

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ ШЕЛЬФ-М С ОБРАТНЫМИ СВЯЗЯМИ ПО ТЕМПЕРАТУРЕ ТОПЛИВА И ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Д.А. Плотников*, А.Л. Лобарев*, И.Н. Кривошеин,
П.Б. Кузнецов**, А.Н. Иванюта****

* НИЯУ МИФИ

115409, г. Москва, Каширское ш., 31

** АО «НИКИЭТ»

107140, г. Москва, ул. Малая Красносельская, 2/8



Развитие атомной энергетики неразрывно связано с разработкой прорывных решений в области хозяйственного освоения новых территорий. В связи с этим задача энергообеспечения удаленных и труднодоступных регионов с децентрализованным энергоснабжением в настоящее время является актуальной. Для решения данной задачи в АО «НИКИЭТ» разрабатывается вариант унифицированной реакторной установки (РУ) водо-водяного типа ШЕЛЬФ-М для использования в атомных станциях малой мощности в качестве источника электроснабжения объектов, расположенных на морском шельфе, включая районы Арктического побережья, а также районов с практически отсутствующей энергетической и транспортной инфраструктурой. Одним из этапов обоснования безопасности при эксплуатации РУ ШЕЛЬФ-М является исследование поведения реактора в переходных динамических режимах на различных уровнях мощности. Для этого проведена работа по разработке пространственной динамической модели реактора с обратными связями по температуре топлива и теплоносителя. Процесс разработки динамической модели представляет собой комплексную задачу, включающую в себя как подготовку константного обеспечения для последующих расчетов, так и формирование нейтронно-физической и теплофизической модели реактора. Представлены описание этапов разработки пространственной динамической модели РУ ШЕЛЬФ-М, а также результаты проведенных совместных нейтронно-теплофизических расчетов переходных процессов с использованием разработанной динамической модели реактора. В качестве переходных нестационарных процессов рассматриваются передвижения стержней компенсирующих групп в «холодном» и «горячем» состояниях РУ ШЕЛЬФ-М.

Ключевые слова: реактор водо-водяного типа, динамика, обратные связи, моделирование.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы во всём мире усиливается интерес к разработке и использованию атомных станций малой мощности (АСММ). В удалённых труднодоступных районах России АСММ являются эффективной заменой существующих систем энергообеспечения на углеводородном сырье [1 – 3].

К настоящему времени в АО «НИКИЭТ» на различных стадиях проектирования разработаны реакторные установки (РУ) с высоким уровнем надежности, безопасности и экологичности [4 – 6]. Одной из самых перспективных разработок в данном направлении является вариант унифицированной РУ водо-водяного типа ШЕЛЬФ-М для использования в АСММ различного назначения [7].

В рамках реализации проекта РУ ШЕЛЬФ-М требовалось провести расчетное обоснование безопасной эксплуатации установки при переходных нестационарных режимах на различных уровнях мощности. Для решения данной задачи была разработана пространственная динамическая модель реактора с обратными связями по температуре топлива и теплоносителя.

Процесс разработки динамической модели состоял из следующих этапов: подготовка двухгрупповой библиотеки макроконстант с применением программного комплекса (ПК) семейства MCU [8], формирование модели РУ ШЕЛЬФ-М в диффузионном приближении с применением ПК FACT, являющимся адаптацией аттестованного ПК FACT-BR [9] для РУ ШЕЛЬФ-М, а также интеграция в ПК FACT программного теплофизического модуля IVIS, разработанного на основе теплофизического модуля IVIS-BR, сведения о котором представлены [10]. В результате с использованием подготовленной модели проводились совместные нейтронно-физические и теплофизические расчеты переходных процессов на различных уровнях мощности реактора. В качестве переходных нестационарных процессов рассматривалось передвижение стержней компенсирующих групп в «холодном» и «горячем» состояниях РУ ШЕЛЬФ-М.

ПОДГОТОВКА ДВУХГРУППОВОЙ БИБЛИОТЕКИ МАКРОКОНСТАНТ

Для анализа нестационарных процессов РУ ШЕЛЬФ-М была сформирована двухгрупповая библиотека макросечений и коэффициентов диффузии в зависимости как от положения стержней компенсирующих групп, так и от значений температуры топлива и теплоносителя в рассматриваемой расчетной ячейке. Для этого была разработана прецизионная модель реактора в ПК семейства MCU с библиотекой нейтронных данных MDB650, ориентированных на расчет тепловых ядерных реакторов. Данный ПК позволяет выполнять прецизионные нейтронно-физические расчеты методом Монте-Карло с решением газокинетического уравнения переноса нейтронов и непрерывным описанием спектра нейтронов.

Прецизионная модель РУ ШЕЛЬФ-М представляет собой трехмерную расчетную модель реактора, где все элементы активной зоны и бокового отражателя описаны гетерогенно. Торцевой отражатель задан в модели гомогенно. Топливо в расчётной модели разбито на 10 материальных зон по высоте. Для регистрации функционалов ТВС разбита на 18 слоёв, включая три слоя нижнего отражателя, десять слоёв на уровне активной зоны и пять слоёв верхнего отражателя. Фрагмент расчетной модели РУ ШЕЛЬФ-М, подготовленной в ПК MCU, показан на рис. 1.

