МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН
Республиканское государственное предприятие на праве хозяйственного ведения
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЯДЕРНЫЙ ЦЕНТР РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН»
Филиал «Институт атомной энергии»
(Филиал ИАЭ РГП НЯЦ РК)

УДК 621.039.4

Жунусова Анар Семейбаевна

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ НАТРИЕВОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ПРИ ЕГО КИПЕНИИ В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ УСТРОЙСТВЕ

Работа, представленная на конференцию-конкурс НИОКР
молодых ученых и специалистов
Национального ядерного центра Республики Казахстан

(прикладные исследования)

Руководитель: Сураев А.С.,
Научный сотрудник лаборатории теплофизических
и нейтронно-физических характеристик
облучательных устройств,
Филиал «Институт атомной энергии»

г. Курчатов, 2020 г.

АВТОР

Жунусова Анар Семейбаевна

Инженер лаборатории теплофизических и нейтронно-физических характеристик облучательных устройств
Филиала «Институт атомной энергии» РГП «НЯЦ РК».
1987 года рождения,
образование высшее (окончила СГПИ в 2009 году и СГУ имени Шакарима в 2019 году),
специальность – «Физика» и «Техническая физика»,
квалификация по диплому – магистр технических наук,
работает в Филиале «ИАЭ» РГП «НЯЦ РК» с 2019 г.,
общий стаж работы – 7 мес.

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Инженер лаборатории 222	10.04.2020 подпись, дата	А.С. Жунусова
Научный сотрудник лаборатории 222	10.04.2020 подпись, дата	А.С. Сураев
Начальник лаборатории 222	10.04.2020 подпись, дата	Р.А. Иркимбеков

ЖУНУСОВА А.С.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ НАТРИЕВОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ПРИ ЕГО КИПЕНИИ В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ УСТРОЙСТВЕ

Работа, представляемая на конференцию-конкурс НИОКРмолодых ученых и специалистов Национального ядерного центра Республики Казахстан
от Филиала «ИАЭ» РГП «НЯЦ РК»
071100, г. Курчатов, ул. Красноармейская, 10,
тел. (7-722-51) 3-41-25
факс (7-722-51) 3-31-25
e-mail: zhunusova@nnc.kz

РЕФЕРАТ

Работа содержит 23 страницы, 13 рисунков,4 таблицы,8 источников, 1 приложение.

АВАРИЙНЫЙ РЕЖИМ, КИПЕНИЕ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ, ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ, ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ, ФАЗОВЫЙ ПЕРЕХОД, ТЕМПЕРАТРУНОЕ ПОЛЕ

Объектом исследования являются теплофизические процессы, происходящие в экспериментальном устройстве (ЭУ) при моделировании аварийного режима с кипением теплоносителя.

Цель работы: Исследовать влияние типа входных граничных условий на результаты теплофизического расчета ЭУ в режимах нормальной и аварийной работы.

Задачи исследований:

- подготовить расчетные модели с различными типами граничных условий;
- выполнить теплогидравлический расчет при нормальном режиме работы ЭУ;
- провести теплогидравлический расчет в аварийном режиме работы ЭУ;
- провести сравнительный анализ полученных результатов.

Методика исследования заключается в проведении посредством компьютерного моделирования теплогидравлических процессов с заданием различных типов граничных условий в программном комплексе Ansys Fluent. Для анализа, визуализации и представления результатов, полученных в ходе решения поставленных задач использовалась программа ANSYS CFD-Post.

Актуальность: расчетное сопровождение реакторных испытаний экспериментальных устройств должно проводится с высокой точностью получаемых результатов. Это достигается использованием современного лицензионного программного обеспечения и отработанных методов проведения расчетов. Однако, при проведении исследований в области ядерной безопасности существует ряд специальных задач, решение которых требует особенного подхода. К таким задачам относится случай возникновения фазового перехода (кипения) теплоносителя в аварийном режиме работы ЭУ. Получение достоверных данных при моделировании такого процесса позволит снизить вероятность возникновения запроектных ситуаций при проведении реакторных испытаний, а также повысить значимость выполняемых расчетных исследований.

Научная новизна заключается в совершенствовании расчетных методов путем оптимизации способа задания граничных условий при моделировании кипения теплоносителя.

Практическая ценность оптимизация способа задания граничных условий приводит к получению результатов, максимально приближенных к реальным параметрам теплоносителя в случае его кипения.

Личный вклад автора: подготовка расчетных моделей, проведение теплофизических расчетов, обработка и анализ результатов.

Степень завершенности:

–разработаны расчетные модели с различными типами граничных условий;

–проведены расчеты для нормального и аварийного режима работы ЭУ;

–полученные результаты исследования, показывают при каком условии начинается аварийный режим работы ЭУ. В случае возникновения аварийного режима, когда начинается

интенсивное кипение натрия, практически невозможно предотвратить распространение аварии на весь объем активной зоны и плавление значительной доли топлива. Испарение натрия может привести к интенсивному росту реактивности, характерному для аварийного режима с повышением мощности реактора.

Уровень технических решений: Расчетные исследования экспериментальных устройств являются неотъемлемой частью процесса безопасной подготовки реакторных экспериментов. Имея в распоряжении современное программное обеспечение и высокопроизводительные вычислительные станции исследователи способны проводить расчетные работы с высокой степенью точности и достоверности результатов. Технические решения, которые представлены в данной работе, имеют важное значение для достижения представительных результатов. Полное понимание и использование всех имеющихся возможностей лицензионного программного обеспечения позволят расширить спектр решаемых задач и повысить их качество.

Публикации: в настоящий момент публикаций по теме не имеется

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 6
ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ 7
1 Описание экспериментального устройства SAIGA 7
2 Расчет теплофизических параметров при нормальном режиме работы ЭУ 9
3 Результаты расчета 10
4 Расчет теплофизических параметров при аварийном режиме работы ЭУ 12
4.1 Авария, вызванная снижением перепада давления в ЭУ 13
4.2 Авария, вызванная повышением мощности ЭУ 15
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 18
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ 19
ПРИЛОЖЕНИЕ А 20
ПРИЛОЖЕНИЕ Б 21
ПРИЛОЖЕНИЕ В 22

ВВЕДЕНИЕ

Во время работы реактора на быстрых нейтронах одной из наиболее опасных ситуаций, которая может произойти в активной зоне является кипение натриевого теплоносителя. Данное явление может привести к тяжелой аварии, так как кипение возникает как по всему объему активной зоны, так и в отдельных каналах ТВС. В первом случае кипение может быть обусловлено дисбалансом между уровнем мощности, выделяемой в активной зоне, и установившимся расходом теплоносителя, а во втором – вследствие перераспределения расхода теплоносителя между отдельными каналами.

