н. "водяные элементы" - полые трубки шестигранного и круглого сечения, заполненные теплоносителем. На их долю приходится до 80% замедления.

В ходе предварительного этапа исследования были проведены физические расчеты реактора, выбрана программа регулирования. Нейтронно-физический расчет проводился в 26-групповом приближении диффузионно-возрастной теории с учетом результатов теплогидравлического расчета (изменения плотности теплоносителя по высоте активной зоны). Методика была предварительно проверена расчетом реактора ВВЭР-1000 по известным данным. Основные результаты физического расчета:

- запас реактивности 0.195; температурный коэффициент реактивности 7.73∙10-3 1/К;

- максимальная температура оболочки твэла для максимально нагруженного канала составляет 454 °С. Максимальная температура топливного сердечника - 1150 °С. Коэффициент теплоотдачи в активной зоне, рассчитанный согласно рекомендациям [4], достигает 53 кВт/(м2К), в среднем составляет 30÷33 кВт/(м2К).

Для регулирования реактора предлагается программа с переменным расходом теплоносителя и постоянной средней температурой. Очевидными преимуществами такой программы являются:

- стабильный температурный режим в активной зоне, что позволяет избежать появления дополнительных термических напряжений при изменении мощности;

- относительно невысокий рост давления "свежего" пара второго контура при снижении мощности.

Основным недостатком программы является необходимость включения в цепь АСР дополнительных элементов, отвечающих за регулирование частоты вращения ГЦН.

Второй этап исследования - составление математической модели реакторной установки для получения графиков зависимостей основных параметров при изменении мощности. При составлении математической модели были приняты следующие допущения:

- нейтронная кинетика реактора описана в точечном приближении с учетом одной группы запаздывающих нейтронов;

- из эффектов реактивности учитывается только температурный эффект по теплоносителю как превалирующий;

- отравление - только Хе;

- пренебрегаем инерционностью элементов АСР, запаздыванием сигналов;

- для регуляторов выбран ПИ-закон регулирования.

Математическая модель была реализована в ПК Mathcad 15.

Были исследованы два режима работы:

1) снижение мощности на 10% (ступенчато);

2) снижение мощности на 25% (ступенчато).

Основные результаты:

- отклонение средней температуры теплоносителя при изменении мощности на 10% составляет около 1 °С, на 25% - около 5 °С;

- отклонение давления "свежего" пара второго контура при изменении мощности может достигать 10% от номинального значения, что требует дополнительной проверки циклической прочности парогенераторов и может стать ограничивающим маневренность установки фактором;

- пик отравления реактора при ступенчатом снижении мощности на 10% достигает 0,041 приблизительно через 5 часов, на 25% - 0,043.

Оценка циклической прочности основных элементов показала, что предложенный вариант регулирования позволяет работать по режимам (1) и (2) при сохранении достаточной надежности. Дальнейшие направления исследования включают:

- уточнение математической модели, включая подходы к описанию нейтронной кинетики и теплогидравлики установки;

- оценка возможности использования данной программы для различных проектов ВВЭР-СКД.

**Библиографический список**

1. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года – URL: http://www.minprom.gov.ru/docs/strateg/1

2. Семченков Ю.М. и др. Развитие способов управления ВВЭР-1200/1300 в суточном графике нагрузки / Атомная энергия, 2013. Т. 114 (5). - с. 249-254.

3. Сироткина А.Л., Лощаков И.И. Исследование технологичности основного оборудования реакторной установки со сверхкритическими параметрами теплоносителя // XLI Неделя науки СПбГПУ: материалы научно-практической конференции с международным участием. Ч.III. - СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. - с. 112-113.

4. Справочник по теплогидравлическим расчетам. Том 1. Теплогидравлические процессы в ЯЭУ / П.Л. Кириллов, В.П. Бобков, А.В. Жуков, Ю.С. Юрьев– М.: ИздАт, 2010. – 776 с.