Для формирования двухгрупповой библиотеки макроконстант в подготовленной расчетной модели варьировались положения стержней компенсирующих групп, значения температуры топлива и теплоносителя и ядерных концентраций в соответствующих расчетных ячейках. При расчете ядерных концентраций теплоносителя учитывалась зависимость плотности теплоносителя (легкая вода) от температуры теплоносителя при давлении, соответствующем давлению первого контура реактора. Эти зависимость представлена на рис. 2.

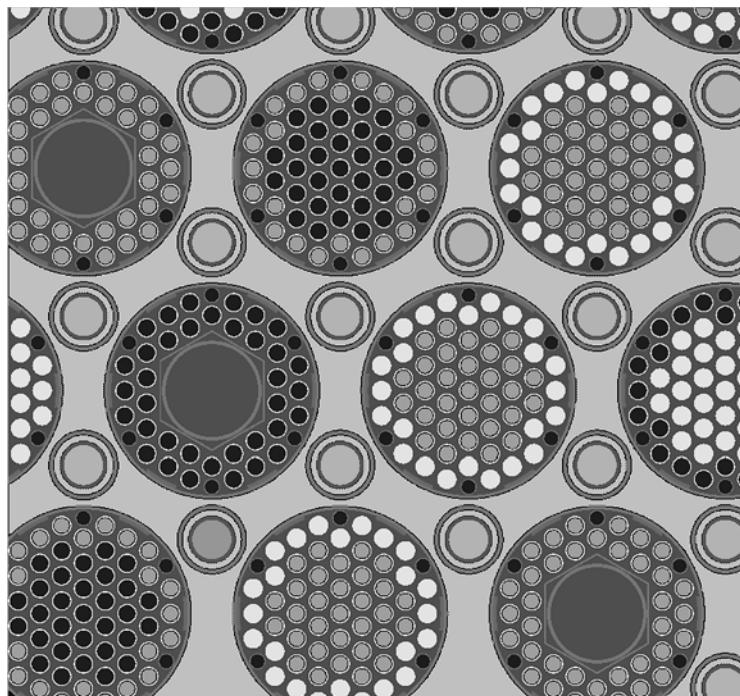


Рис. 1. Фрагмент активной зоны расчетной модели РУ ШЕЛЬФ-М в ПК МСУ

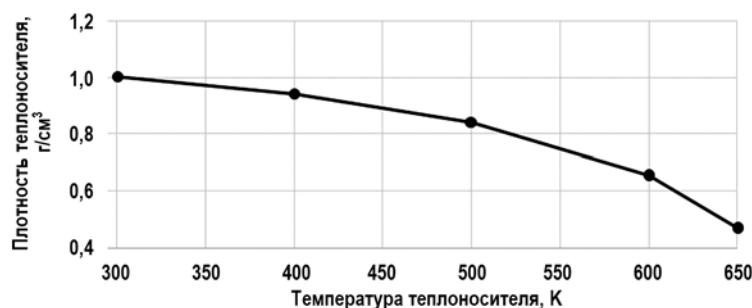


Рис. 2. Изменение плотности теплоносителя в зависимости от температуры

По результатам проведенных нейтронно-физических расчетов формировалась матрица значений макроконстант в каждой расчетной ячейке. Далее методом наименьших квадратов были рассчитаны полиномы четвертой степени, зависящие от температуры топлива и теплоносителя. Полученные полиномы нормировались на значения макроконстант, соответствующие температуре топлива и теплоносителя, равной 300 К, что соответствует «холодному» состоянию реактора.

Полученная таким образом двухгрупповая библиотека макроконстант использовалась в следующих этапах разработки динамической пространственной модели РУ.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РУ ШЕЛЬФ-М В ПК FACT

Подготовленная двухгрупповая библиотека макросечений и коэффициентов диффузии использовалась для формирования модели РУ ШЕЛЬФ-М в ПК FACT. Модель представляет собой совокупность 19-ти типов расчетных ячеек, разделенных по высоте на 18 слоев (десять слоев отводится на активную зону, и восемь – на нижний и верхний торцевые отражатели). Разделение по типу ячеек проводилось по количеству и типу окружающих стержней компенсирующих групп, а также по типу ТВС в данной рассматриваемой ячейке.

ваемой ячейке. В рассматриваемой модели стержни компенсирующих групп объединены в три группы – периферийная (ПКГ), средняя (СКГ) и центральная (ЦКГ).

Картограмма расчетной модели РУ ШЕЛЬФ-М в ПК FACT показана на рис. 3. Описание типов ячеек в расчетной модели представлено в табл. 1.

