

РАСЧЕТНЫЙ АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПРЕДЕЛЬНОЙ СРЕДНЕРАДИАЛЬНОЙ ЭНТАЛЬПИИ СНУП-ТОПЛИВА В РЕАКТОРЕ ИГР

Белкин А.В., Бурков И.В., Жирнов А.П., Иванюта А.Н., Кузнецов П.Б.,
Рождественский И.М. (АО «НИКИЭТ», Москва, Россия)

Введение

В рамках научно-исследовательской работы по обоснованию технического проекта РУ БРЕСТ-ОД-300 [1] выполнено расчетно-экспериментальное определение предельной среднерадиальной энтальпии (ПСЭ) смешанного нитридного уран-плутониевого (СНУП) топлива [2].

В соответствии с требованиями федеральных норм и правил НП-082 [3] усредненная по поперечному сечению топливной таблетки (среднерадиальная) энтальпия топлива при проектных реактивных авариях должна быть не выше предельного значения, устанавливаемого на основе экспериментальных данных и исключающего разрушение твэлов и ТВС. Эксперименты по определению ПСЭ СНУП топлива проведены в РГП НЯЦ РК на импульсном реакторе ИГР [4] в 2021-2022 гг.

В ходе работы решались следующие задачи: разработка комплексного подхода к анализу экспериментальных данных; разработка нейтронно-физической и теплогидравлической моделей реактора и облучательного устройства (ОУ); валидация расчетных кодов и моделей; расчетно-экспериментальное определение значения ПСЭ.

1. Конструкция облучательного устройства

Для проведения экспериментов специалистами АО «НИКИЭТ» разработано ОУ, конструкция которого позволяет разместить в свинцовой полости один штатный и два инструментированных макета твэлов РУ БРЕСТ-ОД-300 (рис.1). Основные параметры ОУ представлены в таблице 1.

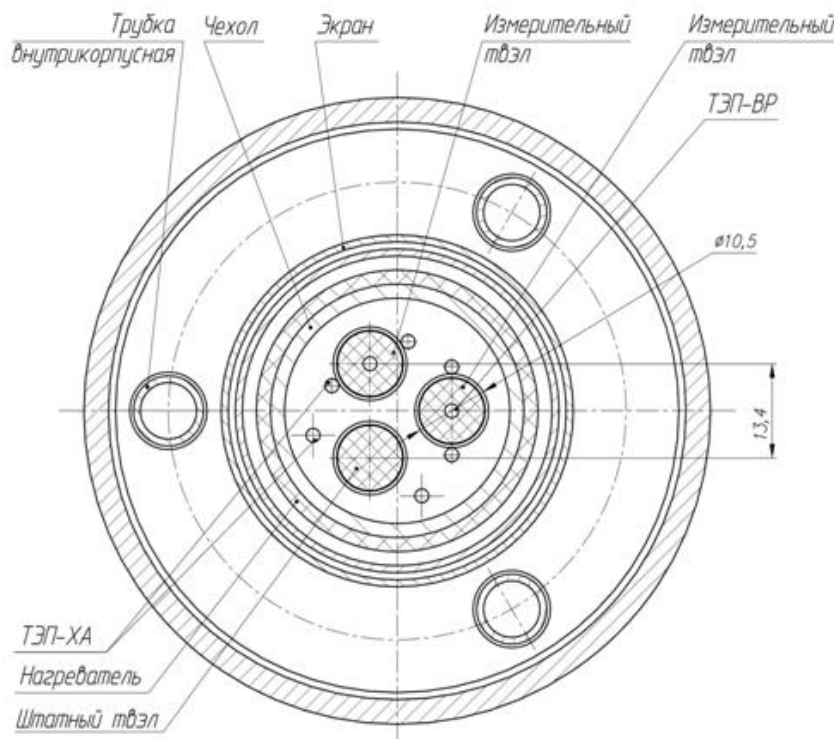


Рис. 1. Поперечное сечение ОУ

Каждый инструментированный макет твэла оснащен датчиком давления (ДД), одним термоэлектрическим преобразователем ТЭП-ВР для измерения температуры топлива в центре топливной таблетки на середине топливного столба, двумя ТЭП-ХА для измерения температуры оболочки на уровне верхнего края и середины топливного столба. На том же уровне две термопары установлены в свинце.