В рамках исследуемой работы проведена серия расчетов по изучению режимов кипения натриевого теплоносителя в активной зоне реактора на быстрых нейтронах при нормальном и аварийном режимах работы экспериментального устройства (ЭУ). Потеря дополнительной энергии на моделирование фазового перехода задана энтальпией в свойствах материалов. Расчеты проводились в программе ANSYS Fluent, которая позволяет заглянуть внутрь исследуемого теплофизического процесса, используя отдельные системы уравнений для каждого физического процесса. На данном этапе производится поиск таких значений параметров в каждой расчетной ячейке, чтобы вся расчетная зона имела максимально верные уравнения потоков. Итерационными методами программа находит для каждого контрольного объема такие значения параметров потока, при которых все уравнения решаются с достаточной точностью.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

1 Описание экспериментального устройства SAIGA

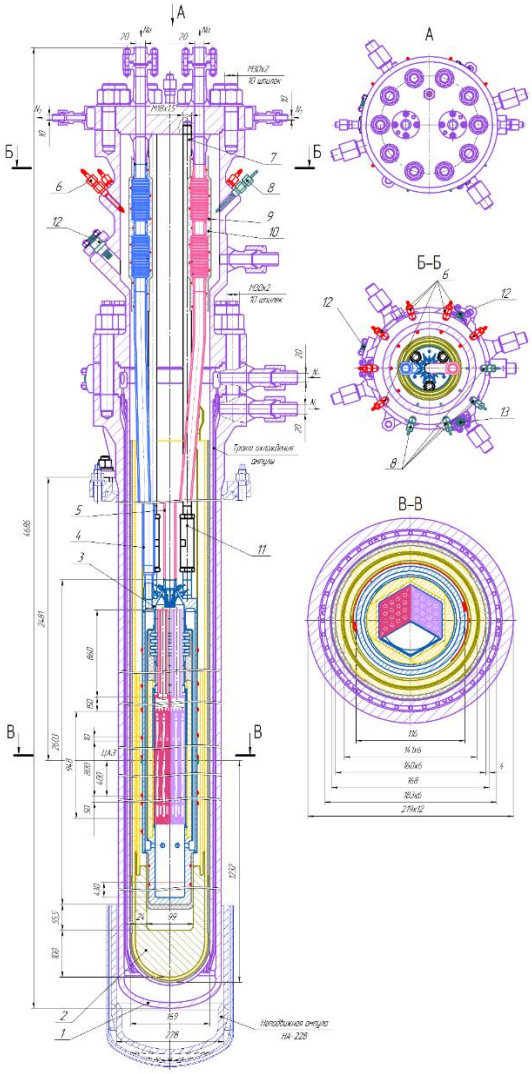
Конструкция ЭУ SAIGA предназначена для проведения серии компьютерных расчетов реактора на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем в режимах нормальной и аварийной работы. Общий вид ЭУ SAIGA показан на рисунке 1. Основными элементами конструкции являются силовой корпус и внутренние элементы [1].

Силовой корпус состоит из следующих основных элементов:

- ампула SAIGA (поз. 1, рисунок 1);
- гермопроходник на 32 контакта (поз. 12, рисунок 1);
- гермопроходник на 12 контактов (3 штуки) (поз. 13, рисунок 1);
- гермопроходник для датчика давления (4 штуки) (поз. 8, рисунок 1);
- токоввод (6 штук) (поз. 6, рисунок 1).

К внутренним элементам относятся:

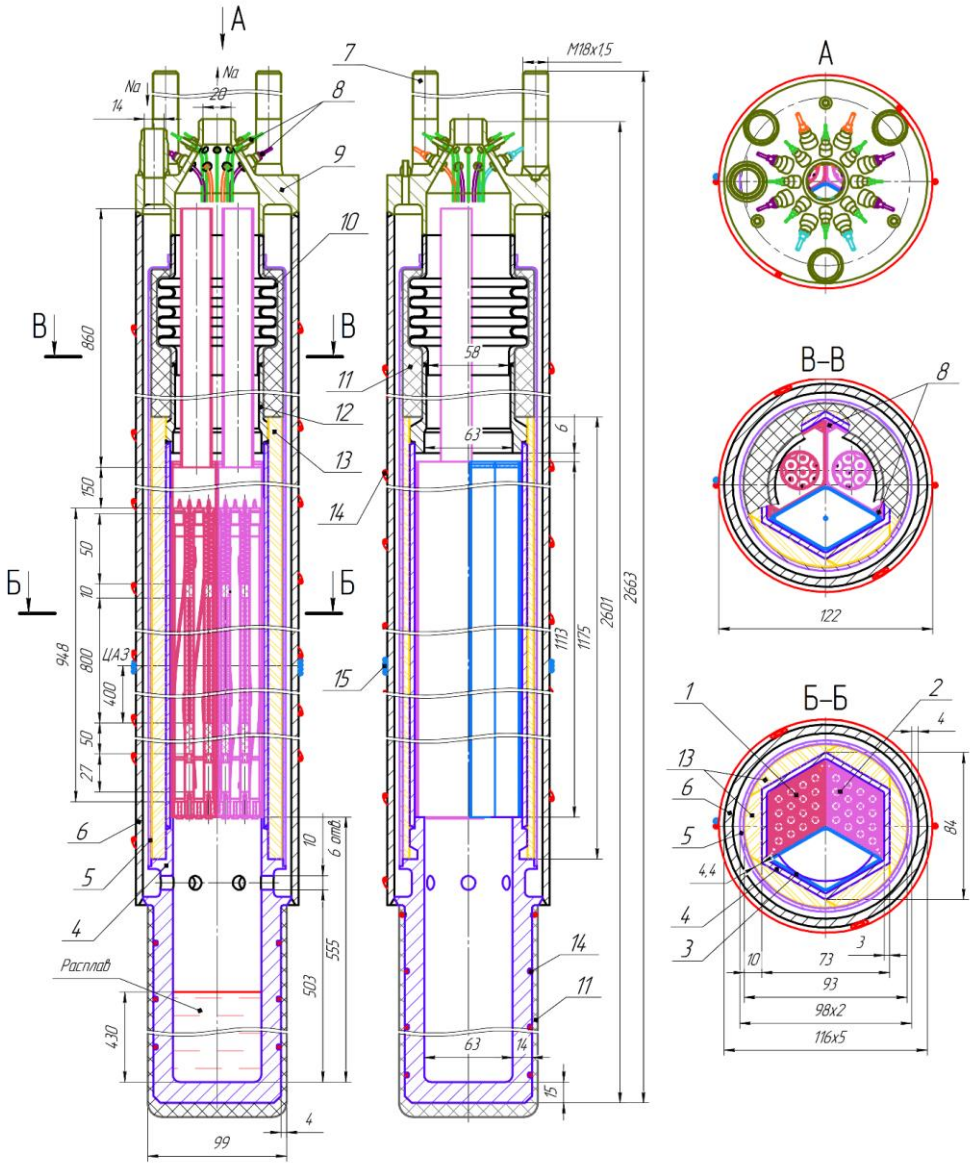
- секция испытательная (поз. 3, рисунок 1);
- ловушка (поз. 2, рисунок 1);
- трубопроводы подачи и отвода натрия (поз. 4, 5, рисунок 1);
- штанга (поз. 7, рисунок 1).



1 – ампула; 2 – ловушка; 3 – секция испытательная; 4 – трубопровод подачи Na; 5 – трубопровод отвода Na; 6 – токоввод; 7 – штанга; 8 – гермопроходник датчика давления; 9 – теплоизоляция; 10 – нагреватель; 11 – талреп; 12, 13 – гермопроходник

Рисунок 1 – Общий вид экспериментального устройства SAIGA

Основным элементом экспериментального устройства SAIGA является секция испытательная (рисунок 2). Секция испытательная предназначена для размещения в ней двух тепловыделяющих сборок (ТВС) и одной камеры Na и организации тракта для прокачки теплоносителя (жидкого натрия) через ТВС в процессе подготовки и проведения эксперимента.