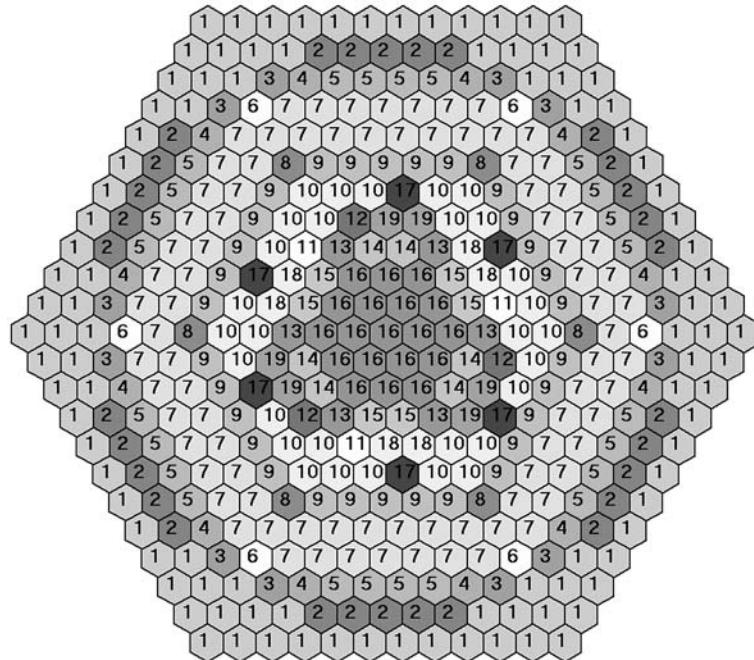


Рис. 3. Расчетная модель РУ ШЕЛЬФ-М в ПК FACT

Таблица 1

Наименование типов ячеек в расчетной модели РУ ШЕЛЬФ-М в ПК FACT

Номера ячеек	Тип ячеек
1 – 4	Ячейки отражателя
5 – 19	Ячейки ТВС (номер определяется типом ТВС и количеством стержней компенсирующих групп, окружающих ТВС)

Номера ячеек определяются как типом ТВС (для топливных ячеек), так и наличием (учетом) в расчетной ячейке стержней одной из компенсирующих групп. Так, например, расчетная ячейка, представляющая собой отражатель и не содержащая ни одного стержня компенсирующей группы, имеет номер 1, а расчетная ячейка, представляющая собой отражатель, окруженный тремя стержнями ПКГ, имеет номер 4.

ПК FACT является адаптацией ПК FACT-BR для РУ ШЕЛЬФ-М [9] и предназначен для проведения трехмерных совместных нейтронно-физических и теплогидравлических расчётов стационарных состояний и нестационарных процессов ядерного реактора с учетом функционирования систем управления. Для расчета трехмерного поля плотности потока нейtronов и распределения мощности в программе используется малогрупповое (от двух до 26-ти энергетических групп) диффузационное приближение. Уравнения диффузии решаются либо конечно-разностным методом, либо нодальным методом Аскью-Такеда. Для проведения расчетов переходных процессов РУ ШЕЛЬФ-М использовалось двухгрупповое диффузационное приближение с применением нодального метода Аскью-Такеда.

Для проверки правильности задания модели реактора с помощью ПК FACT проводился расчет стационарных состояний реактора, подготовленных при значениях темпера-

туры топлива и теплоносителя, равных 300 К («холодное» состояние реактора). Стационарные состояния реактора соответствуют определенным положениям стержней ПКГ, СКГ и ЦКГ. Правильность задания модели определялась по относительным отклонениям по $K_{\text{эф}}$, а также среднеквадратичным отклонениям (СКО) по мощности между результатами расчетов стационарных состояний в ПК MCU и ПК FACT, рассчитанным с использованием значений мощности в каждой топливной расчетной ячейке (ТВС).

Полученные отклонения представлены в табл. 2. Относительные отклонения по $K_{\text{эф}}$ лежат в диапазоне от -0,26 до 0,35%, СКО по мощности лежат в диапазоне от 2,1 до 4,8%.

Таблица 2

Относительные отклонения по $K_{\text{эф}}$ и СКО по мощности

Номер состояния	Глубина погружения, см				$K_{\text{эф}}^{\text{MCU}}$	$K_{\text{эф}}^{\text{FACT}}$	Относительные отклонения по $K_{\text{эф}}$ (FACT-MCU), %	СКО по мощности, %
	ПКГ	СКГ	ЦКГ	АЗ				
1	0	0	0	0	1,262	1,263	0,05	2,1
2	87	0	0	0	1,213	1,210	-0,26	4,4
3	0	87	0	0	1,153	1,154	0,07	3,0
4	0	0	87	0	1,225	1,230	0,35	4,8
5	0	0	0	92	1,238	1,238	0,04	4,2
6	87	87	87	0	0,990	0,992	0,22	2,7
7	87	87	87	92	0,976	0,976	0,02	3,9

ИНТЕГРАЦИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОГО МОДУЛЯ IVIS В ПК FACT

Для моделирования теплофизических процессов использовался программный теплофизический модуль IVIS, предназначенный для моделирования и расчетного обоснования поведения одиночного многослойного цилиндрического объекта, в том числе твэла с различными типами топлива, газовыми и жидкокометаллическими слоями, омываемого жидкокометаллическим теплоносителем или водой под давлением. Теплофизический модуль IVIS разработан на основе теплофизического модуля IVIS-BR [9]. Для разработки динамической модели РУ ШЕЛЬФ-М теплофизический модуль IVIS был интегрирован в ПК FACT.