Таблица 1

Основные параметры ОУ и макетов твэлов

Параметр	Значение
Топливо	(U-Pu)N
Плотность топлива, г/см ³	12,3
Диаметр топливной таблетки, мм	9,30±0,05
Диаметр оболочки внутренний/наружный, мм	9,5/10,5
Рабочая среда в макетах твэлов	Гелий
Давление под оболочкой макетов твэлов при н.у., абс., МПа	0,1
Рабочая среда в ампуле	Свинец, аргон
Давление в ампуле при н.у., абс., МПа	0,15
Рабочая среда в ОУ	Азот
Давление в ОУ, абс., МПа, не более	0,4
Основной конструкционный материал ОУ	Сталь 12Х18Н10Т
Конструкционный материал макетов твэлов и деталей ампулы, находящихся в контакте со свинцом	Сталь 16Х12МВСФБР-Ш (ЭП823-Ш)

2. Описание экспериментов

Выполнены три пуска в режиме работы реактора «Вспышка», основные параметры которых представлены на рисунке 2 и в таблице 2. Целостность макетов контролировалась по показаниям ТЭП и ДД в ОУ.

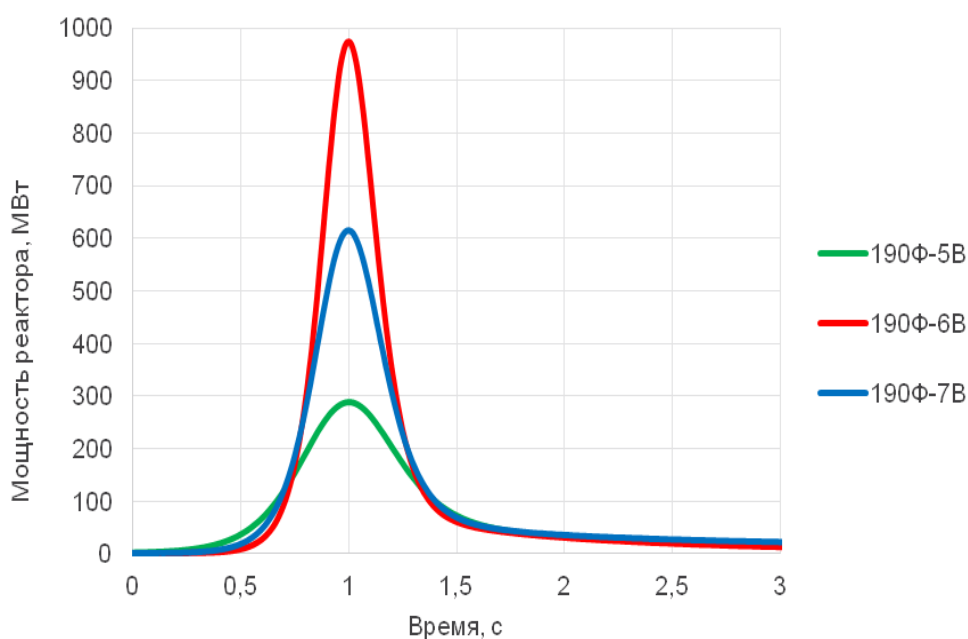


Рис. 2. Мощность реактора в проведенных пусках

Основные параметры пусков

Номер пуска реактора	190Ф-5В	190Ф-6В	190Ф-7В
Номер ОУ	ОУ- 2	ОУ - 3	ОУ - 1
Интегральное энерговыделение в реакторе, МДж	315	389	394
Мощность реактора, макс, МВт	288	974	615
Начальный скачок реактивности, $\beta_{эфф}$	1,9	2,62	2,33
Полуширина вспышки, с	0,6	0,3	0,4
Максимальная температура по показаниям ТЭП, °С			
топлива;	1598	>2400	2281
оболочки	855	1625	1035
свинца	730	1010	985

