

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОХЛАЖДЕНИЯ АКТИВНОЙ ЗОНЫ НА СТАДИИ ПОВТОРНОГО ЗАЛИВА ПРИ АВАРИИ “БОЛЬШАЯ ТЕЧЬ”

© 2025 г. А. Н. Чуркин^а, * А. Г. Каретников^а, М. А. Быков^а, А. С. Богданов^а, Ю. А. Безруков^а

^аАО ОКБ “Гидропресс”, ул. Орджоникидзе, д. 21, г. Подольск, Московская обл., 142103 Россия

*e-mail: churkin.an@mail.ru

Поступила в редакцию 17.09.2024 г.

После доработки 08.11.2024 г.

Принята к публикации 30.11.2024 г.

Представлено описание экспериментальной установки ОКБ “Гидропресс”, предназначенной для изучения теплогидравлических явлений при повторном заливе активной зоны водо-водяного энергетического реактора (ВВЭР) при аварии “большая течь”. Выполненные исследования позволили получить статистически значимый объем экспериментальных данных по изменению во времени температуры оболочек имитаторов твэлов в различных сечениях модели тепловыделяющей сборки (ТВС), что необходимо для валидации расчетных кодов. Эксперименты проводились на двух моделях ТВС с равномерным и неравномерным профилями тепловыделения по высоте. Каждая модель включала в себя 120 обогреваемых имитаторов твэлов, 13 дистанционирующих решеток, 6 имитаторов направляющих каналов, а также имитатор головки ТВС. В ходе экспериментов реализовывалось пять различных способов подачи охлаждающей воды в модель реактора: нижний, нижний гравитационный, верхний, комбинированный, комбинированный гравитационный. Для подтверждения воспроизводимости экспериментов большую их часть повторяли по 3–5 раз. Представлено описание моделей тепловыделяющей сборки, имитаторов твэлов, средств измерения и методики проведения экспериментов. Приведены примеры динамики охлаждения имитаторов твэлов при различных способах подачи охлаждающей воды в модель реактора и отмечены особенности каждого залива. Обобщены результаты по времени залива модели ТВС в виде линейных зависимостей этого параметра от относительной мощности имитаторов твэлов.

Ключевые слова: ВВЭР, авария “большая течь”, системы аварийного охлаждения зоны, повторный залив, экспериментальная установка, модель ТВС, имитатор твэла, время залива

DOI: 10.56304/S0040363624600976

Одной из самых серьезных аварий на атомной электростанции с ВВЭР считается разрыв главного циркуляционного трубопровода (авария “большая течь” – LBLOCA). Она характеризуется быстрым выбросом большого объема теплоносителя I контура из реактора, а также значительными динамическими нагрузками на внутрикорпусные устройства, опоры реактора и трубопроводов. Вследствие уменьшения количества теплоносителя в реакторе происходит ухудшение теплоотвода от активной зоны и оболочки твэлов разогреваются до высокой температуры.

После срабатывания систем аварийного охлаждения зоны (CAOЗ) в определенный момент времени расход теплоносителя в течь становится меньше расхода от CAOЗ, уровень теплоносителя в реакторе повышается и начинается стадия повторного залива активной зоны. Более подробное описание аварии “большая течь” представлено в [1].

В ВВЭР подача теплоносителя CAOЗ осуществляется одновременно в сборную (верхнюю) и напорную (нижнюю) камеры реактора, т.е. происходит комбинированный залив сверху и снизу активной зоны. При этом наблюдается противоток между паром, выходящим из активной зоны, и охлаждающей водой, подаваемой в сборную камеру реактора. Поступление теплоносителя CAOЗ в напорную камеру реактора происходит за счет гидростатического напора, создаваемого столбом жидкости в опускной камере реактора (гравитационный залив). В таких условиях возникают пульсации потока теплоносителя на входе в активную зону.