Расчет гидравлических процессов не производился. Расход теплоносителя через ТВС был выбран постоянным и не менялся в моделируемых переходных режимах. Расчет теплофизических параметров РУ ШЕЛЬФ-М проводился при условии отсутствия кипения теплоносителя.

Результатами расчета теплофизического модуля IVIS являются значение температуры топлива и теплоносителя в расчетных ячейках модели РУ ШЕЛЬФ-М. Полученные значения температур использовались для расчета двухгрупповых макросечений и коэффициентов диффузии. Расчеты проводились без учета энерговыделения в отражателе, поэтому в нижних слоях отражателя температура постоянны, равны температуре теплоносителя на входе в активную зону реактора и в переходном процессе не меняются, а в верхних слоях отражателя принимают значение температуры теплоносителя на выходе из активной зоны.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

В качестве демонстрации результатов совместного нейтронно-физического и теплофизического расчета переходных процессов рассматривается движение стержней компенсирующих групп в критическом состоянии реактора (стартовое состояние) в «холодном» и «горячем» состояниях реактора.

Переходной процесс моделируется в два этапа. Первым этапом расчета идет уста-

новление стационарного состояния реактора. В процессе перерасчета плотности нейтронного потока происходит пересчет температур топлива и теплоносителя и соответствующий пересчет макросечений и коэффициентов диффузий в каждой расчетной ячейке. Вторым этапом происходит моделирование переходного процесса.

Для моделирования переходных процессов использовалось шесть групп запаздывающих нейтронов. В таблице 3 представлены данные шести групп эмиттеров запаздывающих нейтронов для расчета пространственной кинетики, полученные в результате расчета РУ ШЕЛЬФ – М в ПК МСУ.

Описание стартового состояния, соответствующего «горячему» состоянию РУ ШЕЛЬФ-М, представлено в табл. 4. «Горячее» состояние соответствует работе реактора на номинальном уровне мощности.

Таблица 3
Данные по шести группам эмиттеров запаздывающих нейтронов

Номер группы эмиттеров	Доля запаздывающих нейтронов	Постоянная распада эмиттеров запаздывающих нейтронов, с^{-1}
1	$2,56 \cdot 10^{-4}$	0,012
2	$1,46 \cdot 10^{-3}$	0,033
3	$1,306 \cdot 10^{-3}$	0,121
4	$2,843 \cdot 10^{-3}$	0,303
5	$9,37 \cdot 10^{-4}$	0,849
6	$2,02 \cdot 10^{-4}$	2,85

Таблица 4
Описание стартового состояния

Параметр	Значение
Температура топлива, К	590
Температура теплоносителя на входе в а.з, К	544
Мощность реактора, МВт	35,2
$K_{\text{зф}}$	0,9988
Положение стержней ПКГ, см	53
Положение стержней СКГ, см	65
Положение стержней ЦКГ, см	78

Для демонстрации работы теплофизического модуля IVIS в табл. 5 представлены максимальная температура топлива, максимальная температура теплоносителя, максимальный перепад температур по твэлу, которые достигаются в ходе установления стационарного температурного поля в реакторе во время проведения стационарного расчета.

Таблица 5
Теплофизические параметры РУ ШЕЛЬФ-М

Параметр	Значение
Максимальная температура топлива, К	659,9
Максимальная температура теплоносителя, К	584,6
Максимальный перепад температур по твэлу, К	140,08

После установления стационарного состояния реактора осуществляется моделиро-

вание переходного процесса. Переходной процесс моделировался следующим образом:

- в момент времени $t = 5$ с начинается передвижение стержней ЦКГ из положения 78 см в положение 81 см (введение стержней ЦКГ);
- в момент времени $t = 35$ с происходит остановка стержней ЦКГ в положении 81 см (остановка стержней ЦКГ);
- в момент времени $t = 55$ с начинается передвижение стержней ЦКГ из положения 81 см в положение 78 см (извлечение стержней ЦКГ);
- в момент времени $t = 85$ с происходит остановка стержней ЦКГ в положении 78 см (остановка стержней ЦКГ);
- скорость передвижения стержней ЦКГ равна 0,1 см/с;
- длительность переходного процесса составляет 100 с.