1 – «холодная» ТВС; 2 – «горячая» ТВС; 3 – камера Na; 4 – ловушка кожуха; 5 – кожух; 6 – обечайка наружная; 7 – шпилька; 8 – датчики (термопары, датчики пустот, датчики давления); 9 – крышка; 10 – сильфон; 11 – теплоизоляция; 12 – переходник; 13 – пластина керамическая; 14 – нагреватель; 15 – малогабаритный детектор нейтронов

Рисунок 2 – Секция испытательная

Основными элементами секции испытательной являются ТВС (поз. 1, 2, рисунок 2) и камера Na (поз. 3, рисунок 2). «Холодная» ТВС и «горячая» ТВС идентичны по конструкции, отличие состоит в обогащении активного топлива. Камера Na так же, как и камера ТВС представляет собой ромбовидную камеру с толщиной стенки 1 мм. Сверху камеры находится пластина толщиной 2 мм с минимальным отверстием, позволяющим избежать скопление газов при кипении натрия.

ТВС представляет собой ромбовидную камеру, толщиной стенки 1 мм. В нижней части камеры расположена решетка толщиной 10 мм. В камеру устанавливаются шестнадцать твэлов. В решетке имеются тридцать отверстий ∅2,6 мм, расположенных между твэлами. Данная конструкция решетки позволяет обеспечить перепад давления натрия 0,07 МПа.

2 Расчет теплофизических параметров при нормальном режиме работы ЭУ

Для осуществления нормального режима работы ЭУ необходимо поддерживать контролируемую ядерную реакцию. В связи с чем одним из управляемых параметров который можно регулировать является мощность ЭУ. Для реализации диаграммы мощности (рисунок 3) и запуска расчета использовался UDF-файл, посредством которого осуществляется задание пика мощности на заданной секунде, в результате чего исследование физического процесса приближается к реальным результатам исследования.

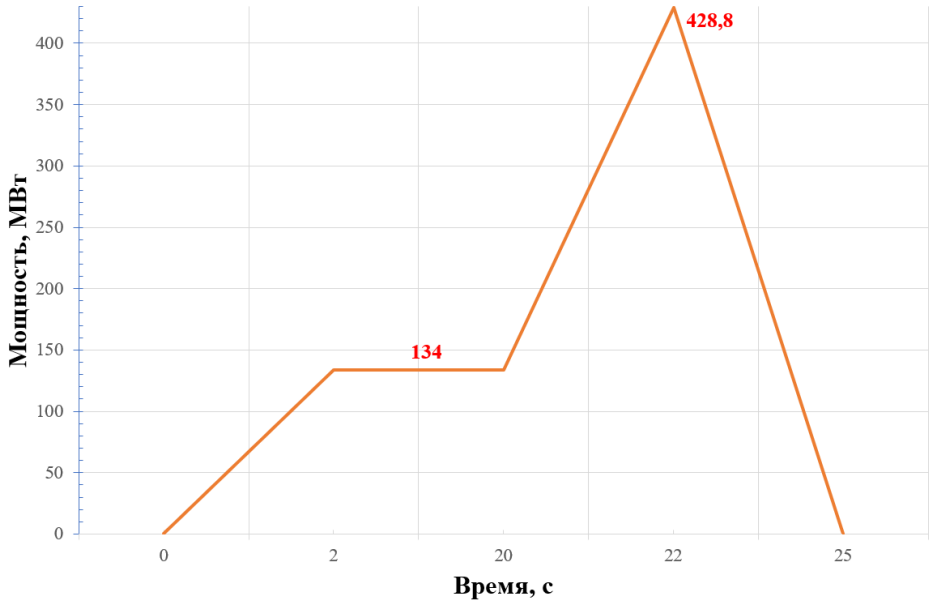


Рисунок 3 – Диаграмма мощности в зависимости от времени для нормального режима работы ЭУ

Постановка задачи и исходные данные

Основные задачи теплогидравлического расчета:

- подготовка расчетной модели с заданием граничным условием перепадом давления;
- провести исследование параметров распределения температурного поля в теплоносителе, топливном столбе, оболочке твэла;
- установить влияние мощности ЭУ на расход, плотность, скорость теплоносителя.

Исходные данные

Определение теплогидравлических параметров ТВС проводилось с использованием трехмерной математической модели, позволяющей произвести расчет необходимых параметров с учетом распределения поля скоростей теплоносителя в испытательной секции экспериментального устройства, соответствующего нужным значениям массового расхода натрия и температуры, а также заданным распределениям мощности в твэлах ТВС [2].

Исходные данные для проведения теплогидравлических расчетов представлены в таблице 1.

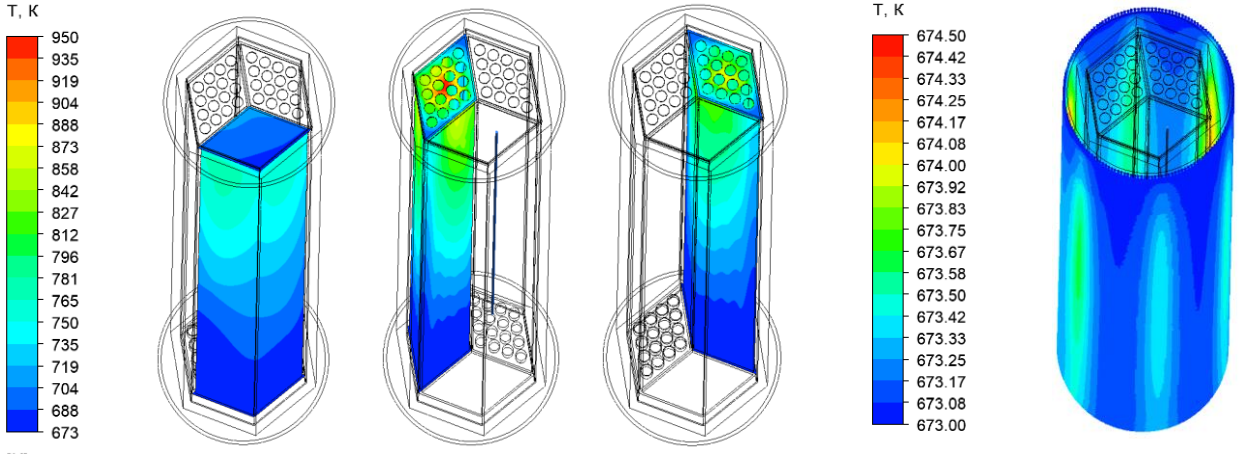
Таблица 1 – Исходные данные

Параметр	Значение
Теплоноситель	натрий
Топливо	UO_2
Наружный диаметр топливной таблетки, мм	5,9±0,2
Внутренний диаметр топливной таблетки, мм	1,5±0,1
Высота топливного столба, мм	850
Температура теплоносителя на входе в испытательную секцию, К	673
Перепад давления, кПа	60
Номинальная мощность, МВт	134
Пиковая мощность, МВт	428,8

Свойства материалов, использованные при проведении расчетов, представлены в приложении А [3, 4, 5, 6, 7]. Теплогидравлические расчеты проводились с помощью программного кода ANSYS Fluent [8].