В соответствии с современными представлениями о процессах, происходящих при повторном заливе, теплоноситель CAOЗ, подаваемый в сборную камеру реактора, преимущественно поступает по наименее нагретым элементам актив-

ной зоны в напорную камеру и участвует в заливе разогретых твэлов снизу.

Процесс повторного залива активной зоны характеризуется движением по поверхности оболочек твэлов фронта охлаждения, под которым происходит интенсивное кипение теплоносителя. При этом температура оболочек твэлов над фронтом снижается, главным образом, за счет захватываемых паром капель жидкости, которые охлаждают оболочку. Более подробно теплогидравлические явления во время повторного залива описаны в [2].

Из-за сложного характера процессов в активной зоне при повторном заливе пока отсутствует возможность обосновать безопасность атомных электростанций при аварии “большая течь” с использованием только результатов расчетного анализа аварии. Необходимы экспериментальное моделирование соответствующих процессов и валидационные расчеты выполненных экспериментов, подтверждающие адекватность расчетного моделирования. Изменения конструкции внутрикорпусных устройств реактора и тепловыделяющих сборок могут заметно повлиять на процесс залива, и поэтому требуются отдельные экспериментальные исследования.

В данной статье приводятся результаты экспериментальных исследований применительно к проекту ВВЭР-1200, выполненных в ОКБ “Гидропресс” в 2019–2020 гг. в рамках инвестиционной деятельности. Целями работ были модернизация экспериментальной установки для обеспечения повторяемости результатов исследований и получение статистически значимого набора экспериментальных данных для валидации расчетного кода КОРСАР [3].

Описания более ранних исследований повторного залива активной зоны легководных реакторов, выполненных как в ОКБ “Гидропресс”, так и в других российских и зарубежных организациях, приведены в [2–7]. Среди российских исследований необходимо выделить программу экспериментальных исследований в Государственном научном центре РФ – Физико-энергетическом институте им. А.И. Лейпунского [8], а также в Электрогорском научно-исследовательском центре по безопасности атомных электростанций [9].

СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

На рис. 1 представлена схема размещения основного оборудования экспериментальной установки ОКБ “Гидропресс”. Главным элементом установки является колонка, состоящая из верхней 3 и нижней 7 частей. Верхняя часть моделирует сборную камеру реактора, а нижняя часть – активную зону. Колонка оснащена фланцевыми