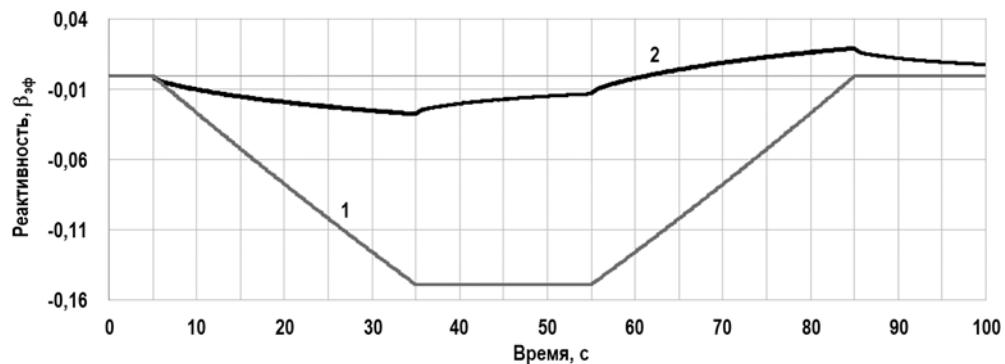


Рис. 4. Изменение реактивности для моделей без обратных связей (1) и с обратными связями (2) по температуре топлива и теплоносителя

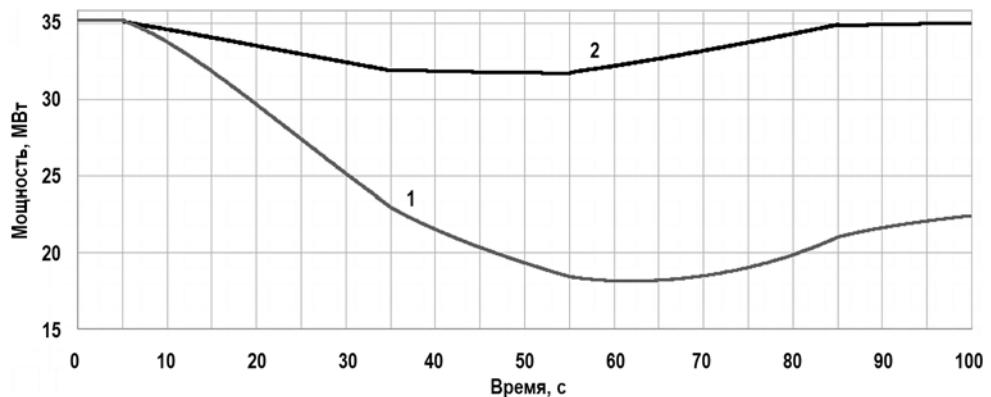


Рис. 5. Изменение мощности для моделей без обратных связей (1) и с обратными связями (2) по температуре топлива и теплоносителя

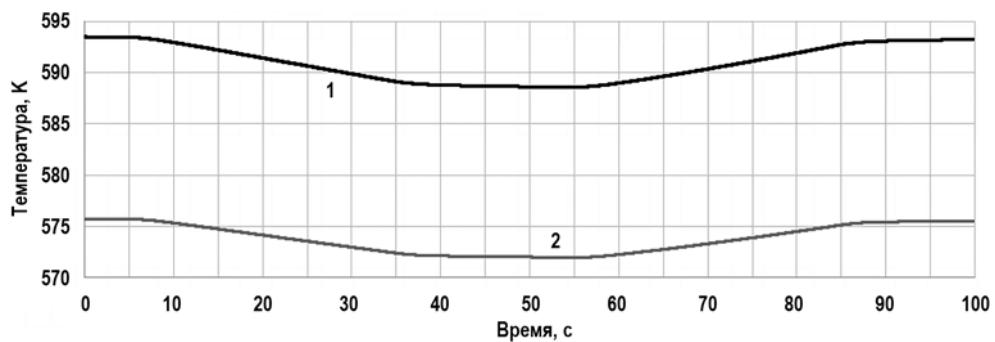


Рис. 6. Изменение температуры топлива (1) и теплоносителя (2) в выбранном слое ТВС центральной группы

Переходной процесс отображен на графиках изменения реактивности (рис. 4), мощности (рис. 5) и температуры топлива и теплоносителя (рис. 6). Для сравнения с моделью пространственной кинетики без обратных связей на графиках изменения реактивности (см. рис. 4) и мощности (см. рис. 5) добавлены графики переходного процесса без учета обратных связей по температуре топлива и теплоносителя.

Для проверки работоспособности подготовленной модели РУ ШЕЛЬФ-М на различных уровнях мощности, был проведен расчет переходного процесса для «холодного» состояния реактора. «Холодное» состояние реактора соответствует мощности реактора, равной 1,0 МВт. Процесс моделирования переходного процесса в случае «холодного» состояния реактора проводился аналогичным процессу в случае «горячего» состояния реактора образом. Описание стартового состояния в случае «холодного» состояния РУ ШЕЛЬФ-М представлено в табл. 6.