3 Результаты расчета

Расход натрия через испытательную секцию ЭУ составляет 3.41 кг/с (через «горячую» ТВС– 1,705 кг/с и через «холодную» ТВС– 1,705 кг/с). Температурное поле в теплоносителе в испытательной секции при нестационарном режиме теплообмена представлено на рисунке 4.



а) камера Na б) ТВС «горячая» в) ТВС «холодная» между кожухом и наружной обечайкой ЭУ

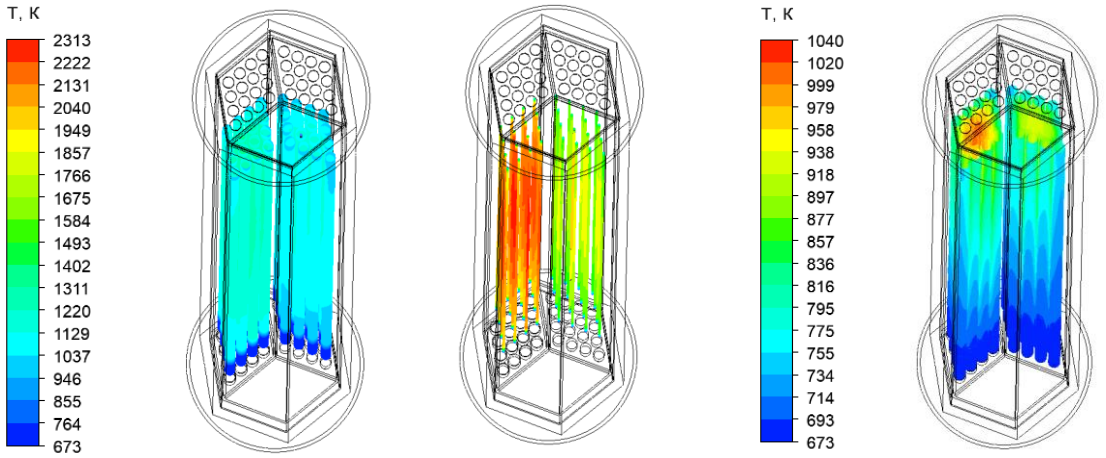
Рисунок 4 – Распределение температуры в теплоносителе при нормальном режиме работы ЭУ

В ТВС наблюдается радиальная неравномерность температуры теплоносителя (рисунок 4). Средняя температура теплоносителя на выходе из «горячей» ТВС составляет ~ 828 К, тогда как градиент температуры в пространстве между твэлами на выходе из ТВС варьируется от 720 К до 956 К. Завышенная средняя температура в «горячей» ТВС (828 К вместо 823 К) обусловлена более высоким энерговыделением в топливе, но не превышает допустимых пределов – 823±5 К.

Средняя температура теплоносителя на выходе из «холодной» ТВС составляет 793 К, при этом максимальная температура на выходе из ТВС в межтвэльном пространстве составляет 897 К, а минимальная 714 К. Однако, средняя температура теплоносителя на выходе из ограничителя потока, находящегося на 0,15 м выше верхних торцов твэлов «горячей»ТВС, составляет 819 К, а на выходе из ограничителя потока над «холодной» ТВС– 787 К.

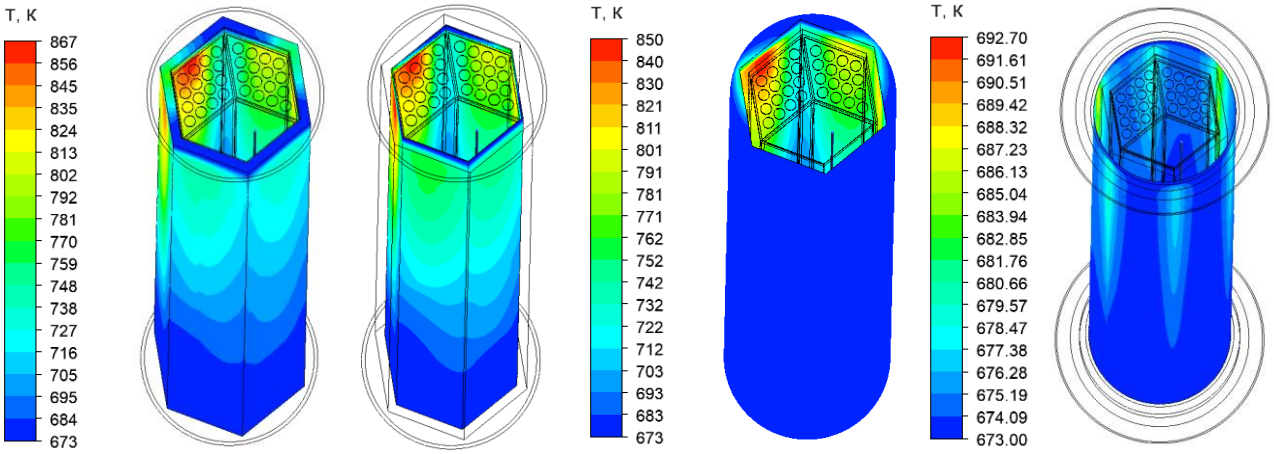
Исходя из распределения температуры, представленном на рисунке 3, видно, что теплоноситель проходя между кожухом и наружной обечайкой экспериментального устройства нагревается на ~0,5-1 К.

Температурное поле в топливе и в материалах испытательной секции и распределение температуры по сечению испытательной секции в области максимального энерговыделения (0,4 м от нижнего торца топливного столба) показаны на рисунках 5 – 6.



а) периферия топливных таблеток б) центр топливных таблеток в) в оболочках твэлов

Рисунок 5 – Распределение температуры в топливе и оболочках твэлов («горячая» ТВС, «холодная» ТВС) при нормальном режиме работы ЭУ



а) внешняя стенка б) внутренняя стенка в) керамическая пластина г) кожух ЭУ

Рисунок 6 – Распределение температуры в шестигранном чехле (а,б), в керамической пластине (в) и кожухе (г) при нормальном режиме работы ЭУ

При реализации заданного энерговыделения температура топливных таблеток на наиболее разогретых участках достигает значения 3092 К. Наиболее разогретым твэлом в «горячей» ТВС является твэл №2, прилегающий к камере натрия, а менее разогретым – твэл № 13. В «холодной» ТВС наиболее разогревается твэл №19, находящийся в центре «холодной»ТВС, а менее разогретым является твэл №29. Распределение температуры по времени в центре таблетки, на периферии таблетки, а также внутренней и наружной стенки оболочки твэла иллюстрируют рисунке 7.