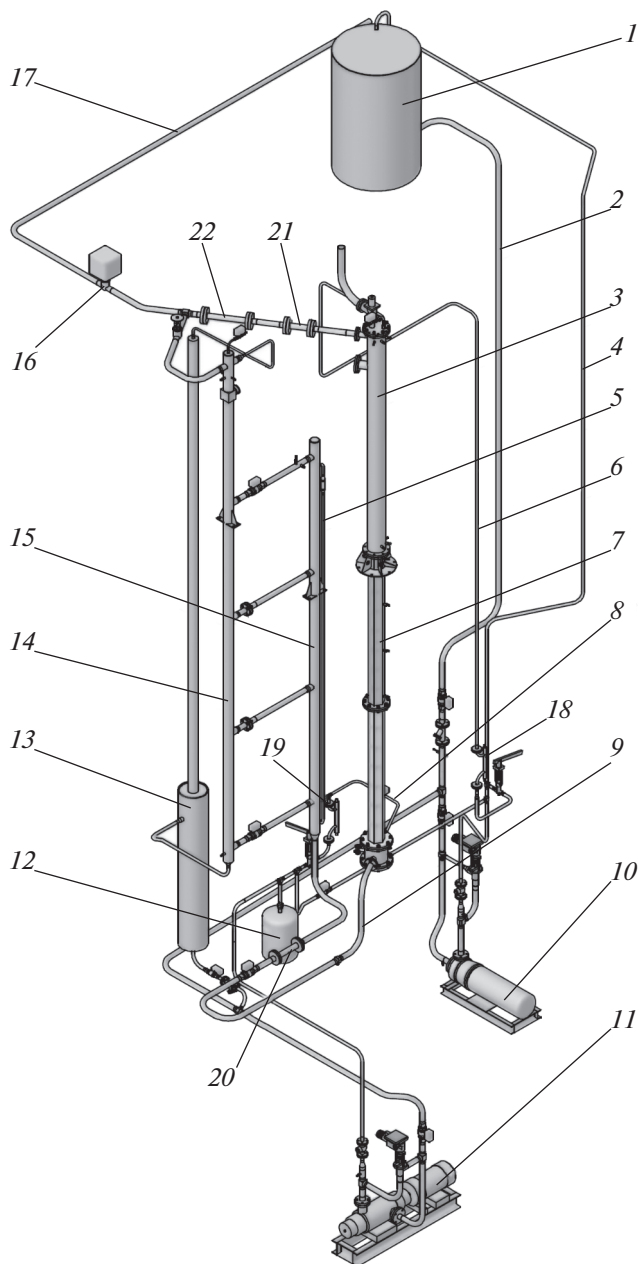


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

1 – питательный бак; 2 – питательный трубопровод; 3, 7 – верхняя и нижняя части экспериментальной колонки; 4 – трубопровод возврата воды в бак; 5, 6, 8 – трубопроводы подачи воды в имитатор опускной камеры, в модель сборной камеры и в подзонное пространство; 9 – перепускной трубопровод; 10, 11 – насосы Н1 и Н2; 12 – расширительный бак; 13 – накопительная емкость коллектора; 14 – сборный коллектор; 15 – имитатор опускной камеры; 16 – выходная паровая задвижка; 17 – выпускной паропровод; 18–21 – расходомер; 22 – влагомер

патрубками подвода и отвода теплоносителя и штуцерами для подключения импульсных линий систем измерений. Наружная поверхность колонки оборудована тепловой изоляцией и электрообогревом.

С помощью вертикальной трубы 15 и перепускного трубопровода 9 имитируются опускная камера реактора и подзонное пространство напорной камеры. Экспериментальная колонка, вертикальная труба и перепускной трубопровод образуют модель реактора. Перепады между высотными отметками верха и низа обогреваемой части модели ТВС, а также между нижними образующими входных и выходных патрубков модели реактора соответствуют натурным условиям.

Сборный коллектор 14 и накопительная емкость 13 являются моделью части объема под защитной оболочкой энергоблока атомной электростанции. Насосы Н1 10 и Н2 11 обеспечивают подачу охлаждающей воды, моделируя насосы САОЗ. Питательный бак 1 объемом 1.5 м³ содержит воду, необходимую для проведения эксперимента.

Благодаря двум насосам и арматуре имеется возможность осуществлять подачу воды в колонку несколькими способами:

нижний залив — прямая подача воды только под модель активной зоны (при этом арматура на перепускном трубопроводе между имитатором опускной камеры и подзонным пространством закрыта);

нижний гравитационный залив — подача только в имитатор опускной камеры реактора;

верхний залив — подача воды только непосредственно в модель сборной камеры реактора;

комбинированный залив — одновременная подача воды в модель сборной камеры реактора и подзонное пространство;

комбинированный гравитационный залив — одновременная подача в модели сборной и опускной камер реактора.

Последний вариант залива подобен заливу на натурном ВВЭР для периферийных ТВС. При комбинированных заливах соотношение расходов в сборную и напорную камеры реакторов соответствовало расчетным проектным значениям на стадии повторного залива.

Расходы от насосов Н1 и Н2 могут регулироваться в широких диапазонах. Расходы воды измеряли расходомерами 18, 19, 20 соответственно на подающих линиях 6, 5 и перепускном трубопроводе между имитатором опускной камеры и подзонным пространством 9.

