

УДК: 621.039.51

**АНАЛИЗ ПРОЕКТНОЙ АВАРИИ НА РЕАКТОРЕ ИВГ.1М С ВЫБРОСОМ РАБОЧЕГО ОРГАНА СУЗ**

Мартыненко Е.А., Гановичев Д.А., Акаев А.С., Хажидинов А.С., Жагипарова Л.К.

*Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан*

В статье представлен анализ теплового состояния ТВС с топливом низкого обогащения реактора ИВГ.1М при проектных авариях, связанных со сбоями системы управления и защиты. Рассмотрены аварийные ситуации с самопроизвольным разворотом одного регулирующего барабана, а также системы регулирующих барабанов с максимальной эффективностью.

Задача исследований, приведенных в статье, заключалась в проведении нестационарного теплового расчета ТВС реактора с двойным профилированием энерговыделения по высоте сборки и во времени.

В результате расчетных исследований получены диаграммы изменения максимальных значений температуры ТВЭЛов и воды на выходе из водоохлаждаемого технологического канала, при проектных авариях с выбросом рабочего органа системы управления и защиты.

**ВВЕДЕНИЕ**

Реактор ИВГ.1М является исследовательским водо-водяным гетерогенным корпусным ядерным реактором на тепловых нейтронах с легководящими теплоносителем и замедлителем и бериллиевым отражателем нейтронов. Активная зона реактора содержит 30 водоохлаждаемых технологических каналов. В центральной ячейке реактора расположен окруженный бериллиевым вытеснителем петлевой канал, в который возможна установка экспериментального устройства. Система регулирования реактора ИВГ.1М включает 10 вращающихся регулирующих барабанов с поглощающими элементами.

Международным агентством по атомной энергии было принято решение отказаться от использования во всех типах реакторов ядерного топлива, которое может быть использовано для создания ядерного оружия. Было установлено минимальное обогащение топлива, при котором оно считается «безопасным» – менее 20 % по  $U^{235}$ . Топливо реактора ИВГ.1М имеет обогащение 90 %. Следовательно, конверсия активной зоны ИР ИВГ.1М является необходимым процессом.

В связи с проведением работ по конверсии реактора ИВГ.1М на низкообогащенное топливо возникает необходимость проведения анализа безопасности новой конверсионной активной зоны. В результате расчетных исследований рассмотрены проектные аварии на реакторе ИВГ.1М, связанные со сбоями системы управления и защиты, получены диаграммы изменения максимальных значений температуры ТВЭЛов и воды на выходе из водоохлаждаемого технологического канала, при проектных авариях, связанных с выбросом рабочего органа системы управления и защиты (СУЗ) с максимальной эффективностью.

**ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ**

Под выбросом рабочего органа СУЗ, приводящим к нерегламентированному изменению реактивности в реакторе ИВГ.1М, понимаются следующие ситуации:

- самопроизвольный разворот одного регулирующего барабана из критического положения (угол поворота  $80^{\circ}$ - $90^{\circ}$ ) с максимально возможной скоростью 50 шагов/с (для одного барабана);
- самопроизвольный разворот системы регулирующих барабанов с технически максимально возможной скоростью до 500 шагов/с (разворот 10 барабанов).

Для проведения расчета принято следующее начальное состояние реактора перед началом развития аварийной ситуации:

- мощность реактора 10 МВт;
- расход теплоносителя через реактор 62,5 кг/с [1];
- давление в системе (сохраняется в течение всей аварийной ситуации) 1 МПа;
- температура воды на входе в реактор в штатном режиме 323 К (допустимое значение температуры воды) [2];
- расход воды через канал был принят постоянным, равным 2 кг/с (среднее значение по каналам);
- в качестве начального положения системы РБ для исходного события с разворотом одного регулирующего барабана принято 2500 шагов, для аварийной ситуации с разворотом десяти регулирующих барабанов – 2000 шагов. При таких положениях дифференциальная регулировочная характеристика системы РБ имеет максимум.

Аварийная защита реактора сработает при следующих уставках аварийной защиты:

- реактивность реактора превышает 0,4  $\beta_{эфф}$ ;
- мощность реактора превышает заданную мощность на 20 %;
- период реактора станет меньше 10 с.

Характеристики срабатывания аварийной защиты:

- задержка времени срабатывания аварийной защиты – 0,3 с;
- скорость разворота системы РБ –  $120^{\circ}$   $s^{-1}$ .