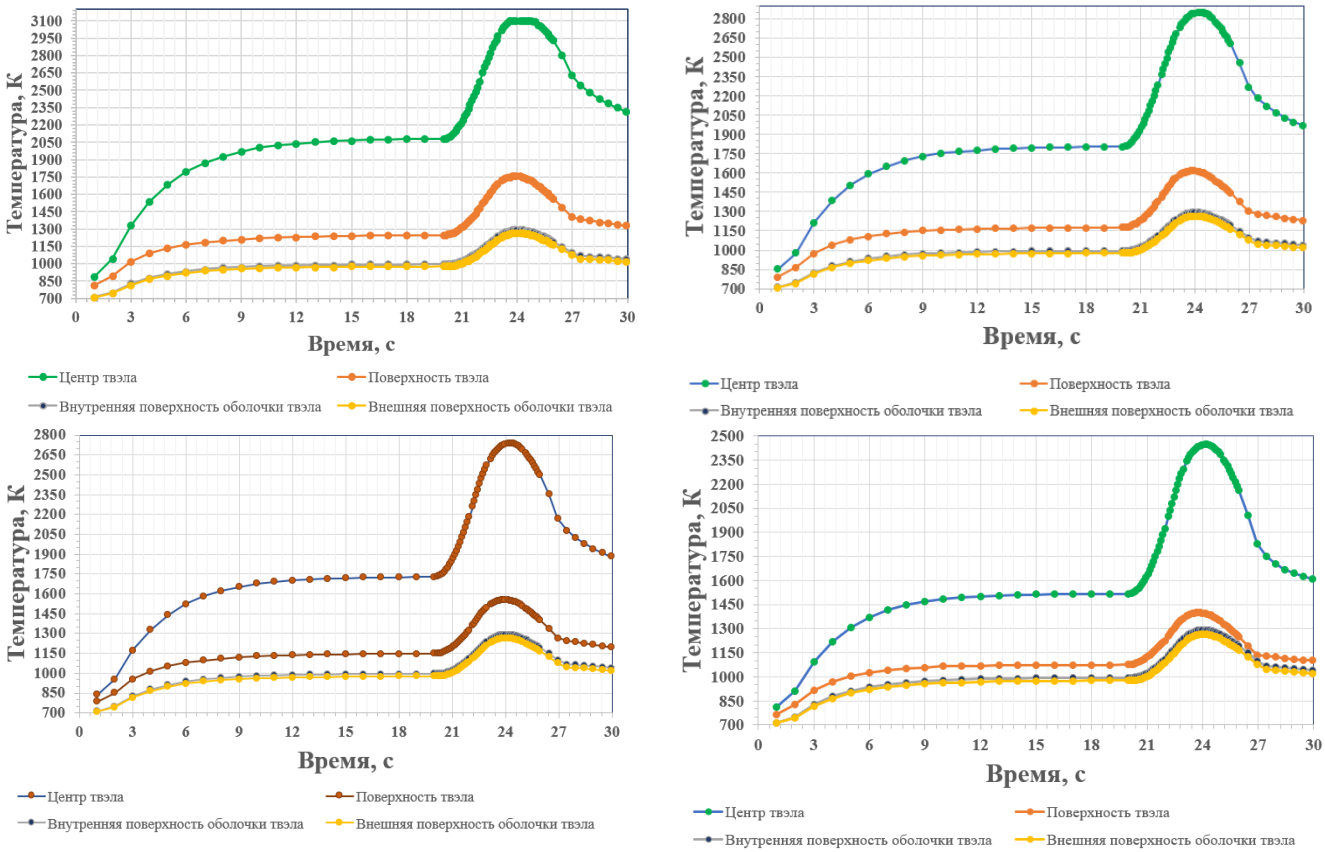
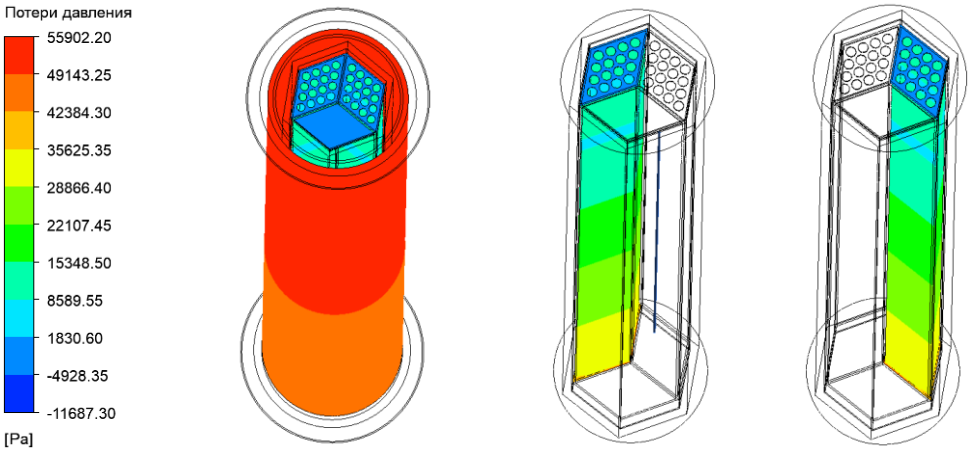


Рисунок 7 – Распределение температуры в центре топливного столба, на периферии таблетки, внутренней и наружной стенки оболочки твэлах № 2, 13, 19 и 29

На рисунке 8 представлены результаты расчета потери давления в теплоносителе в испытательной секции ЭУ.



а) испытательная секция б) «холодная»ТВС в) «горячая»ТВС

Рисунок 8 – Потери давления теплоносителя в испытательной секции ЭУ

4 Расчет теплофизических параметров при аварийном режиме работы ЭУ

В аварийных режимах работы реактора возникают трудности, связанные с работоспособностью твэлов. При повышении температуры в активной зоне, с одной стороны, ухудшаются механические свойства материалов оболочек твэла, а с другой – растет напряжение в результате увеличения давления газообразных продуктов деления и механического взаимодействия топлива и оболочки.

Ниже рассматриваются аварийные режимы, вызванные снижением перепада давления и увеличением мощности ЭУ.

4.1 Авария, вызванная снижением перепада давления в ЭУ

Основные задачи теплогидравлического расчета:

- провести исследование параметров распределения температурного поля в теплоносителе, топливном столбе, оболочке твэла;
- установить влияние перепада давления ЭУ на расход, плотность, скорость теплоносителя.

Таблица 2 – Исходные данные

Параметр	Значение
Теплоноситель	натрий
Топливо	UO_2
Наружный диаметр топливной таблетки, мм	5,9±0,2
Внутренний диаметр топливной таблетки, мм	1,5±0,1
Высота топливного столба, мм	850
Температура теплоносителя, К	1039
Перепад давления, кПа	60
Номинальная мощность, МВт	134
Скорость теплоносителя, м/с	4,112
Плотность теплоносителя, кг/м^3	768,5

Результаты расчета

При реализации заданного перепада давления, температура топливных таблеток на наиболее разогретых участках достигает значения 2371 К. Наиболее разогретым твэлом в «горячей» ТВС является твэл №2 (2371 К), прилегающий к камере натрия, а менее разогретым – твэл № 13 (1850 К). В «холодной» ТВС наиболее разогревается твэл №19 (1784 К), находящийся в центре «холодной» ТВС, а менее разогретым является твэл №29 (1550 К). Распределение температуры по времени расчета в зависимости от снижения давления в ТВС в центре, на периферии топливного столба и оболочках твэлов иллюстрирует рисунок 9.