Таблица 6

Описание стартового состояния

Параметр	Значение
Температура топлива, К	300
Температура теплоносителя на входе в а.з, К	300
Мощность реактора, МВт	1,0
$K_{\text{эф}}$	0,9999
Положение стержней ПКГ, см	68
Положение стержней СКГ, см	82
Положение стержней ЦКГ, см	68

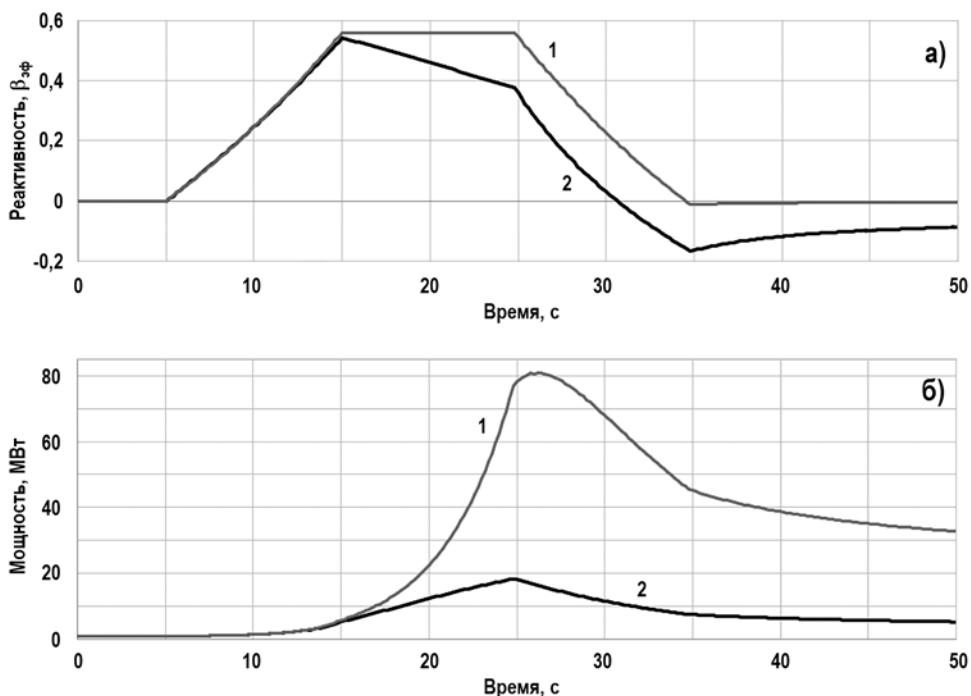


Рис. 7. Изменение реактивности (а) и мощности (б) в моделях без обратных связей (1) и с обратными связями (2) по температуре топлива и теплоносителя

Переходной процесс в случае «холодного» состояния реактора моделировался следующим образом:

- в момент времени $t = 5$ с начинается передвижение стержней СКГ из положения 82 см в положение 79 см от верха активной зоны (извлечение стержней СКГ);
- в момент времени $t = 15$ с стержни СКГ останавливаются в положении 79 см от верха активной зоны (остановка стержней СКГ);
- в момент времени $t = 25$ с начинается передвижение стержней СКГ из положения 79 см в положение 82 см от верха активной зоны (введение стержней СКГ);
- в момент времени $t = 35$ с стержни СКГ останавливаются в положении 82 см от верха активной зоны (остановка стержней СКГ);
- скорость передвижения стержней СКГ равна 0,3 см/с;
- длительность переходного процесса составляет 50 с.

Переходной процесс отображен на графиках изменения реактивности (рис. 7 а), мощности (рис. 7 б) и температуры топлива и теплоносителя (рис. 8). Для сравнения на графиках изменения реактивности и мощности добавлены графики переходного процесса без учета обратных связей по температуре топлива и теплоносителя.

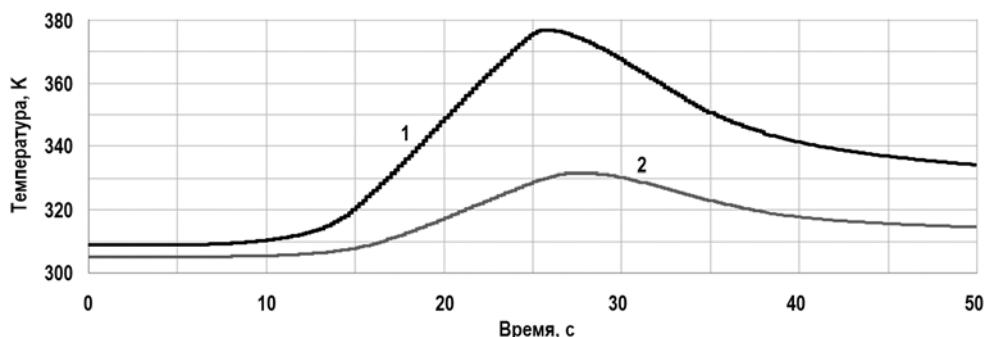


Рис. 8. Изменение температуры топлива (1) и теплоносителя (2)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения работы в ПК FACT реализована технология расчета переходных нестационарных процессов РУ ШЕЛЬФ-М с использованием пространственной динамической модели реактора с обратными связями по температуре топлива и теплоносителя.