Образовавшийся в экспериментальной колонке пар выходил из ее верхней части последовательно через расходомер 21, влагомер 22, паровую задвижку 16 и “выбрасывался” в атмосферу через выпускной трубопровод 17. Общее давление в контуре стенда регулировали выходной паровой задвижкой 16.

МОДЕЛЬ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩЕЙ СБОРКИ

Модель активной зоны состоит из модели одной ТВС, представляющей собой пучок из 127 стержней, заключенный в шестигранный кожух. В пучок входят 120 обогреваемых имитаторов твэлов, размещенных по треугольной решетке. В центре пучка расположена центральная трубка и по третьему ряду от центра — шесть имитаторов направляющих каналов. Пучок стержней фиксируется дистанционирующими решетками, которые изготовлены по штатной технологии и расположены в соответствии с координатами дистанционирующих решеток в натурной ТВС с шагом между ними 340 мм (за исключением крайних решеток с меньшим шагом). Конструктивные элементы модели ТВС показаны на рис. 2, а ее внешний вид — на рис. 3. Обогреваемая длина имитаторов твэлов соответствует натурной высоте активной зоны. Масштаб экспериментальной установки по количеству обогреваемых элементов составляет 1 : 424.

В верхней части пучка установлена медная контактная решетка, в которую входят хвостовики имитаторов твэлов, образуя скользящий контакт. Нижние концы имитаторов проходят через нижний фланец и уплотняются в нем с помощью резиновых манжет.

Токовводы расположены в нижних концах имитаторов. При сборке пучка нижние токовводы с помощью пакета медных шин объединяются в две группы для подключения полюсов силового электропитания. Электропитание пучка осуществляется пропусканием постоянного тока по попарно-параллельной схеме через одну половину имитаторов в одну сторону и возвратом его через верхнюю контактную решетку в другую половину имитаторов.

Эксперименты проводили в два этапа с различными моделями имитаторов твэлов. На первом этапе исследования выполняли на имитаторах твэлов (изготовлены в 2003 г.), которые имели косинусоидальный профиль энерговыделения по высоте с коэффициентом неравномерности 1.56. На втором этапе использовали новые имитаторы с равномерным профилем энерговыделения по высоте, изготовленные в ОКБ “Гидропресс”.

Имитаторы твэлов представляют собой трубчатые нагреватели с косвенным внутренним нагревом. Трубка оболочки имитаторов внешним диаметром 9.1 мм и толщиной стенки 0.5 мм изготовлена из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Внутри имитатора расположен электрический нагревательный элемент, представляющий собой витой жгут из шести нихромовых проволок (Х20Н80-Н) диаметром 0.8 мм. Изолятором служит засыпка из периклаза (MgO).

Из 120 имитаторов твэлов с косинусоидальным профилем энерговыделения 18 были осна-