Самопроизвольный разворот одного барабана из критического положения (угол поворота  $80^{\circ}$ - $90^{\circ}$ ) с

максимально возможной скоростью 50 шагов/с (для одного барабана) приводит к росту положительной реактивности со скоростью 0,19  $\beta\text{эф}/\text{с}$  максимально до значения 0,06  $\beta\text{эф}$  [3].

Сигнал на аварийную защиту поступит через 0,02 с после самопроизвольного разворота барабана вследствие снижения периода реактора до величины менее 10 с. С учетом задержки, аварийная защита сработает через 0,32 с после начала исходного события, и развитие аварии прекратится.

Самопроизвольный разворот 10 регулирующих барабанов с технически максимально возможной скоростью 500 шагов/с приводит к росту положительной реактивности со скоростью 0,19  $\beta\text{эф}/\text{с}$  до значения 0,5  $\beta\text{эф}$ , при этом мощность реактора кратковременно увеличивается практически в 2 раза.

Как и в предыдущем случае, в результате снижения периода реактора менее 10 с аварийная защита сработает через 0,32 с после начала самопроизвольного разворота барабанов, и развитие аварийной ситуации прекратится, мощность снизится.

#### РАСЧЕТ

Теплофизические расчеты проведены при использовании программы ANSYS Fluent. Расчетная модель имеет форму треугольной призмы. В расчетной модели ТВЭЛы представлены в виде цилиндра. Таким образом, расчетная модель имитирует треугольный сектор решетки ТВС высотой 0,8 м. На рисунке 1 приведен участок конечно-элементной сетки расчетной модели.

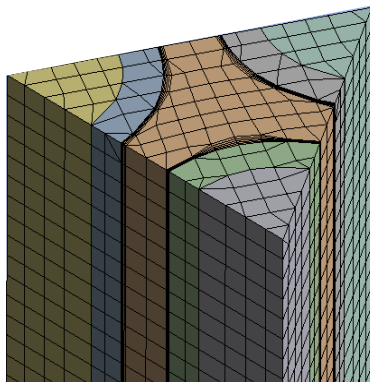


Рисунок 1. Участок конечно-элементной сетки расчетной модели

Расчетная модель была верифицирована по результатам экспериментов, отклонения расчетных и экспериментальных данных составили ~4 %.

Расчет выполнен при следующих принятых допущениях:

- профиль энерговыделения по высоте ТВЭЛов является неизменным;
- теплообмен внутри элементов модели осуществляется за счет теплопроводности;
- на наружной границе элементов модели теплообмен с теплоносителем происходит за счет конвекции.

В расчете задано двойное профилирование энерговыделения по высоте сборки и во времени.

Для определения параметров перед развитием аварии моделируется работа реактора на постоянной мощности до установления стационарного теплового состояния (500 секунд). После этого в расчете учитывается влияние на мощность реактора эффектов реактивности (в зависимости от изменения температуры элементов активной зоны) и положения органов СУЗ. В течение 10 секунд реактор работает на номинальном режиме. Затем на 510 секунде моделируется соответствующее аварийное событие с выбросом органов СУЗ.

Расчет значений температуры воды и ТВЭЛов был проведен для одного канала по полученной расчетным путем диаграмме мощности. Расчет температурного поля в канале выполнен для профиля энерговыделения наиболее напряженного канала 1-го ряда.

Изменение мощности реактора во времени при возникновении аварийных событий, а также распределение энерговыделения по высоте ТВС взято по данным нейтронно-физических расчетов [3, 4].

Теплофизические свойства материалов, используемые при проведении расчета, взяты из справочной литературы [5, 6]

#### АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рисунке 2 представлен график изменения значений максимальной температуры ТВЭЛов и воды на выходе ВОРТК в случае аварийной ситуации, связанной с самопроизвольным разворотом одного регулирующего барабана.

Как видно из графика, максимальное значение температуры внутри ТВЭЛов, через 0,34 секунды, после разворота регулирующих органов в крайнее положение, не превысит 421 К. При этом, максимальное значение температуры воды будет достигнуто через 0,47 секунды с момента начала развития аварийной ситуации и составит 366 К. Кипения воды при развитии рассматриваемой аварийной ситуации не произойдет.