Проведены совместные нейтронно-физические и теплофизические расчеты переходных нестационарных процессов РУ ШЕЛЬФ-М, заключающихся в передвижении стержней компенсирующих групп из «холодного» и «горячего» состояния реактора. Продемонстрированы результаты моделирования исследуемых переходных режимов.

Таким образом, полученная пространственная динамическая модель РУ ШЕЛЬФ-М позволяет проводить анализ поведения реактора в переходных нестационарных процессах на различных уровнях мощности.

Дальнейшие работы направлены на усовершенствование модели РУ ШЕЛЬФ-М, в частности, на разработку теплогидравлической и термомеханической модели реактора и интеграции соответствующих программных модулей в ПК FACT.

Литература

1. Воропай Н.И., Санеев Б.Г., Иванова И.Ю., Ижбулудин А.К. Сравнительная эффективность использования атомных станций малой мощности в локальных энергосистемах на востоке России. / Сб. докл. конференции «Атомные станции малой мощности: новое направление развития энергетики». – М.: Академ-Принт, 2015. – С. 59.
2. Пименов А.О., Куликов Д.Г., Васильев А.П., Молоканов Н.А. Атомные станции малой мощности на арктических территориях: вопросы экономической целесообразности и экологической безопасности. // Арктика: экология и экономика. – 2019. – № 2 (34). –

- С. 120-128. DOI: <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2019-2-120-128>.
3. Гольцов А.Е., Молоканов Н.А. Оценка конкурентоспособности АСММ на базе РУ ШЕЛЬФ для изолированных территорий на примере Республики Саха (Якутия). / В сб. Научно-технический годовой отчет НИКИЭТ-2019. – М.: АО «НИКИЭТ», 2019. – С. 260-263.
4. Гольцов Е.Н., Куликов Д.Г., Пименов А.О., Рапницкий В.А. Унифицированная реакторная установка «ШЕЛЬФ» для атомных станций малой мощности. // Сб. докл. конференции «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики: МНТК НИКИЭТ 2016» 27 – 30 сентября 2016 г. Т.1. – М.: АО «НИКИЭТ», 2016. – С. 582-586.
5. Драгунов Ю.Г., Шишкин В.А., Гречко Г.И., Гольцов Е.Н. Малая ядерная энергетика: задачи и ответы. // Атомная энергия. – 2011. – Т. 111. – Вып. 5. – С. 293-297. Электронный ресурс: http://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t111-5_2011/g0,56/ (дата доступа 29.03.2022).
6. Алексеев А.И., Гольцов Е.Н., Гречко Г.И., Еремеев Д.В., Лепа В.Н. АСММ «Унитерм» – одно из актуальных направлений развития атомной энергетики. / Сб. докл. конференции «Атомные станции малой мощности: новое направление развития энергетики». – М.: Академ-Принт, 2015. – С. 219.
7. Андреева Л.А., Гольцов Е.Н., Каплиенко А.В. и др. Актуальные задачи развития объектов малой энергетики. АСММ на базе реакторной установки ШЕЛЬФ-М. // Атомная энергия. – 2020. – Т. 129. – № 4. – С. 204-210. Электронный ресурс: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/3585> (дата доступа 29.03.2022).
8. Алексеев Н.И., Большагин С.Н., Гомин Е.А. и др. Статус MCU-5. // ВАНТ. Серия: «Физика ядерных реакторов». – 2011. – Вып. 4. – С. 5-23.
9. Экспертный совет по аттестации программных средств при Ростехнадзоре. Аттестационный паспорт программного средства «FACT-BR» (версия 1.1), № 433 от 27.02.2018.
10. Иванюта А.Н., Ионов А.И., Сахарова Т.Ю. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «IVIS-BR»: № 2021610722 от 01.02.2021.

Поступила в редакцию 01.04.2022 г.