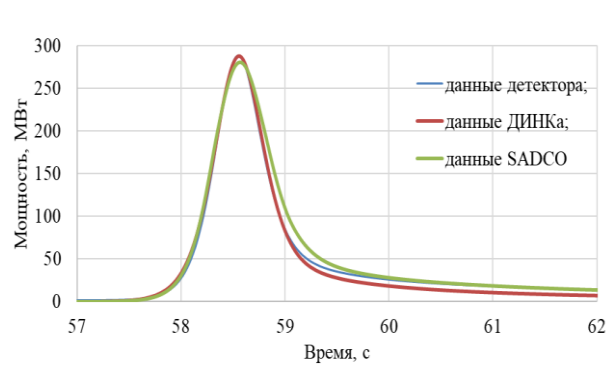
В соответствии с ранее выполненными оценками энерговыделение в штатном макете твэла в экспериментальных пусках 190Ф-5В, 190Ф-6В, 190Ф-7В реализовано на уровне 60–70 %, 100–110 % и 80–90% от расчетной ПСЭ соответственно. В пуске 190Ф-5В признаков разгерметизации твэлов и нарушения барьеров безопасности ОУ не обнаружено. В пуске 190Ф-6В оба ДД продемонстрировали резкое падение давления, что свидетельствует о разгерметизации макетов инструментированных твэлов. Термопары, установленные в центре топливного столба, показали значение выше допустимых и, предположительно, вышли из строя. В пуске 190Ф-7В один ДД из двух показал резкое падение давления (разгерметизация одного макета твэла).

3. Расчетный анализ экспериментов

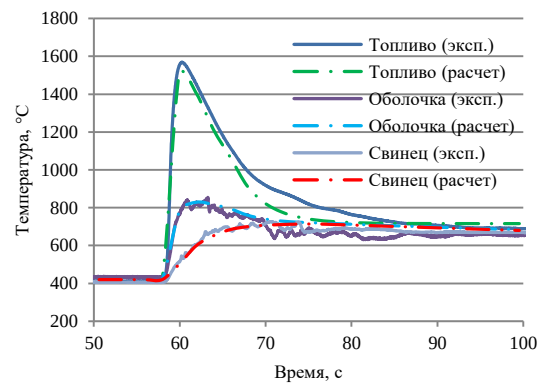
Для подготовки экспериментов и анализа полученных экспериментальных данных использована система нейтронно-физических и теплофизических кодов. Нейтронно-физические расчеты и анализ микроструктуры энерговыделения в элементах ОУ выполнялись с использованием прецизионного программного комплекса MCSU-RBMK [5], трехмерный теплофизический расчет элементов конструкции ОУ выполнен по коду STAR-CCM+ [6], выбор и обоснование параметров пусков производились с использованием программного комплекса SADCO.IGR (на базе SADCO [7]) и программы IVIS-BR [8]. Дополнительно выполнена оценка нейтронно-физических характеристик ИГР и проведено моделирование нестационарных переходных процессов с использованием дифференциально-интегрального нейтронного кода (ДИНК).

В ходе анализа экспериментов проведены комплексные исследования, результатами которых стали: определение нейтронно-физических характеристик пусков; анализ микроструктуры энерговыделения; расчет температурных полей в ОУ; сравнение данных по активности мониторов; оценка значения ПСЭ; верификация программ.

