

УДК 621.039.572

ДИНАМИКА ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ РЕАКТОРА ИГР

Бекмагамбетова Б.Е., Вурим А.Д., Иркимбеков Р.А., Сураев А.С.

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

В статье представлены результаты расчетных исследований температурного поля реактора ИГР при длительном и коротком пуске с интегральной мощностью 5,2 ГВт с последующим расхолаживанием реактора. Показано, что при длительных пусках более часа возможно превышение заявленной максимальной интегральной мощности реактора без нарушения его эксплуатационных пределов по температуре.

ВВЕДЕНИЕ

Импульсный исследовательский ядерный реактор ИГР [1] с гомогенной уран-графитовой активной зоной является уникальным источником нейтронного и гамма-излучения, отличающимся высокой динамикой мощности. Рабочий диапазон параметров реактора регламентируется значением максимальной допустимой регистрируемой температуры активной зоны, равным 1400 К, достигаемой в ходе импульса.

Распределение температуры в активной зоне реактора прямым образом оказывает воздействие на динамику мощности реактора, поток нейтронов в центральном экспериментальном канале [2] и запас реактивности реактора. Расчетные исследования температурного поля реактора в настоящее время являются практически единственным источником информации о температуре активной зоны. С учетом несомненной актуальности задачи расчета температуры активной зоны реактора, большое внимание уделяется вопросам совершенствования расчетных методов, направленного на повышение качества планирования и анализа экспериментов, проводимых на реакторе ИГР.

УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ РАСЧЕТОВ

Распределение температуры в активной зоне реактора ИГР рассчитывается в результате совместного применения двух расчетных кодов – *MCNP* [3] и *ANSYS Mechanical* [4].

Распределение плотности потока нейтронов и источников энерговыделения в активной зоне рассчитывается с использованием нейтронно-физической *MCNP*-модели реактора ИГР [5], детально описывающей его геометрические и материальные характеристики.

Для определения распределения температуры в графитовой кладке реактора в программном комплексе *ANSYS Mechanical* создана расчетная модель одной четвертой части реактора ИГР с адаптированной сглаженной расчетной сеткой, показанной на рисунке 1. Особенностью этой модели, в сравнении с ранее применявшимися вариантами, является высокая плотность сетки конечных элементов, что обеспечивает улучшение сходимости результатов расчетов.

Исходные данные и граничные условия:

- начальная температура активной зоны реактора 293 К;
- температура окружающей среды 293 К;

- реактор работает на постоянном уровне мощности, временем переходных процессов – подъема и снижения мощности – пренебрегаем;
- мощность реактора 1 ГВт (короткий импульс) и 1 МВт (длинный импульс);
- коэффициент теплоотдачи при конвективном теплообмене между твердыми поверхностями и газом принят равным 20 Вт/м²К;
- коэффициент теплоотдачи на границе стенок ампулы НА-228 с охлаждающей ее водой принят равным 1000 Вт/м²К.

Расчетный анализ проводился для оценки теплового состояния реактора ИГР, достигаемого:

- 1) в процессе пуска реактора с интегральным энерговыделением в активной зоне, равным 5,2 ГДж;
- 2) после расхолаживания реактора в течение одного часа после пуска;
- 3) после расхолаживания реактора в течение суток после пуска;
- 4) после расхолаживания реактора в течение недели после пуска.