На рисунке 3 представлен график изменения значений максимальной температуры ТВЭЛов и воды во времени в случае аварийной ситуации, связанной с самопроизвольным разворотом системы регулирующих барабанов.

Максимальное значение температуры в центре ТВЭЛов достигнет 440 К через 0,35 секунды после разворота регулирующих органов в крайнее положение. Максимум температуры воды достигнет значения 372 К через 0,51 секунды с момента начала развития аварийной ситуации. Вскипания воды при развитии рассматриваемой аварийной ситуации не произойдет.

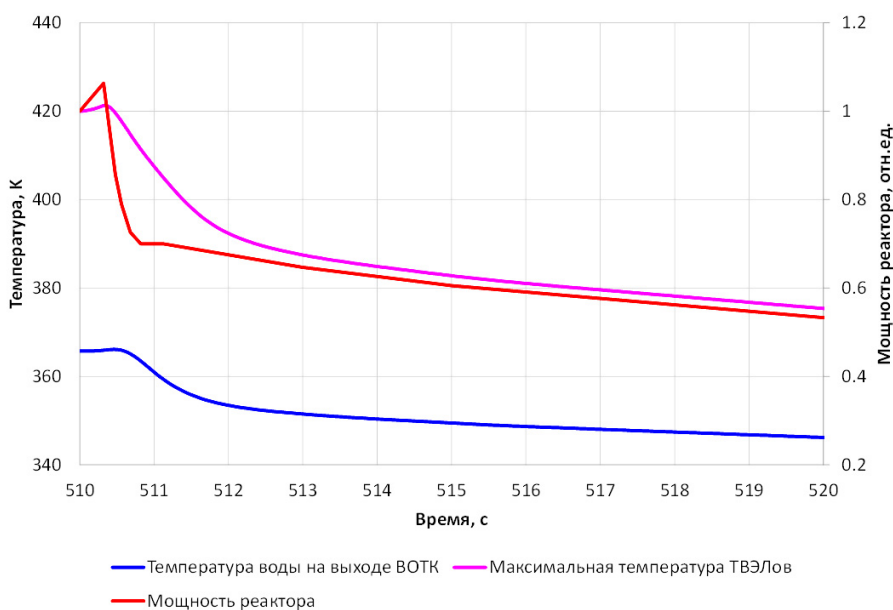


Рисунок 2. Диаграмма изменения максимальных значений температуры ТВЭЛов и воды на выходе ВОТК

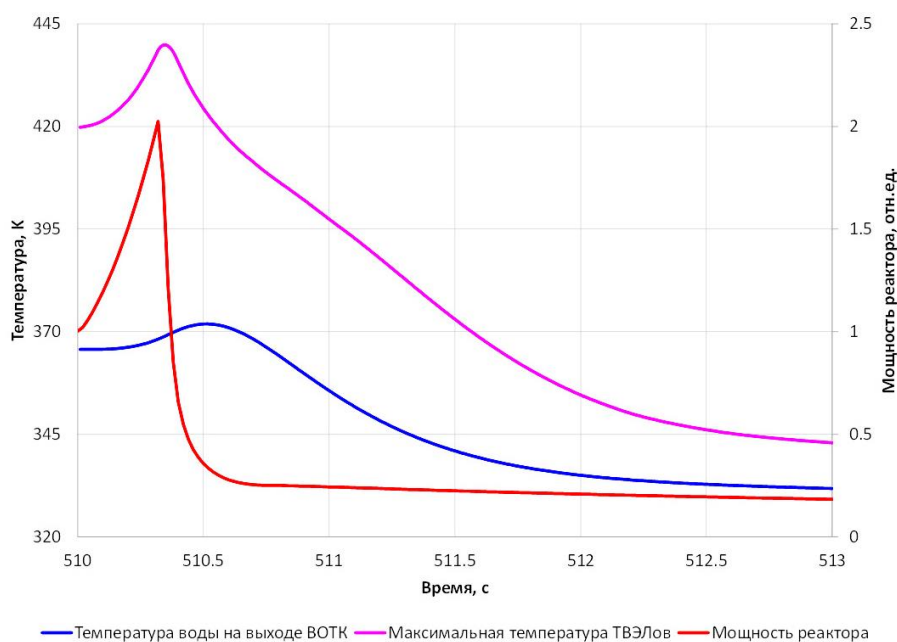


Рисунок 3. Диаграмма изменения максимальных значений температуры ТВЭЛов и воды на выходе ВОТК

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

По результатам проведенных теплофизических исследований получены диаграммы изменения максимальных значений температуры ТВЭЛов и воды на выходе из ВОТК-НОУ при аварийных ситуациях, связанных с самопроизвольным разворотом одного регулирующего барабана и 10 барабанов системы управления и защиты.