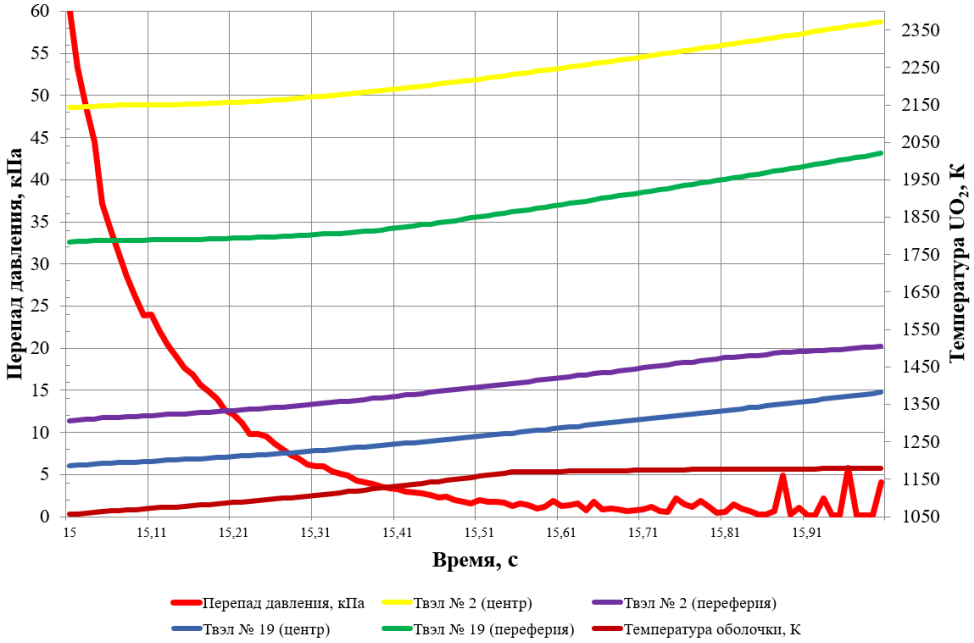


Рисунок 9 – Распределение температуры в центре и на периферии топливного столба в зависимости от давления

На рисунке 10, описывающий график изменения температуры теплоносителя в зависимости от перепада давления в испытательной секции, наблюдается экспоненциальный рост температуры натрия на промежутке времени от 15 до 15,53 секунды возрастает на 112 К, далее рост температуры значительно замедляется и порядка 0,1 секунды составляет 1152К. Максимальная температура полученная в результате расчета составляет 1154 К и наблюдается в интервале времени от 15,9 до 16 секунды. График на рисунке 17 иллюстрирует, резкое падение плотности натрия начиная с 15,59 секунды на 342,8 кк/м^3 с того момента когда перепад давления составил 3 кПа. Также всвязи с уменьшением плотности наблюдается и снижение расхода теплоносителя (рисунок 18) в модели ТВС. И как показывают результаты исследования к 15,44 секунде расход натрия составил 1,995 кг/с, а к концу времени расчета 15,99 секунде составил 0,6351 кг/с. Что показывает о возникновении аварийного режима работы ЭУ. По результатам расчета видно также, что уменьшение перепада давления повлияло и на скорость течения натриевого теплоносителя. Если в начальный момент времени при давлении 60кПа скорость составляет 4,112 м/с, то в конце 15 секунды она составляет 0,9096 м/с.

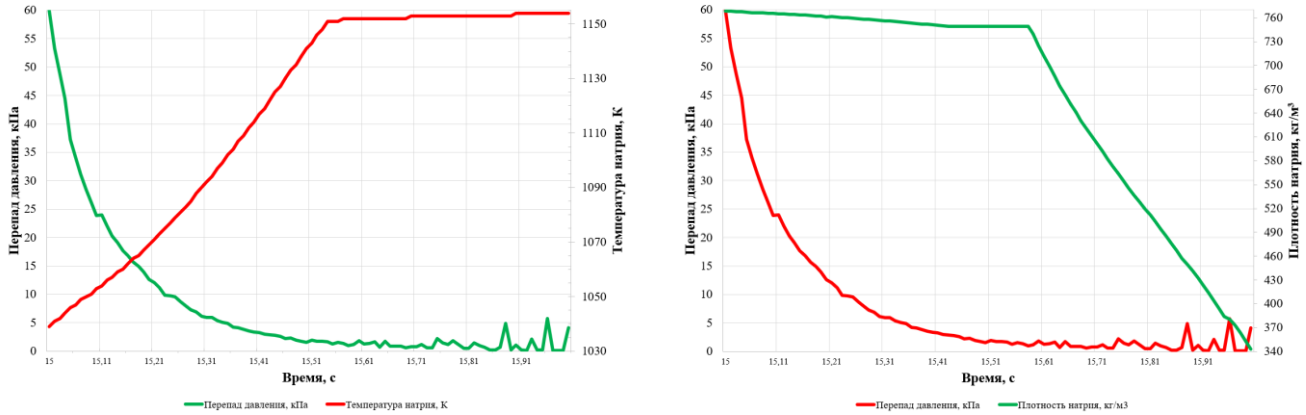


Рисунок 10 – Изменение температуры и плотности теплоносителя в зависимости от перепада давления в испытательной секции по времени

Заметный спад расхода течения натриевого теплоносителя подтверждает возникновение аварийного режима работы ЭУ и снижение плотности натрия на рисунке 11. Ухудшение отвода тепла из активной зоны может привести к перегреву оболочек твэлов и тем самым к их плавлению.

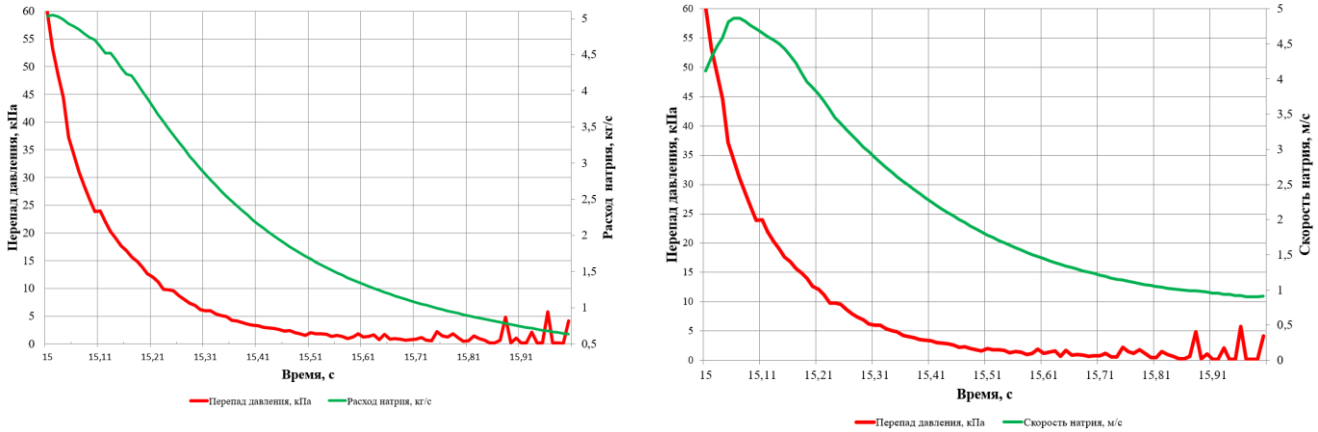


Рисунок 11 – Изменение расхода и скорости течения теплоносителя от потери давления в испытательной секции в зависимости от времени

4.2 Авария, вызванная повышением мощности ЭУ

Основные задачи теплогидравлического расчета:

- провести исследование параметров распределения температурного поля в теплоносителе, топливном столбе, оболочке твэла;
- установить влияние мощности ЭУ на расход, плотность, скорость теплоносителя.