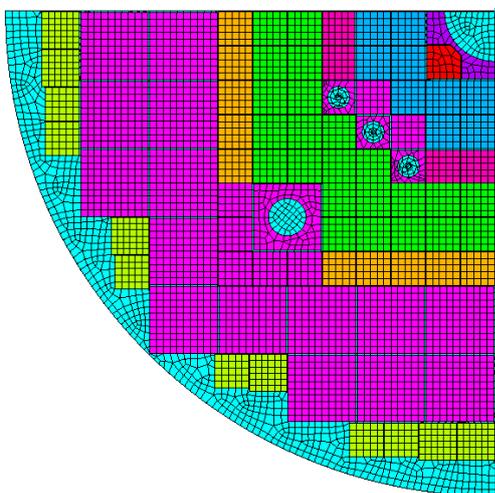
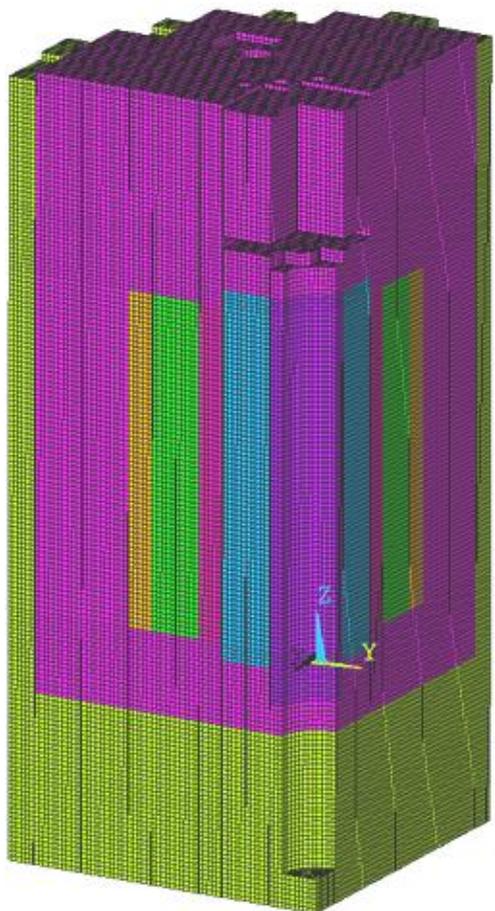
При проведении расчетов и в ходе анализа их результатов используются следующие допущения:

- распределение мощности по высоте активной зоны является гладким (рисунок 2) и зависит от времени;
- разогрев активной зоны происходит за счет полной энергии деления, которое представляется в виде:

$$E_f = E_K + \Delta E_n + E_\beta + E_{\gamma_{\text{мг}}} + E_{\gamma_{\text{зан}}} + E_{\text{захв}},$$

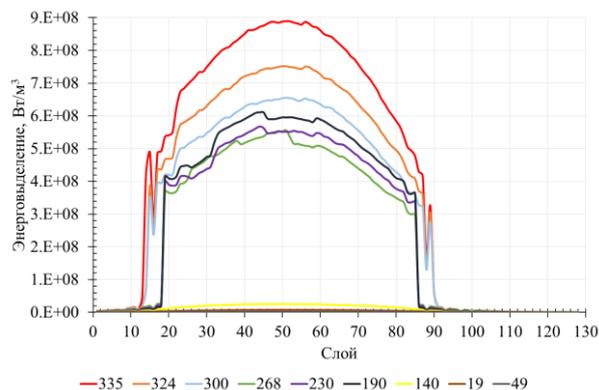
здесь: E_K – кинетическая энергия осколков деления после вылета мгновенных нейтронов; ΔE_n – разница между кинетической энергией нейтронов деления $E_n = v_f \varepsilon_\infty$ и ε_n – энергией нейтрона, вызвавшего деления; E_β – энергия β -частиц, испускаемых осколками и продуктами деления; $E_{\gamma_{\text{мг}}}$ – энергия γ -квантов, выделяющихся из осколков деления до их распада; $E_{\gamma_{\text{зан}}}$ – энергия γ -квантов, выпускаемых продуктами деления в серии β -распадов; $E_{\text{захв}}$ – энергия, выделяющаяся при поглощении нейтронов, не сопровождающемся делением [6];

- элементы реактора подвергаются облучению γ -излучением – как мгновенным, так и запаздывающим, при этом сделано допущение, что вся энергия выделяется мгновенно, и, следовательно, результаты расчета температуры консервативно завышены.