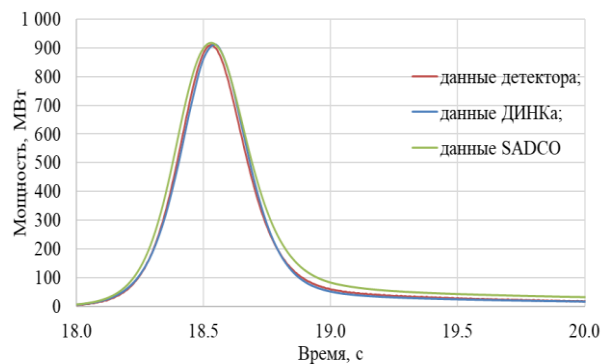
Изменение мощности реактора, полученное по показаниям датчиков и в результате расчетного моделирования, представлено на рисунках 3 (а, в, г). На рисунках 3 (б, г, д) представлены показания термопар в топливе, оболочках и свинце в ОУ, а также результаты расчетного моделирования, полученные при помощи кода IVIS.



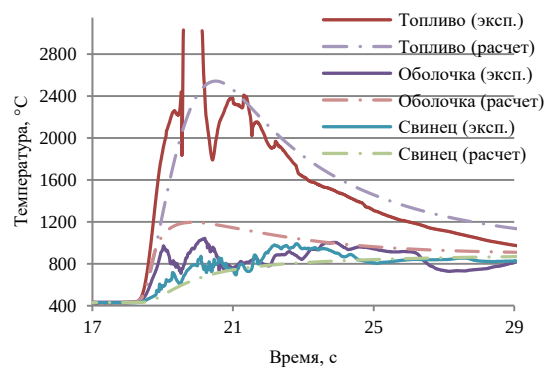
a



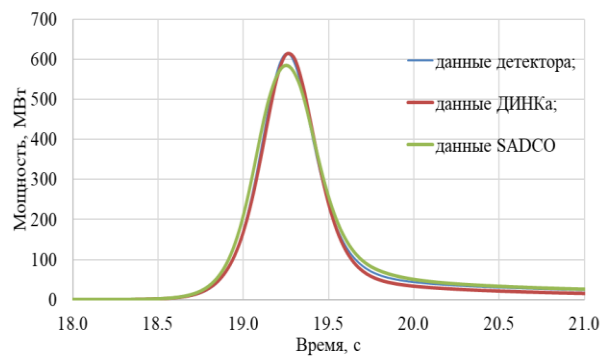
б



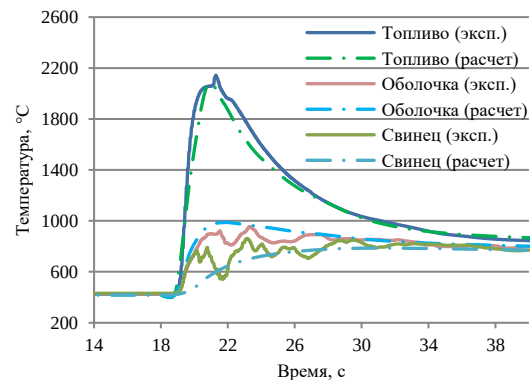
в



г



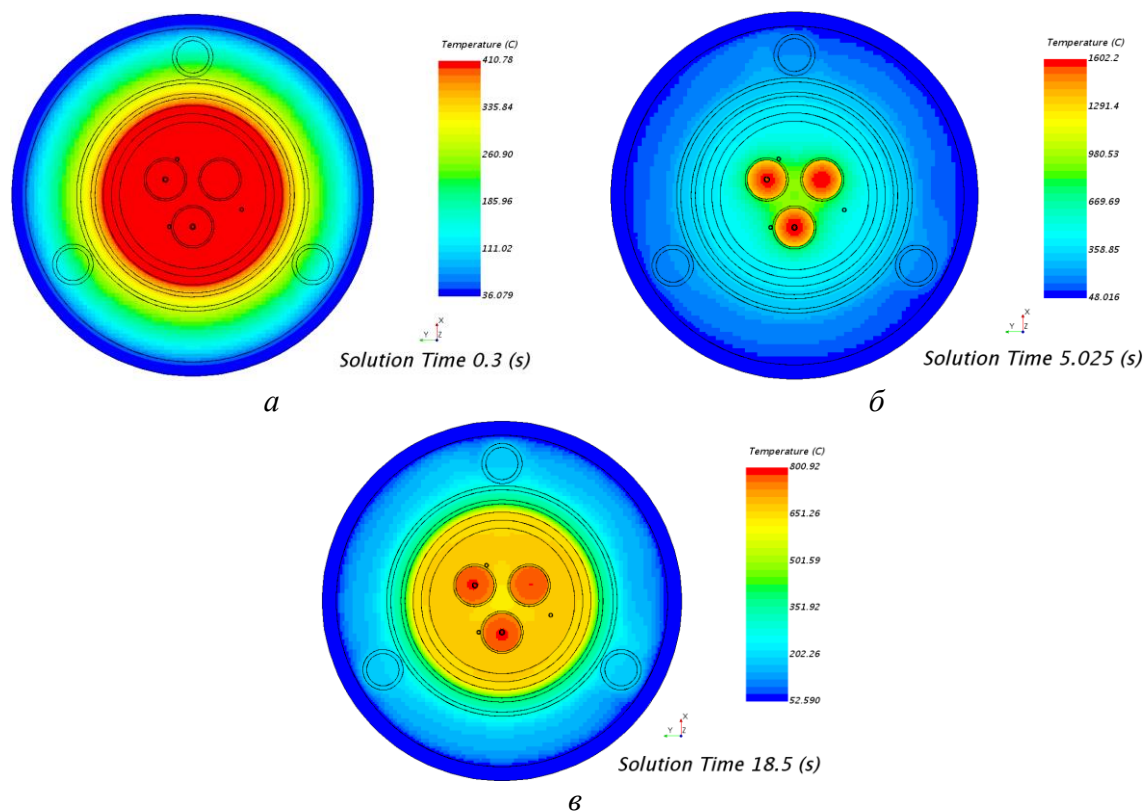
д



е

*Рис. 3. Изменение мощности реактора и температуры в ОУ:
а, б – пуск 190Ф-5В; в, г – пуск 190Ф-6В; д, е – пуск 190Ф-7В*

На рисунке 4 представлен результат расчетного моделирования трехмерного поля температур в ОУ в различные моменты времени в пуске 190Ф-5В при помощи CFD-кода STAR-CCM+.