Таблица 3 – Исходные данные

Параметр	Значение
Теплоноситель	натрий
Топливо	UO_2
Наружный диаметр топливной таблетки, мм	5,9±0,2
Внутренний диаметр топливной таблетки, мм	1,5±0,1
Высота топливного столба, мм	850
Температура теплоносителя, К	970,7
Перепад давления, кПа	60
Номинальная мощность, МВт	134
Пиковая мощность, МВт	900
Скорость теплоносителя, м/с	5,5
Плотность теплоносителя, кг/м^3	784,5
Расход теплоносителя, кг/с	5,854

Для реализации диаграммы мощности (рисунок 12) и запуска расчета использовался UDF-файл, посредством которого осуществляется задание пика мощности (990МВт) на 22 секунде, вследствие чего получены результаты исследования теплофизических параметров при выходе реактора в аварийный режим работы.

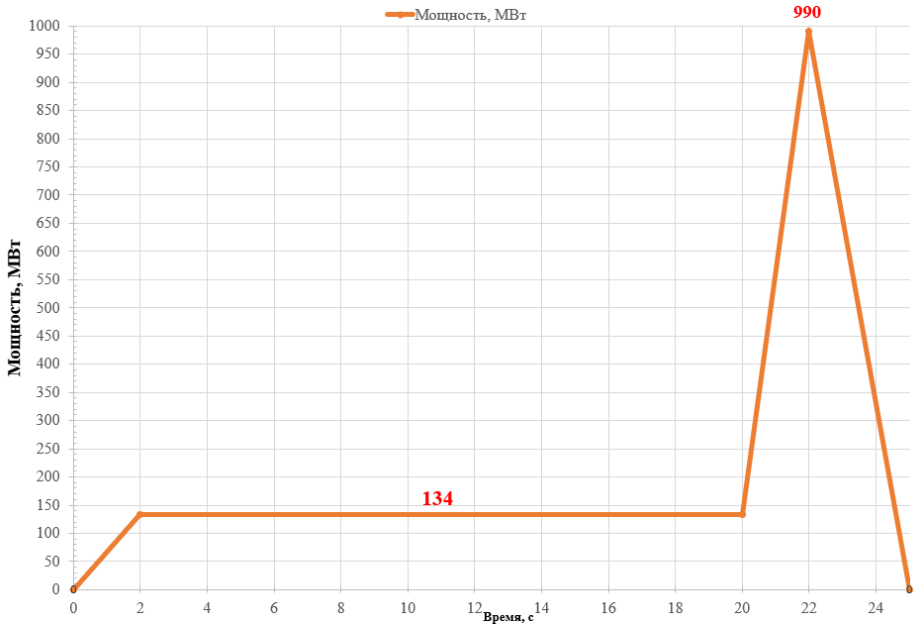


Рисунок 12 – Диаграмма мощности в зависимости от времени при аварийном режиме работы ЭУ

Результаты расчета

Проведенные расчетные исследования показали (рисунок 13, таблица 3), что процесс кипения жидкометаллического теплоносителя в сборке проходит несколько стадий по мере увеличения плотности теплового потока. Сначала наблюдается режим пузырькового кипения, когда образуются мелкие паровые пузырьки, которые не вносят существенных изменений в характер течения теплоносителя по сравнению с нормальным режимом работы (расход сохраняется при значении, соответствующему режиму кипения, характер течения устойчивый, без пульсаций).

Затем наступает снарядный режим, который характеризуется тем, что образуются крупные паровые пузыри через значительные временные интервалы. Частота образования пузырей растет по мере подводимой мощности. Образование в сборке и отрыв крупные пузырей вызывает резкие колебания (пульсации) расхода, в связи, с чем наблюдается также значительные пульсации температур теплоносителя и оболочки твэлов.

С повышением мощности энерговыделения идет постоянное высыхание жидкости, что происходит вследствие испарения и уноса жидкости потоком пара. Происходящий процесс ведет к резкому падению коэффициенту теплоотдачи, подъему температуры оболочек выше нормальной, и расплавлению тепловыделяющих элементов (наступает кризис теплоотдачи).

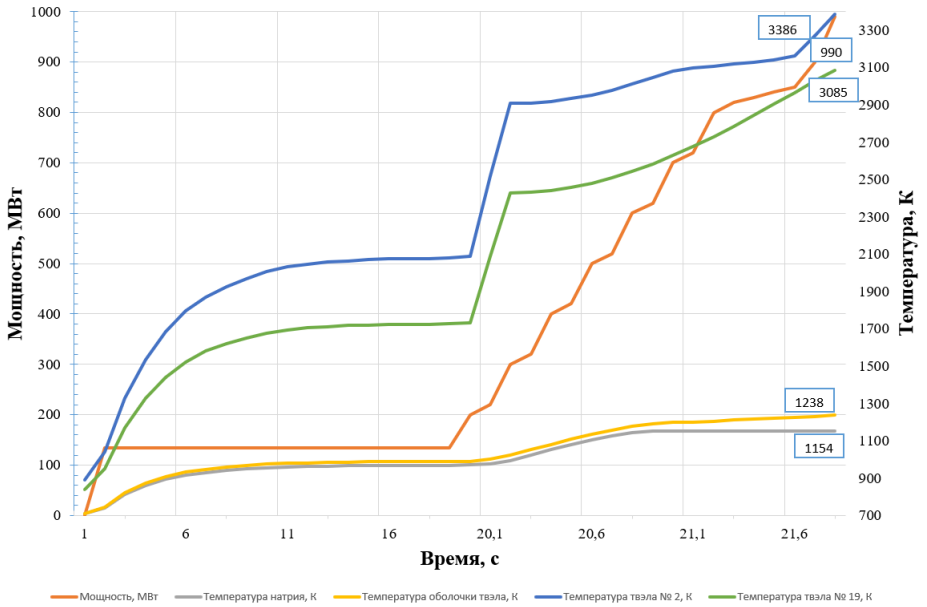


Рисунок 13 – Распределение температурного поля в теплоносителе, твэле № 2и 19 и оболочках ЭУ в зависимости от мощности

Таблица – 4 Результаты расчета аварией, вызванной увеличением мощности

Мощность, МВт	Время, с	Плотность натрия, кг/м^3	Расход натрия, кг/с	Скорость натрия (мах), м/с
134	1	971	6,763	6,556
	2	969	6,763	6,57
	3	969	6,759	6,555
	4	969	6,75	6,557
	5	967	6,743	6,554
	6	967	6,739	6,544
	7	960	6,736	6,539
	8	954	6,734	6,548
	9	925	6,733	6,535
	10	919	6,732	6,554
	11	913	6,73	6,536
	12	900	6,73	6,541
	13	886	6,73	6,54
	14	871	6,729	6,54
	15	856	6,279	6,54
	16	841	6,729	6,54
	17	827	6,279	6,54
	18	812	6,729	6,54

Продолжение таблицы 4

	19	798	6,728	6,54
	20	784,5	5,852	6,539
990	20,1	783,4	5,835	6,538
	20,2	778,9	5,835	6,522
	20,3	772,1	5,829	6,516
	20,4	765,3	5,829	6,516
	20,5	758,8	5,828	6,515
	20,6	752,8	5,823	6,515
	20,7	747,8	5,823	6,514
	20,8	743,8	5,821	6,513
	20,9	743,6	5,817	6,502
	21	653,9	5,81	6,482
	21,1	612,9	5,801	6,467
	21,2	581,4	5,791	6,474
	21,3	550,4	5,777	6,509
	21,4	550,6	5,761	6,549
	21,5	520,8	5,745	6,571
	21,6	490,9	5,724	6,593
	21,7	439,1	5,698	6,635
	21,8	328,7	5,667	6,718
	21,9	297,7	5,666	6,556
	22	302,8	5,554	6,57

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты исследований показали, что кипение жидкометаллического теплоносителя имеет характерные особенности, во многом обусловленные их физическими свойствами (высокая теплопроводность, низкая теплоемкость, высокое поверхностное натяжение), а также низким давлением (различие заключается в объемах паровой и жидкой фаз):

– при осуществлении нормального режима работы ЭУ, результаты исследований показали незначительные отклонения. При реализации диаграммы мощности в первую очередь исследовано температурное поле в теплоносителе, температура натрия не превышала температуру кипения. При данном режиме работы также замечено, что конструкционные материалы сохранили свою целостность, за счет надежного охлаждения твэлов обеспечивался устойчивый режим теплообмена и к плавлению топливо не привело.