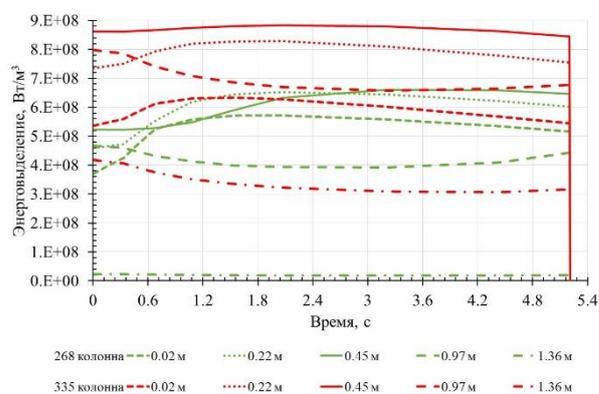


- – гелий
- – центральная графитовая втулка
- ■ – топливные блоки подвижной части кладки
- ■ – топливные блоки неподвижной части кладки
- ■ – графитовые блоки
- – графитовые блоки отражателя, энергосвечением в которых пренебрегли

Рисунок 1. Расчетная модель реактора ИГР для ANSYS Mechanical



а) распределение мощности по высоте активной зоны в контрольных колоннах графитовой кладки



б) энергосвечение по высоте в контрольных колоннах в зависимости от времени

Рисунок 2. Распределение мощности по высоте активной зоны и в зависимости от времени в коротком импульсе

Для обмена результатами расчета распределения энергосвечения в активной зоне реактора между нейтронно-физической и теплофизической моделями была разработана программа на языке *Visual Basic*.

Для отображения поля температуры в горизонтальном сечении выбрано сечение на отметке 0,45 м выше нижнего торца неподвижной части кладки по оси Z, которое характеризуется максимальными значениями температуры. Для упрощения обработки и анализа результатов расчетов принята сквозная нумерация графитовых колонн, а также пронумерованы слои в каждой из колонн. На рисунке 3 выделены колонны, для которых далее будет отображаться изменение температуры во времени. Следует отметить, что колонна 268 примыкает к колонне 267, для которой регламентируется значение максимально допустимой регистрируемой температуры активной зоны, равное 1400 К.

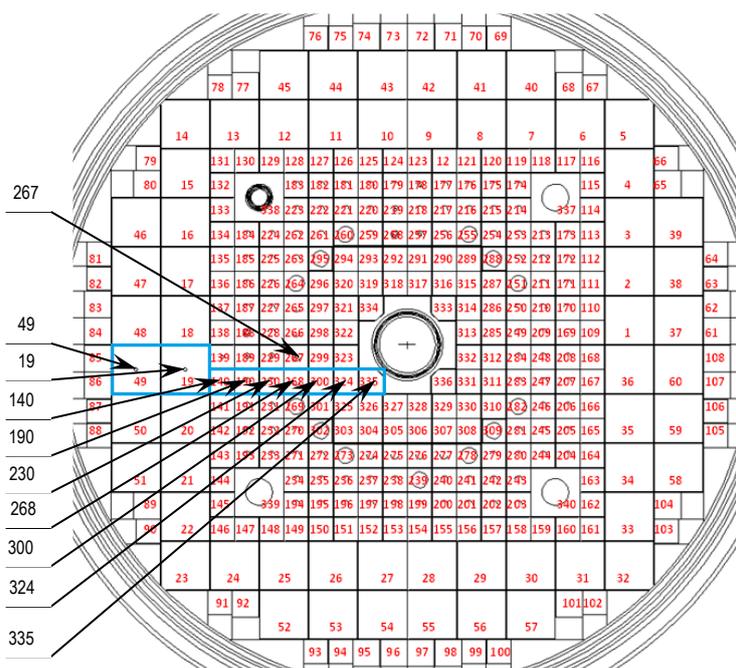


Рисунок 3. Нумерация колонн реактора ИГР в соответствии с нейтронно-физической моделью

Короткий импульс

На рисунке 4 показано поле температуры в горизонтальном сечении и по высоте реактора, а также изменение температуры во время короткого импульса. Максимальная температура активной зоны реактора составляет 1840 К (в колонне 335), при этом температура в контрольной точке превышает регламентированное максимальное значение (1400 К) и составляет приблизительно 1470 К (колонна 268), что объясняется консервативным подходом к заданию мгновенного и запаздывающего энерговыделения, обусловленного γ -излучением. Графитовые колонны отражателя, не пропитанные ураном, также подвергаются разогреву до 400 К за счет γ -излучения.