а – время 0,3 с; б – время 5,025 с; в – время 18,5 с
 Рис. 4. Поле температур в сечении установки нижних ТЭП в пуске 190Ф-5В в различные моменты времени

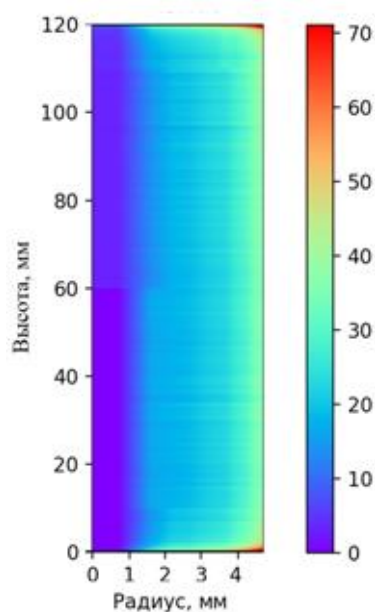
Анализ показывает, что нейтронно-физическая и теплогидравлическая модели находятся в удовлетворительном согласии с экспериментом. Среднеквадратическое отклонение (СКО) расчетного коэффициента размножения от экспериментальных данных менее 0,05 %. Ввод мгновенной реактивности производится за счет движения групп стержней в соответствии с экспериментом. Для ТЭП-ВР разница максимальных расчетных и экспериментальных показаний, нормированная на подогрев соответствующей ТЭП, не превышает 10 %.