Во время исследования аварийного режима работы ЭУ, который проводился для двух вариантов. Первый вариант проведен при условии уменьшения перепада давления в сборке ТВС, а второй вариант заключался в увеличении мощности ЭУ в 7,3 раза:

– температуры теплоносителя на различных участках канала превышали нормальную, топливо в твэлах превысило температуру плавления, а оболочки твэлов заметно приблизились к температуре плавления

– при кипении натрия образуются пузырьки достаточно больших размеров на ограниченном числе центров парообразования;

– основная часть времени образования парового пузыря приходится на период ожидания (прогрев пристенного слоя жидкометаллического теплоносителя);

Испарение натрия может привести к интенсивному росту реактивности, характерному для аварийного режима с повышением мощности реактора. Таким образом, в одной аварии реализуются два условия: ухудшение теплоотвода и недопустимое повышение мощности реактора. Большое значение в этом режиме имеет характер разрушения твэлов, особенно на участках активной зоны, где натрий еще не испарился. Поскольку расход теплоносителя через активную зону значительно меньше номинального, максимальная температура оболочки твэла будет на участке, близком к средней плоскости активной зоны (т. е. на участке максимального теплового потока), следовательно, можно предположить, что разгерметизация оболочек твэлов будет происходить в центре активной зоны. Кроме того, в зависимости от значения натриевого пустотного коэффициента скорость ввода реактивности в этом случае может быть больше, чем в аварии с повышением мощности реактора.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 «Экспериментальное устройство SAIGA для испытаний модельной ТВС реактора ASTRID на реакторе ИГР»/ Техническое задание на разработку эскизного проекта устройства SAIGA № 11-220-02/1695вн от 12.09.2019.

2 Расчет нейтронно-физических характеристик экспериментального устройства SAIGA / Техническая справка №11-220-01/47 вн. от 25.11.2019 г. / А.В. Пахниц, Н.Е. Мухамедов, Р.А. Иркимбеков, Г.А. Витюк, Л.К. Жагипарова.

3 Bobkov, V.P., Fokin, L.R., Petrov, E.E. andal. ThermophysicalPropertiesof Materials For Nuclear Engineering: A Tutorial and Collection of Data. IAEA, VIENNA, 2008. – pp. 24-29, 56-58, 85, 95-97, 164-170.

4 Paul L. Brown. Chemical thermodynamics of zirconium / Paul L. Brown // ASIRC, Monash University, Churchill (Australia). – 2005. – vol. 8, p. 123.

5 Чиркин, В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники / В.С. Чиркин; М. :Атомиздат, 1968. – с. 395.

6 Варгафтик, Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н.Б. Чиркин : М. : Наука, 1972. – с. 525-526, 535, 544-545, 558-561.

7 Thermophysical properties of materials for nuclear engineering: a tutorial and collection of data/ International atomic energy agency. Vienna 2008. p. 28-29, 95-97.

8 ANSYS, Inc. Products Release 14.5.7, 2013.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Теплофизические свойства натрия

T, K	ρ, кг/м^3	C_p, Дж/кг·К	λ, Вт/м·К	μ, кг/м·с, 10^{-4}
280	971	1210	135	
300	967	1230	133	
340	960	1290	127	
366	954	1348,3	123	
$371_{пл}$	933,59	23968,3	113,7	
376	925	1380,8	84,9	6,814
403	919	1370	83,7	5,911
433	913	1358	82,6	5,221
463	907	1347	81,4	4,681
493	900	1336	80,2	4,243
523	893	1325	79	3,885
553	886	1315	77,9	3,587
583	878	1306	76,7	3,333
613	871	1298	75,5	3,120
643	864	1290	74,4	2,936
673	856	1283	73,2	2,772
703	849	1276	72	2,631
733	841	1270	70,80	2,504
763	834	1265	69,7	2,393
793	827	1261	68,5	2,293
823	820	1258	67,3	2,203
853	812	1255	66,1	2,178
883	805	1253	65	2,105
913	798	1252	63,8	1,977
943	791	1251	62,6	1,914
973	784	1252	61,5	1,857
1003	777	1253	60,3	1,803
1033	770	1255	59,09	1,754
1063	763	1257	57,9	1,708
1093	756	1261	56,8	1,665
1123	749	1265	56	1,625
1151	742,4	1269	55	1,588
$1156_{кип}$	0,57757	870269	54,28	2,710
1161	0,28888	2,523	53,91	2,850
1183	0,3411	2,4908	53,2	3,000
1303	0,7593	2,4615	52,5	3,160
1403	1,379	2,1538	44,6	3,236
2000	2,508	2,041	43,08	3,443
4000	2,508	2,041	38	3,462

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Теплофизические свойства диоксида урана

T, K	C_p, Дж/кг·К	T, K	λ, Вт/м·К	ρ, кг/м^3
293	235	298	7,61	10200
373	260	373	6,83	
473	279	523	5,32	
573	290	673	4,74	
673	297	823	4,07	
773	303	973	3,55	
873	307	1123	3,13	
973	311	1273	2,79	
1073	314	1423	2,52	
1173	317	1573	2,32	
1273	320	1723	2,18	
1373	323	1873	2,09	
1423	324	2023	2,06	
1523	328	2173	2,08	
1623	334	2323	2,15	
1723	341	2473	2,26	
1823	350	2623	2,4	
1923	361	2723	2,5	
2023	376	2873	2,87	
2123	395	3100	2,97	
2223	417	3120	2,99	
2323	443	4000	3	
2423	474	5000	4	
2523	508			
2623	547			
2673	568			
2773	612			
2873	660			
2973	711			
3073	766			
$3123_{пл}$	1143			
3173	636			
4000	399			
5000	372			

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Теплофизические свойства стали марки 12Н18N10Т

Т, К	C_p, Дж/кг·К	λ, Вт/м·К	ρ, кг/м^3
293	478	15,1	7900
373	495	16,3	
473	516	17,6	
573	537	18,9	
673	558	20,5	
773	759	21,8	
873	600	23,5	
973	622	24,7	
1073	643	26,4	
1173	664	28,5	
1273	685	31,1	
1373	706	31,3	
1473	727		
1698	676		
$1703_{пл}$	54676		
1708	676		
2000	676		
4000	676		
5000	676	31,3	