При расхолаживании реактора в течение первого часа температура в топливных блоках активной зоны понижается на ~500К – в основном, за счет перераспределения тепла в колоннах с топливными блоками, как показано на рисунке 5. За сутки температура активной зоны реактора снизится до 373 К. Охлаждение реактора происходит за счет принудительного охлаждения НА-228 (ЦЭЖ) и конвекции на боковой поверхности реактора. При этом, как видно из рисунка 6, максимум температуры смещается из активной зоны в сторону отражателя. Таким образом, через сутки расхолаживания температура отражателя в реакторе будет несколько превышать температуру активной зоны при наличии принудительного охлаждения НА-228. На рисунке 7 показано тепловое состояние реактора после расхолаживания в течении недели, при этом различие температуры отдельных элементов активной зоны не превышает 2 К. Приблизительно через пять суток расхолаживания реактор прихо-

дит в температурное равновесие с окружающей средой.

Длинный импульс

На рисунке 8 показано поле температуры в горизонтальном сечении и по высоте реактора, а также изменение температуры во время длинного импульса. Максимальная температура активной зоны реактора составляет 1390 К (в колонне 323). Графитовые колонны отражателя, не пропитанные ураном, подвергаются разогреву до 700 К как за счет γ -излучения, так и за счет теплопередачи от топливных блоков.

Полученные результаты показывают важность учета динамики тепловых процессов при описании длинных импульсов. В частности, при интегральном энерговыделении в реакторе 5,2 ГДж в длинном импульсе температура в контрольной точке не достигает регламентированного максимального значения, равного 1400 К, а составляет приблизительно 1200 К (колонна 268). Последнее означает, что в длинном импульсе допустимое интегральное энерговыделение в реакторе может превышать значение 5,2 ГДж, при этом эксплуатационный предел допустимой температуры активной зоны не будет превышен.

При расхолаживании реактора в течение первого часа температура в топливных блоках понижается на ~250К, а температура в остальной части реактора постепенно растет, как показано на рисунке 9. За сутки, также, как и при коротком импульсе, температура активной зоны реактора снизится до 373 К, при этом максимум температуры сместится из активной зоны в сторону отражателя (рисунок 10). Приблизительно в течение пяти суток происходит полное расхолаживание реактора (рисунок 11).

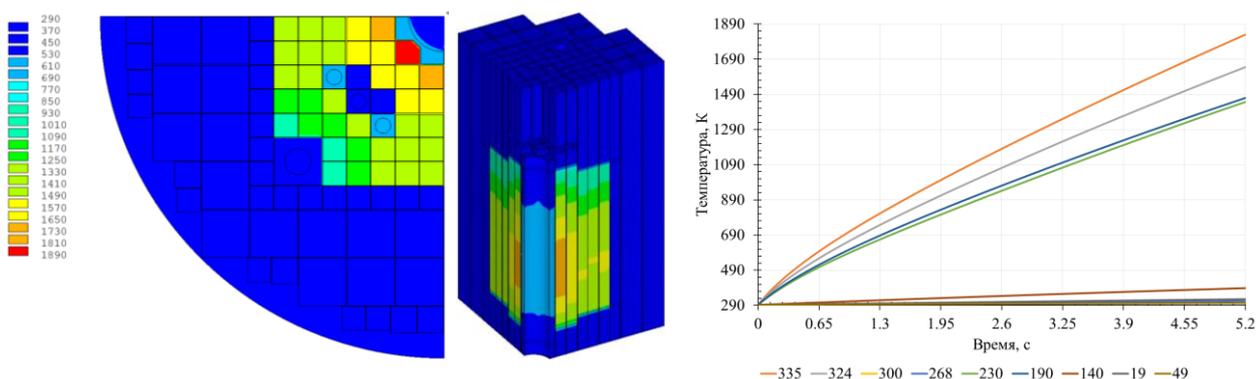


Рисунок 4. Температурное поле в конце короткого импульса и изменение температуры реактора в течение импульса