Результаты тепловых расчетов показывают, что в ситуациях, связанных с выбросом рабочего органа

СУЗ, значения температуры воды и ТВЭЛов незначительно превысят предельные значения, допустимые при нормальной эксплуатации; кипения воды в трактах не произойдет. В результате срабатывания аварийной защиты аварийные ситуации локализуются без каких-либо последствий для активной зоны реактора. Результаты расчетов будут использованы в отчете по анализу безопасности реактора ИВГ.1М с топливом низкого обогащения.

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1 Руководство по эксплуатации «Водяные системы реактора ИВГ.1М» (АК.65000.01.187) / ДГП ИАЭ РГП НЯЦ РК – Курчатов, 2012. – 30 с.
- 2 Комплекс научно-исследовательских реакторов «БАЙКАЛ-1». Реакторная установка ИВГ.1М: отчет по обоснованию безопасности: АК.65000.00.796Д / ДГП ИАЭ РГП НЯЦ РК. – Курчатов, 2002 г.
- 3 Расчет эффектов реактивности ИВГ.1М с топливом низкого обогащения: техническая справка / ДГП ИАЭ РГП НЯЦ РК А.В. Пахниц, Р.А. Иркимбеков, Л.К. Жагипарова – Курчатов, 2017. – 13 с. № 11-220-02 / 616 вн. от 17.04.2017.
- 4 Расчет энерговыделения реактора ИВГ.1М с ВОТК-НОУ №69вн/11-220-02 от 10.01.2017 г.
- 5 Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. – М., Энергия, 1977, 336 с.
- 6 Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники. – М., Атомиздат, 1968, 474 с.

#### ИВГ.1М РЕАКТОРЫНДА БҚЖ ЖҰМЫС БӨЛІКТЕРІНІҢ ШЫҒАРЫНДЫСЫ БАР ЖОБАЛЫҚ АПАТТЫ ТАЛДАУ

Е.А. Мартыненко, Д.А. Гановичев, А.С. Акаев, А.С. Хажидинов, Л.К. Жагипарова

*ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан*

Мақалада басқару және қорғау жүйесінің іркілістеріне байланысты жобалық апаттарда ИВГ.1М реактордың төмен байыту отынымен ЖШЖ жылу жағдайын талдау ұсынылды. Бір реттеу барабанының өздігінен пайда болатын айналымда апаттық жағдайлар және де максимальды тиімділікпен реттеу барабандарының жүйелері қарастырылды.

Мақалада келтірілген зерттеулердің міндеті, құрастыру бойынша және уақыт бойынша энергия бөлінудің қос қалыпқа келтірумен реактордың ЖШЖ стандартты емес жылу есебін жүргізуде болады.

Есептік зерттеулер нәтижесінде басқару және қорғау жүйесінің жұмыс бөліктерінің шығындылары бар жобалық апаттар кезінде суды салқындататын технологиялық каналдан шығу суы және ТВЭЛ-дер температурасының максимальды мағыналарының өзгерту диаграммалары алынды.

#### ANALYSIS OF DESIGN ACCIDENT AT THE IVG.1M REACTOR WITH EJECTION OF ACTUATING DEVICE OF CONTROL AND PROTECTION SYSTEM

Ye.A. Martynenko, D.A. Ganovichev, A.S. Akayev, A.S. Khazhidinov, L.K. Zhagiparova

*Branch “Institute of Atomic Energy” RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan*

The paper presents analysis of thermal condition of a fuel assembly (FA) with low-enriched uranium (LEU) fuel of the IVG.1M reactor at design accidents due to failure of control and protection system (CPS). The accidents with spontaneous turning of one control drum as well as drum control system with peak efficiency were considered.

The issue of research presented in the article was in conduction of nonsteady heat computation of reactor’s FA with double profiling of energy release throughout the height of the assembly and in time.

Based on results of the computation research, charts of changes of temperature peak values of FAs and water at the outlet from water-cooled technological channel at design accidents with ejection of CPS actuating device were obtained.