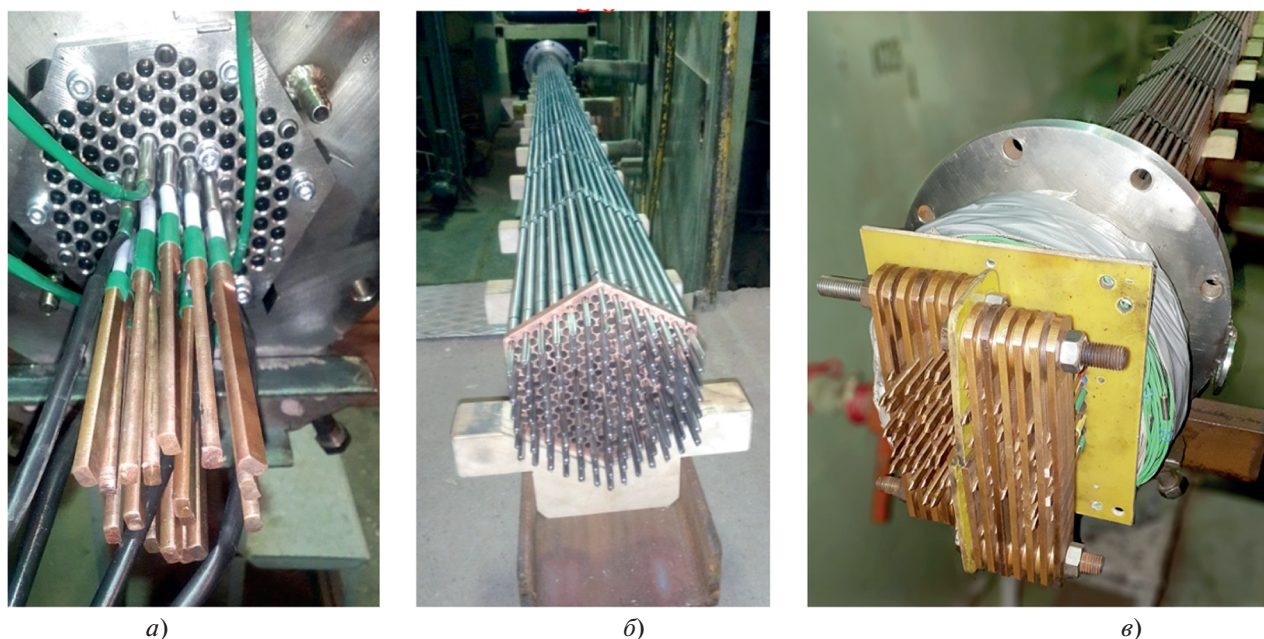


Рис. 2. Конструкция модели ТВС.

а – нижний фланец при сборке пучка твэлов; *б* – верхняя контактная решетка; *в* – нижняя часть пучка с установленными электроконтактными шинами

щены термопарами, измеряющими температуру внутренней поверхности оболочки. Применяемые термопары с изолированным горячим спаем имели подпружиненный механический контакт с внутренней поверхностью оболочки имитатора твэла. В каждом имитаторе размещалось шесть термопар на разных уровнях.

Во всех 120 имитаторах твэлов с равномерным профилем энерговыделения по высоте было установлено по одной термопаре с изолированным горячим спаем. Они, как и в предыдущих имитаторах, имели подпружиненный механический контакт с внутренней поверхностью оболочки имитатора твэла. Имитаторы делились на 12 групп (по 10 имитаторов в каждой группе) в зависимости от координаты заложения горячего спаея термопары. Размещение термопар по высоте имитаторов и самих имитаторов в пучке было таким, чтобы как можно более равномерно исследовать поле температур оболочек по всей модели ТВС. Термопары первых 11 групп (основной объем измерений) были установлены в 11 сечениях, координаты которых находятся вблизи середины пролетов между дистанционирующими решетками в обогреваемой части модели ТВС. Термопары последней, двенадцатой, группы имитаторов твэлов размещались в шести сечениях, расположенных в зоне контакта дистанционирующих решеток с оболочкой имитаторов, одна термопара была расположена на верхней границе обогреваемой части и три технологические термопары – в зоне нижнего фланца.

В модели ТВС были установлены центральная трубка и шесть имитаторов направляющих каналов, которые также были выполнены из трубок. Трубки с обеих сторон заглушены цилиндрическими вставками. В нижней и верхней частях трубок было просверлено по четыре сквозных отверстия для свободного входа теплоносителя внутрь канала и выхода из него.

Три имитатора направляющих каналов оснащены встроенными термопарами диаметром 1 мм для измерения температуры среды в модели ТВС. Горячие спаи термопар были выведены на внешнюю поверхность трубок через сквозные отверстия и выступали не более чем на 1 мм над поверхностью.