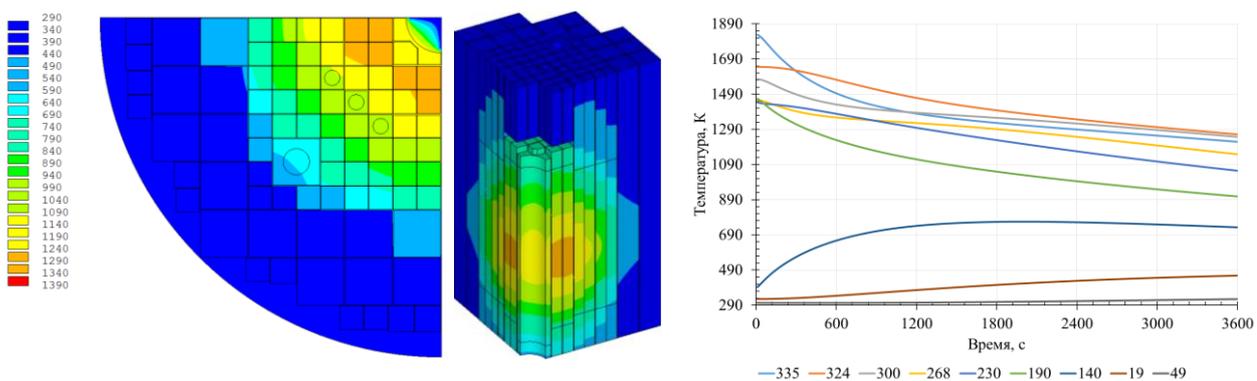


Рисунок 5. Температурное поле через один час расхолаживания после короткого импульса и изменение температуры реактора в процессе расхолаживания

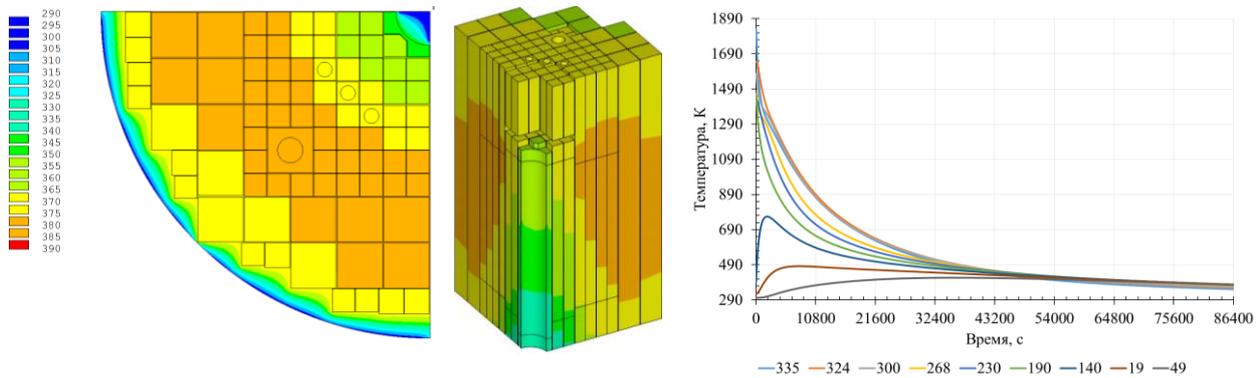


Рисунок 6. Температурное поле через одни сутки расхолаживания после короткого импульса и изменение температуры реактора в процессе расхолаживания