Авторы

Плотников Денис Алексеевич, аспирант

E-mail: pda1995@gmail.com

Лобарев Алексей Леонидович, аспирант

E-mail: lobarev.alexey@gmail.com

Кривошеин Иван Николаевич, заместитель начальника отдела – начальник группы

E-mail: krivoshein@nikiet.ru

Кузнецов Павел Борисович, старший научный сотрудник

E-mail: kuznecov@nikiet.ru

Иванюта Анастасия Николаевна, главный специалист

E-mail: a.ivanyuta@nikiet.ru

A SPATIAL DYNAMIC MODEL OF THE SHELF-M REACTOR FACILITY WITH FUEL AND COOLANT TEMPERATURE FEEDBACKS

I.N. Krivoshein, P.B. Kuznetsov, A.N. Ivanyuta, D.A. Plotnikov, A.L. Lobarev

MEPhI

31 Kashirskoe Shosse, 115409 Moscow, Russia

NIKIET JSC

2/8 Malaya Krasnoselskaya Str., 107140 Moscow, Russia

ABSTRACT

The evolution of nuclear power is inseparably associated with the development of breakthrough solutions in the field of economic development of new territories. A pressing issue in this connection nowadays is generation of power for remote and hard-to-reach areas with decentralized power supply. To resolve this issue, JSC NIKIET is developing a version of the SHELF-M modular water-cooled water-moderated reactor facility for use in small nuclear power plants as a source of power for offshore installations, including in the Arctic coast areas, as well as in localities with practically no power and transport infrastructure. One of the stages in justifying the safety of the reactor facility operation is to investigate the behavior of the reactor in dynamic transient modes at various power levels. To this end, a spatial dynamic model of the reactor has been developed with fuel and coolant temperature feedbacks. The development of a dynamic model is a complex process that includes both preparation of constants for subsequent calculations and formation of the reactor neutronic and thermophysical models. The paper describes the development stages of the SHELF-M reactor spatial dynamic model and the results of coupled neutronic and thermophysical calculations for transients using the developed dynamic model of the reactor. Movement of shim rods in the cold and hot states of the SHELF-M reactor facility is considered as non-steady-state transients modes.

Key words: pressurized water-cooled water-moderated reactor, dynamics, feedbacks, simulation.

REFERENCES

1. Voropay N.I., Saneev B.G., Ivanova I.Yu., Izhubuludin A.K. Comparative Efficiency of Using Small Nuclear Power Reactors in Local Energy Systems in the East of Russia. *Proc. of the Conference «Small Nuclear Power Reactors: a New Direction for Energy Development»*. Moscow. Academ-Print Publ., 2015, p. 59 (in Russian).
2. Pimenov A.O., Kulikov D.G., Vasiliev A.P., Molokanov N.A. Small Nuclear Power Reactors in the Arctic Territories: Issues of Economic Feasibility and Environmental Safety. *Arktika: Ecologiya i Ekonomika*. 2019, No. 2(34), p. 120-128; DOI: <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2019-2-120-128> (in Russian).
3. Goltsov A.E., Molokanov N.A. Assessment of SMRs Competitiveness Based on the SHELF Nuclear Facility for Isolated Territories on the Example of the Republic of Sakha (Yakutiya). In: Scientific and Technical Annual Report NIKIET-2019. Moscow. NIKIET JSC Publ., 2019, p. 260-263 (in Russian).
4. Goltsov E.N., Kulikov D.G., Pimenov A.O., Rapnitsky V.A. SHELF-M Modular Reactor Facility for Small Nuclear Power Plants. *Proc. of the International Scientific and Technical Conference «Innovative Nuclear Power Designs and Technologies (NIKIET-2016)»*. September 27–30, 2016. Vol. 1. Moscow. NIKIET JSC Publ., 2016, pp. 582-586 (in Russian).
5. Dragunov Yu.G., Shishkin V.A., Grechko G.I., Goltsov E.N. Small Nuclear Power: Problems and Answers, *Atomnaya Energiya*. 2011, v. 111, iss. 5, pp. 293-297 Available at:

http://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t111-5_2011/g0,56/ (accessed Mar. 29, 2022) (in Russian).

6. Alekseev A.I., Goltsov E.N., Grechko G.I., Eremeev D.V., Pepa V.N. SMR Uniterm is One of Actual Directions in the Development of Nuclear Energy. *Proc. of the Conference «Small Nuclear Power Reactors: a New Direction for Energy Development»*. Moscow. Academ-Print Publ., 2015, p. 219 (in Russian).
7. Andreeva L.A., Goltsov E.N., Kaplienko A.V., Kudinov V.V., Kulikov D.G., Molokanov N.A., Pimenov A.O. Actual Developmental Problems of Small Energy Installations: SNPP Based on the SHELF-M Reactor Installation. *Atomic Energy*. 2020. v. 129, iss. 4, pp. 201-207; DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-021-00734-7>.
8. Alekseev N.I., Bolshagin S.N., Gomin E.A., Gorodkov S.S., Gurevich M.I., Kalugin M.A., Kulakov A.S., Marin S.V., Novoseltsev A.P., Oleinik D.S., Pryanishnikov A.V., Sukhino-Khomenko E.A., Shkarovsky D.A., Yudkevich M.S. MCU-5 status. *VANT. Ser. Fizika Yadernykh Reaktorov*. 2011, iss. 4, 2011, pp. 5-23 (in Russian).
9. «FACT-BR» (Version 1.1). Certification Passport of the Software No 433 dated 02.27.2018 (in Russian).
10. Ivanyuta A.N., Ionov A.I., Sakharova T.Yu. Certificate of State Registration of the Software «IVIS-BR»: No 2021610722 dated 01.02.2021 (in Russian).

Authors

Plotnikov Denis Alekseevich, PhD Student

E-mail: pda1995@gmail.com

Lobarev Aleksey Leonidovich, PhD Student

E-mail: lobarev.alexey@gmail.com

Krivoshein Ivan Nikolayevich, Deputy Head of Department – Head of Group

E-mail: krivoshein@nikiet.ru

Kuznetsov Pavel Borisovich, Research Associate

E-mail: kuznecov@nikiet.ru

Ivanyuta Anastasia Nikolayevna, Chief Specialist

E-mail: a.ivanyuta@nikiet.ru