Для измерения температуры теплоносителя в модели ТВС и контуре циркуляции использовали хромель-алюмелевые термопары (ТХА, тип К) второго класса допуска в диапазоне от 0 до 400°C. Для измерения температуры внутренней поверхности оболочки имитаторов твэлов применяли термопары ТХА (К) первого класса допуска с погрешностью измерений $\pm 1.5^\circ\text{C}$ в диапазоне от 0 до 375°C, а в диапазоне от 375 до 1100°C с погрешностью $\pm 0.004 t$, где t – температура, °C.

Заметное влияние на поступление в активную зону сверху теплоносителя САОЗ могут оказывать конструктивные элементы над активной зоной, поэтому перед проведением экспериментов конструкция имитатора головки ТВС была изменена по сравнению с первоначальной конструкцией для



Рис. 3. Общий вид собранного пучка модели ТВС

большого подобия натурным условиям. Геометрические размеры элементов имитатора головки ТВС выбирали такими, чтобы сохранить пропорциональные соотношения диаметров, размеров по высоте, степени перфорации относительно штатной головки ТВС. Перед проведением экспериментов была предусмотрена возможность регулировать проходное сечение и коэффициент гидравлического сопротивления имитатора головки.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Перед началом каждого эксперимента выполняли подготовительные операции, после завершения которых экспериментальная колонка оказывалась полностью заполненной насыщенным паром. Только в нижней части подзонного пространства и перепускном трубопроводе оставалось небольшое количество воды. Напряжения электропитания модели ТВС и компенсационного обогрева экспериментальной колонки устанавливались на уровнях, обеспечивающих прогрев стенок колонки до температуры 300°C и максимальную температуру оболочек имитаторов твэлов модели ТВС 400°C . В зависимости от условий эксперимента давление в контуре составляло 0.2 или 0.4 МПа. При достижении заданных программой исследований температуры и давления установку переводили в режим эксперимента, в котором электрическая мощность обогрева колонки устанавливалась такой, чтобы была обеспечена компенсация тепловых потерь, а мощность пучка модели ТВС повышалась до необходимого значения, заданного условиями эксперимента, после чего начинался быстрый разогрев пучка.

Управление регулирующими вентилями и насосами осуществлялось автоматически. При достижении максимальной температуры оболочек имитаторов твэлов 600°C в модель реактора подавалась охлаждающая вода. Во избежание повреждения имитаторов твэлов температура их оболочек ограничивалась значением 800°C , при превышении которой происходило аварийное автоматическое отключение электропитания модели ТВС. Эксперимент прекращали после полного расхолаживания модели ТВС, когда температура оболочек всех имитаторов снижалась до температуры насыщения.

Регистрация параметров эксперимента осуществлялась системой сбора данных с частотой опроса 1 Гц. Автоматическое управление оборудованием экспериментальной установки позволило существенно повысить повторяемость экспериментальных данных и достоверность полученных результатов. В табл. 1 приведены суммарные погрешности измеряемых параметров.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На первом этапе проводились эксперименты с моделью ТВС, пучок которой имел косинусоидальный профиль энерговыделения по высоте. Целями данного этапа были окончательная отладка экспериментальной установки для обеспечения повторяемости экспериментов, устранение недочетов, а также сравнение результатов с ранее

Таблица 1. Относительная погрешность измерений

Параметр	Предел измерения	Погрешность измерения, %
Давление среды, МПа	1.0	0.3
Уровень воды, м	8	0.3
Перепад давления, кПа	160	0.3
Мощность модели ТВС, кВт	800	2.2
Расход воды в перепускном трубопроводе, м ³ /ч	71	1.1
Расход подачи воды в модель реактора, м ³ /ч	8	1.7
Расход пара, м ³ /ч	560	1.1
Влажность пара, %	100	2.8
Температура воды, °С	400	0.6
Температура оболочки имитатора твэлов, °С	1100	0.4

Таблица 2. Основные параметры экспериментов второго этапа, представленных в статье

Тип залива	Мощность пучка, кВт	Время залива, с	Максимальная температура имитаторов твэлов, °С	Расход подачи низ/верх, м ³ /ч
Нижний	282	257	630	2.30/0
Комбинированный	282	335	616	1.65/0.42
Верхний	136	529	709	0/2.29
Нижний гравитационный	143	358	630	2.97/0

выполненными исследованиями [6]. В общей сложности было проведено 43 эксперимента с заливами разных видов при различных мощностях модели ТВС.