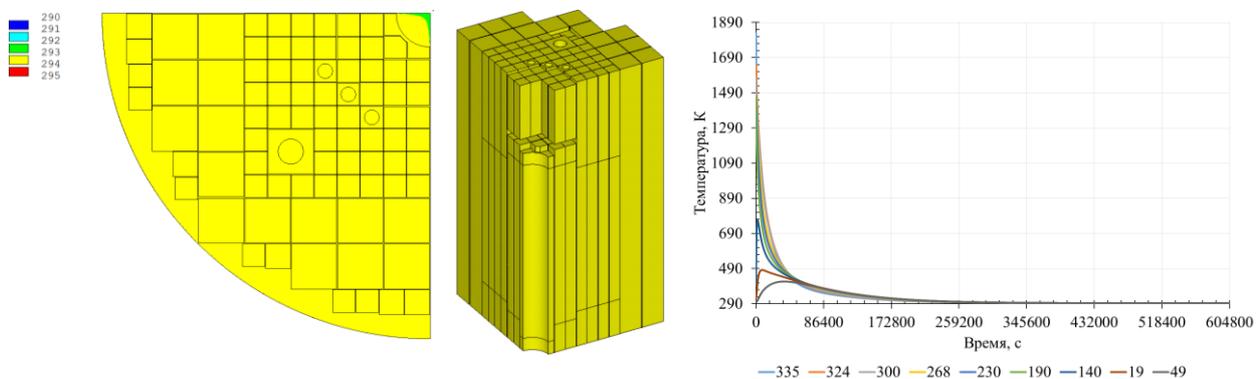


Рисунок 7. Температурное поле через семь суток расхолаживания после короткого импульса и изменение температуры реактора в процессе расхолаживания

ДИНАМИКА ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ РЕАКТОРА ИГР

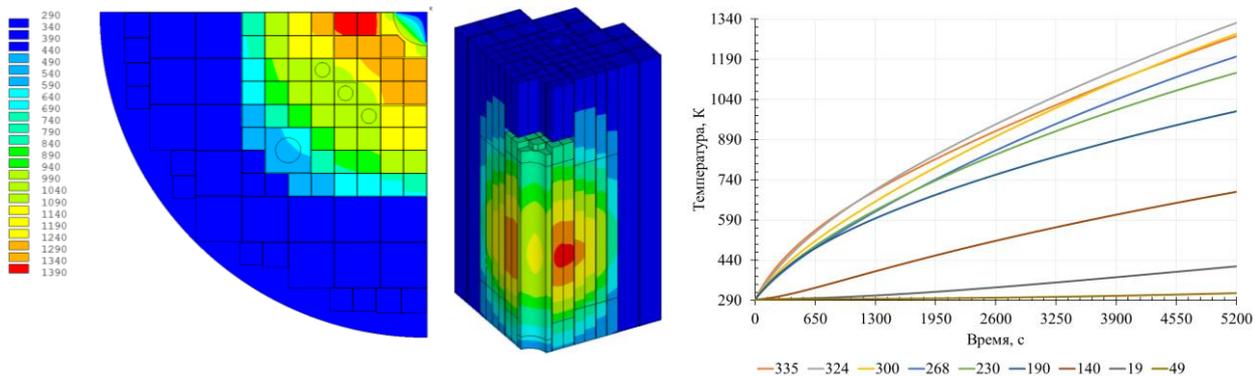


Рисунок 8. Температурное поле в конце длинного импульса и изменение температуры реактора в течение импульса