По результатам компьютерного моделирования с использованием ПК MSU-RBMK оценена необходимая для дальнейших расчетов микроструктура энерговыделения (табл. 3), содержащая сведения об энерговыделении в основных элементах ОУ и ИГР. Расчетное распределение удельного объемного энерговыделения в макетах твэлов, пропорциональное распределению среднерадиальной энтальпии, представлено на рисунке 5. Нулевое значение высоты на рисунке соответствует верхней части твэла.

Таблица 3

Энерговыведение на 1 МВт интегральной мощности ИГР

Элемент	Энерговыведение (W), Вт
Топливная композиция:	
– макет твэла штатный;	211,23
– макет твэла инструментированный 1;	207,61
– макет твэла инструментированный 2	208,19
Оболочка (сталь ЭП-823Ш):	
– макет твэла штатный;	0,64
– макет твэла инструментированный 1;	0,62
– макет твэла инструментированный 2	0,63
Свинец	72,38
Чехол	15,01
Нагреватель	5,63
Чехол фильтра	24,30
Корпус ОУ	91,37
Лайнер	276,59
Ампула WF	1961,26



Вт/куб.м.

а



б

Рис. 5. Распределение удельного объемного энерговыведения и энтальпии по данным детектора

В ходе анализа экспериментальных данных выполнено сравнение показаний установленных в ампуле урановых мониторов с расчетными оценками, полученными с использованием прецизионной модели по коду ПК MCU-RBMK. Результаты сравнения представлены в таблице 4.

Таблица 4

Удельное энерговыделение в мониторах

Номер пуска	MCU, удельное энерговыделение в мониторе (по делениям), Дж/г (UO ₂)	Эксперимент, Дж/г(UO ₂)	Погрешность MCU, %
190Ф-6В	64,77	62,00	4,47
190Ф-7В	65,61	68,00	–3,51

В ходе ПРИ проведено гамма-сканирование макетов твэлов коллиматором 10 мм, временем набора спектра в каждой точке 30 мин и шагом по длине 5 мм. По результатам гамма-сканирования макетов оценена средняя скорость счета гамма-излучения радионуклидов ¹⁰³Ru и ⁹⁵Zr с использованием ПК MCU-RBMK на дату проведения исследований. Соответствующие оценки представлены в таблице 5. Получено удовлетворительное согласие расчета с экспериментом, максимальное отклонение от результатов гамма-сканирования не превышает 15 % за исключением облученного ядерного топлива ОУ-1, где, предположительно, присутствует значительная инструментальная погрешность.

Таблица 5

**Средняя скорость счета гамма-излучения радионуклидов ¹⁰³Ru и ⁹⁵Zr
на участке топливного сердечника**

Макет	Дата сканирования	Скорость счета, имп./с			
		Измерение		Расчет	
		¹⁰³ Ru	⁹⁵ Zr	¹⁰³ Ru	⁹⁵ Zr
ОУ-1					
Штатный	27.01.22	0,105 ± 0,019	0,083 ± 0,013	0.273	0.192
Инструм. 1	25.01.22	0,105 ± 0,020	0,086 ± 0,014	0.274	0.193
Инструм. 2	19.01.22	0,081 ± 0,018	0,081 ± 0,013	0.277	0.195
ОУ-2					
Штатный	26.01.22	1,063 ± 0,062	0,481 ± 0,038	1,170	0,590
Инструм. 1	20.01.22	1,121 ± 0,068	0,511 ± 0,038	1,173	0,592
Инструм. 2	24.01.22	1,336 ± 0,085	0,560 ± 0,043	1,187	0,599
ОУ-3					
Штатный	26.01.22	0,510 ± 0,040	0,218 ± 0,026	0,567	0,273
Инструм. 1	20.01.22	0,637 ± 0,048	0,247 ± 0,028	0,576	0,277
Инструм. 2	24.01.22	0,581 ± 0,044	0,230 ± 0,026	0,569	0,274

4. Определение предельной среднерадиальной энтальпии топлива

ПСЭ оценена для наиболее «нагруженного» макета штатного твэла с учетом аксиальной неравномерности поля энерговыделения и характеристик содержащегося в нем ядерного топлива, а также представленных результатов ПРИ.