Результаты экспериментов с нижним заливом, при котором осуществлялась принудительная подача воды в нижнюю часть колонки, и комбинированным заливом с подачей воды в верхнюю и нижнюю части колонки хорошо согласуются с ранее полученными данными [6]. В этих экспериментах в зависимости от мощности тепловыделения модель ТВС уверенно расхолаживалась в течение 100–250 с, при этом максимальная температура оболочек имитаторов твэлов не поднималась выше 760°С. Время расхолаживания в экспериментах с гравитационным заливом оказалось значительно меньше такового в [6], что обусловлено изменением схемы подключения сборного коллектора со снижением разности давлений между колонкой и напорной камерой реактора при резком вскипании охлаждающей воды на разогретых имитаторах твэлов. В результате уменьшилось количество воды, “выбрасываемой” из имитатора опускной камеры реактора в сборный коллектор (модель защитной оболочки).

Второй этап экспериментов был проведен на модели ТВС с равномерным профилем энерговыделения. Такой простой профиль лучше подходит для анализа явлений в модели ТВС при повторном заливе. Было выполнено 49 экспериментов. В ходе второго этапа в конструкцию экспериментальной установки изменений не вносили. Поэтому именно эта серия экспериментов является основной для валидации расчетных кодов и более подробно представлена в данной статье.

На рис. 4 приведены примеры графиков изменения во времени τ_{\max} максимальных температур имитаторов твэлов в экспериментах с различными способами залива для каждой высотной группы, характеризуемой координатой расположения термопары h , отсчитываемой от верха обогреваемого участка. За нулевой момент времени принято время начала подачи охлаждающей воды в модель реактора. До этого момента идет разогрев модели ТВС в среде насыщенного пара. Основные параметры четырех экспериментов второго этапа, представленных в статье, приведены в табл. 2. Температура подаваемой в модель реактора воды была равна примерно 77°С.