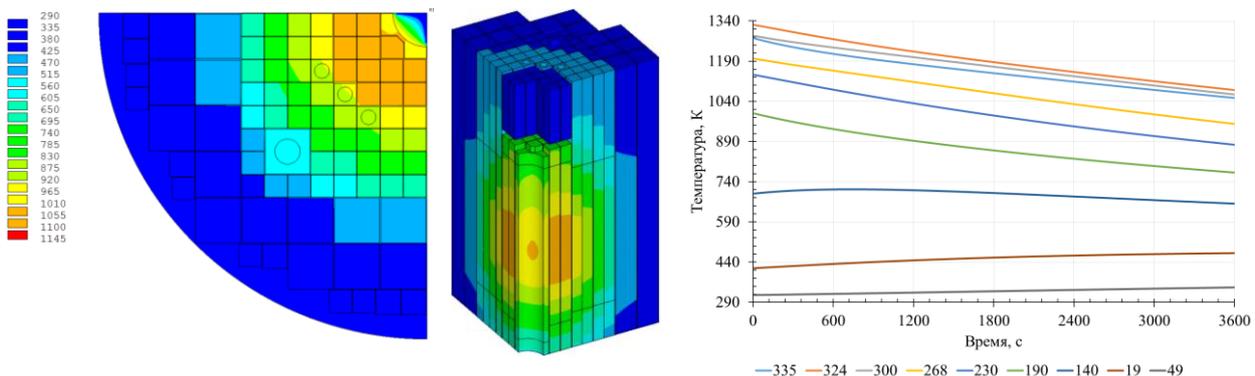


Рисунок 9. Температурное поле через один час расхолаживания после длинного импульса и изменение температуры реактора в процессе расхолаживания

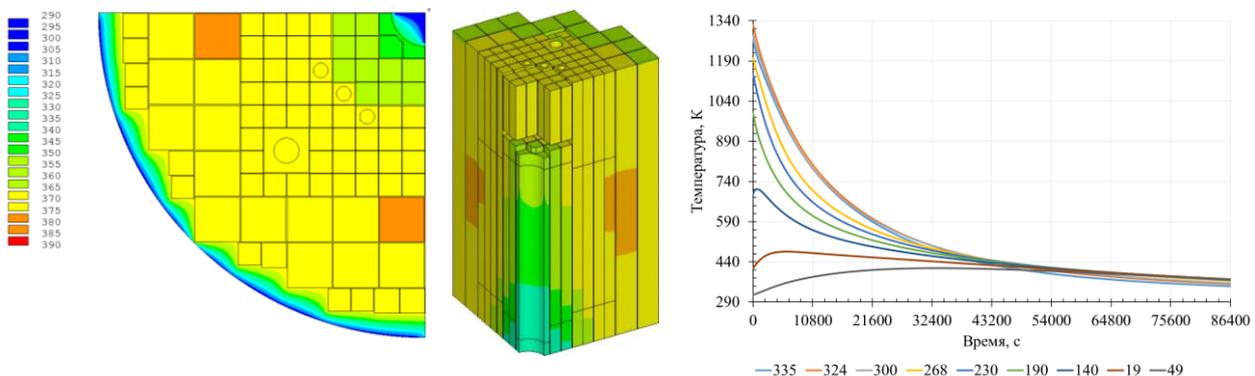


Рисунок 10. Температурное поле через одни сутки расхолаживания после длинного импульса и изменение температуры реактора в процессе расхолаживания