Принимая во внимание результаты ПРИ, согласно которым во время пуска 190Ф-5В оболочки всех макетов сохранили свою целостность, в то время как в пусках 190Ф-6В и 190Ф-7В произошло нарушение герметичности с разрушением и локализованным в верхней половине твэла плавлением отдельных макетов, предлагается принимать удельное значение энтальпии, соответствующее максимальному в верхней торцевой таблетке (табл. 6) и равное 167 калориям на грамм ядерного топлива, за предельную среднерадиальную энтальпию.

Таблица 6

**Расчетная среднерадиальная энтальпия в слое с максимальным энерговыделением
толщиной 1 мм в крайней верхней таблетке**

Наименование пуска	Энтальпия, кал/гр _{топ}	
	Эксперимент	Расчет
190Ф-5В	167	169
190Ф-6В	268	268
190Ф-7В	234	231

Значение ПСЭ свежего СНУП топлива, при котором ТВЭЛы сохраняют целостность и работоспособность, можно считать обоснованным вплоть до выгорания СНУП топлива в 3 % т.а., т.к. до этого значения оставшийся зазор между топливом и оболочкой не может быть исчерпан соответствующим температурным расширением и, следовательно, механизм разрушения ТВЭЛОВ сохранится неизменным.

Выводы

В результате проведенных комплексных исследований, включающих обработку экспериментальных данных и моделирование динамики изменения мощности в пусках, с применением различного программного обеспечения и различных подходов для определения искомой величины спрогнозировано нахождение значения ПСЭ в интервале мощности ИГР от 400 и до 800 МВт. С учетом результатов ПРИ принято решение об использовании в качестве ПСЭ значения, равного 167 калорий на грамм ядерного СНУП топлива.

Достигнутый уровень сходства расчетных значений с экспериментальными данными указывают на высокую точность описания реактора ИГР и ОУ в моделях, а также указывает на правильность использованных расчетных методов, что позволяет рекомендовать описанный комплекс программ для использования в подобных расчетах.

Список литературы

1. Е.О. Адамов и др. Быстрый реактор со свинцовым теплоносителем Брест: от концепции к реализации технологии. Атомная энергия, Т. 129, Вып. 4, 2020.
2. А.Ф. Грачев и др. Исследования смешанного нитридного уран-плутониевого топлива в рамках проекта "ПРОРЫВ". Атомная энергия, Т. 122, Вып. 3, 2017.
3. НП-082-07. Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций.
4. Batyrbekov Erlan, Vityuk Vladimir, Vurim Alexander and Vityuk Galina, Experimental Opportunities and Main Results of the Impulse Graphite Reactor Use for Research in Safety Area. Annals of Nuclear Energy, Volume 182, March 2023, 109582.
5. Ростехнадзор. Аттестационный паспорт ПС МСU-RBMK с банком данных MDB650 (с каналом подготовки исходных данных GENIFER). Регистрационный номер 431. М. 2018.
6. Siemens PLM Software Inc. STAR-CCM+® User Guide, ver. 12.06, 2017.
7. Ростехнадзор. Аттестационный паспорт программного средства SADCO (версия 10.1). Регистрационный номер 436, 2018.
8. А.П Жирнов, А.Н. Иванюта, А.И. Ионов, Т.Ю Сахарова. Верификация программного средства IVIS для инженерных расчетов реакторов со свинцовым теплоносителем. Научно-технический годовой отчет НИКИЭТ – 2021, 2021