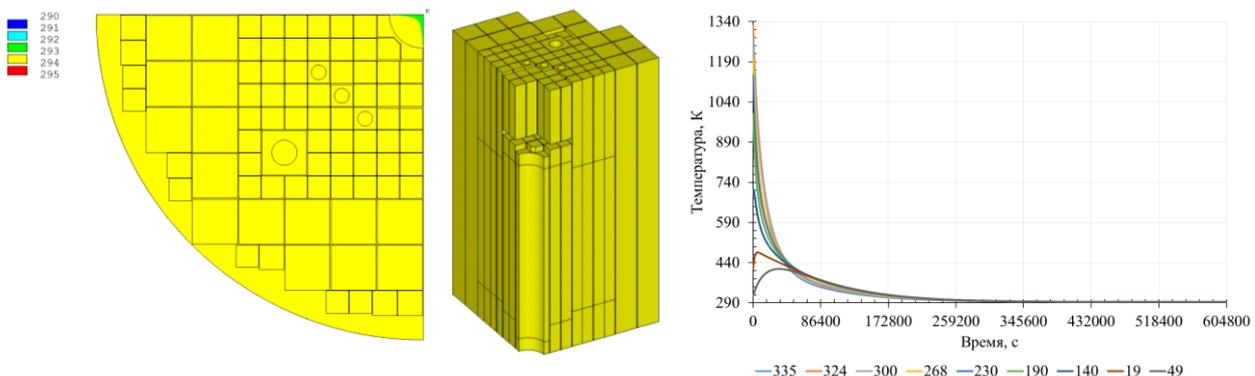


Рисунок 11. Температурное поле через семь суток расхолаживания после длинного импульса и изменение температуры реактора в процессе расхолаживания

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Моделирование температурного поля реактора ИГР при интегральном энерговыделении 5,2 ГДж в длительном и коротком импульсе с последующим расхолаживанием показало, что:

- максимальная температура активной зоны реактора 1840 К достигается в коротком импульсе;
- в коротком импульсе расчетное значение температуры в контрольной точке (1470 К) превышает регламентированное максимальное значение

(1400 К), что объясняется консервативным подходом при задании мощности энерговыделения в блоках реактора;

- при длительных пусках возможна реализация интегральной мощности реактора более 5.2 ГДж без превышения его эксплуатационных пределов по температуре;
- время расхолаживания до 373 К составляет около суток и до 293 К длится около пяти суток как при коротком, так и при длинном импульсе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Курчатов И.В. Импульсный графитовый реактор ИГР / И.В. Курчатов, С.М. Фейнберг, Н.А. Доллежалъ // Атомная энергия. Москва 1964, – Т. 17, № 6, – с. 463–474.
2. Бекмагамбетова Б.Е. Исследования характеристик ИГР с топливом низкого обогащения/ Б.Е. Бекмагамбетова, А.Д. Вурим, В.М. Котов и др.// Вестник НЯЦ РК. Курчатов 2017, – вып. 3, – с. 51–54.
3. Вурим А.Д., Котов В.М., Иркимбеков Р.А., Жагипарова Л.К., Байгожина А.А. Компьютерная модель реактора ИГР для стационарных нейтронно-физических расчетов. – А.с. №2738 РК, 27.12.2016.
4. MCNP-5.1.40 Monte-Carlo N-Particle Transport Code: Los Alamos National Laboratory; Los Alamos, New Mexico. – April 24, 2003.
5. ANSYS, Inc. Products release 14.5 Documentation for ANSYS WORKBENCH: ANSYS Inc. – Электрон. дан. и прогр. – [Б. м.], 2014.
6. Крамеров А.Я., Шевелев Я.В. Инженерные расчеты ядерных реакторов. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 736 с.

ИГР РЕАКТОРЫНЫҢ ТЕМПЕРАТУРАЛЫҚ ӨРІСІНІҢ ДИНАМИКАСЫ

Б.Е. Бекмагамбетова, А.Д. Вурим, Р.А. Иркимбеков, А.С. Сураев

ҚР ҰЯО РМК «Атом энергия институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

Мақалада 5,2 ГВт интегралды қуаты бар ұзақ және қысқа іске қосуы және ИГР реактордың кейінгі суыту кезінде температуралық өрісінің есептік зерттеулерінің нәтижелері көрсетілген.

Көрсеткендей, реактордың температура бойынша пайдалану шегінен бұзылмастан, бір сағаттан артық ұзақ іске қосу кезінде оның берілген максималды интегралды қуатын жоғарлауы мүмкін.

IGR REACTOR TEMPERATURE FIELD DYNAMICS

B.Ye. Bekmagambetova, A.D. Vurim, R.A. Irkimbekov, A.S. Surayev

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

The article provides results of calculation studies of the IGR reactor temperature field under long-term and short start-up with integral power of 5.2 GW with subsequent cooling down of the reactor.

It is shown that during long start-up which takes more than one hour it is possible to exceed the declared maximum integrated power of the reactor without disfunction of its operating temperature limits.