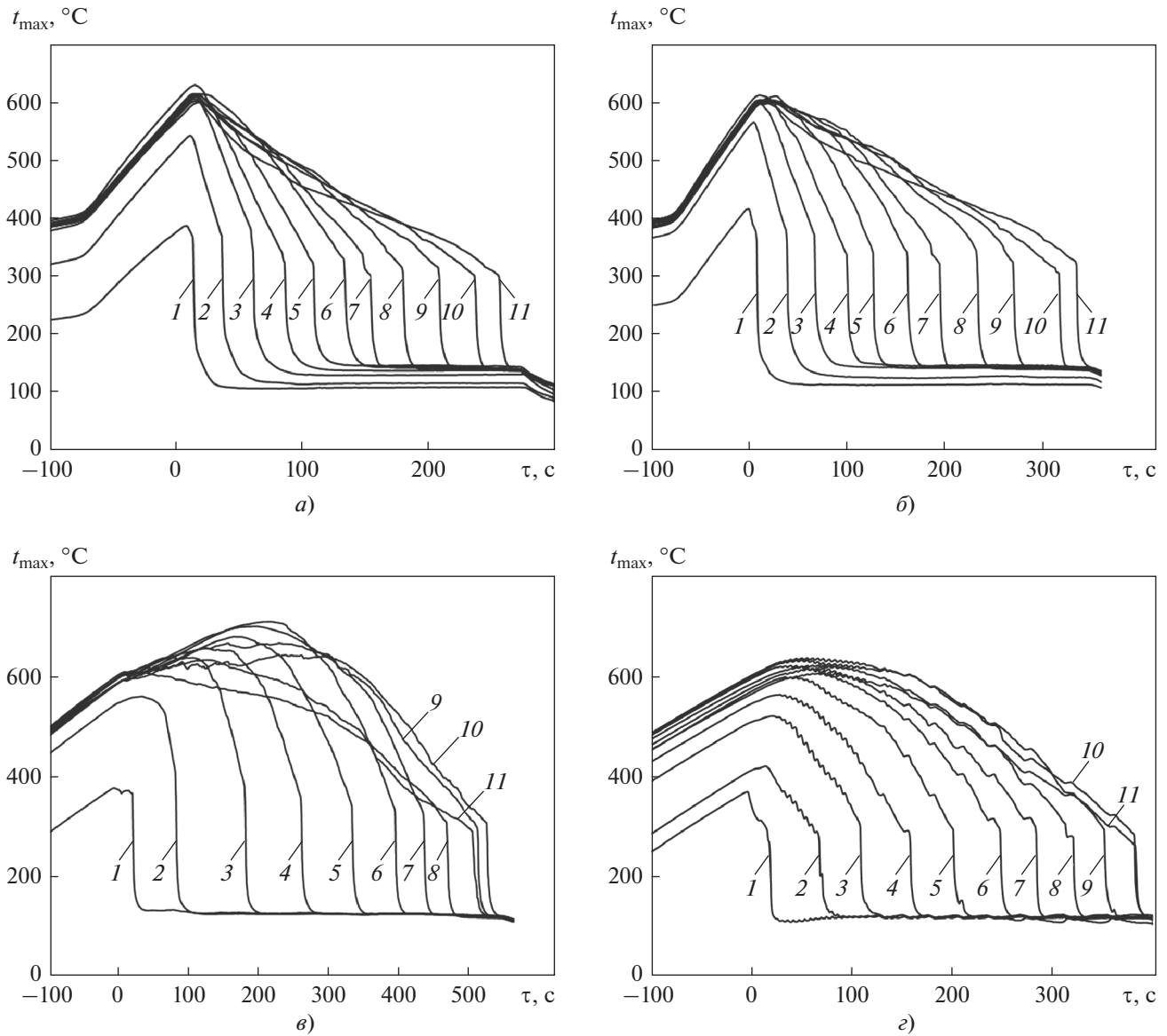


Рис. 4. Зависимость максимальной температуры имитатора твэла в каждой высотной группе при нижнем (а), комбинированном (б), верхнем (в) и нижнем гравитационном (г) заливе от времени.
h, мм: 1 – 3500; 2 – 3170; 3 – 2830; 4 – 2490; 5 – 2150; 6 – 1800; 7 – 1470; 8 – 1130; 9 – 790; 10 – 450; 11 – 150

На рис. 5 показаны времена охлаждения термомпары каждого имитатора твэла τ_0 в зависимости от координаты ее расположения. Как и на предыдущем этапе, координата отсчитывается от верха обогреваемого участка, а время охлаждения τ_0 определяется от начала подачи воды в модель реактора до момента достижения температуры 180°C.

Проанализировав данные, представленные на рис. 4, 5, можно сделать следующие выводы.

Даже при только верхнем заливе модели ТВС (см. рис. 4, в) охлаждение имитаторов твэлов начинается снизу (см. рис. 5, в). Это происходит

вследствие стекания подаваемой воды по “холодным” элементам модели ТВС (шестигранная стенка колонки, имитаторы направляющих каналов и центральная трубка). Подобное заключение было ранее сделано в работе [2], в которой, кроме того, демонстрировалось, что на пучках с малым количеством имитаторов (7 и 37 шт.) подаваемая сверху вода “запирается” потоком пара. В таких пучках расхолаживается вначале верх обогреваемого участка. Таким образом, эффективность подачи воды сверху повышается с ростом масштаба модели ТВС, и поэтому данный залив является эффективным для натурной активной зоны, где теплоноситель САОЗ через наименее нагретые участки по-

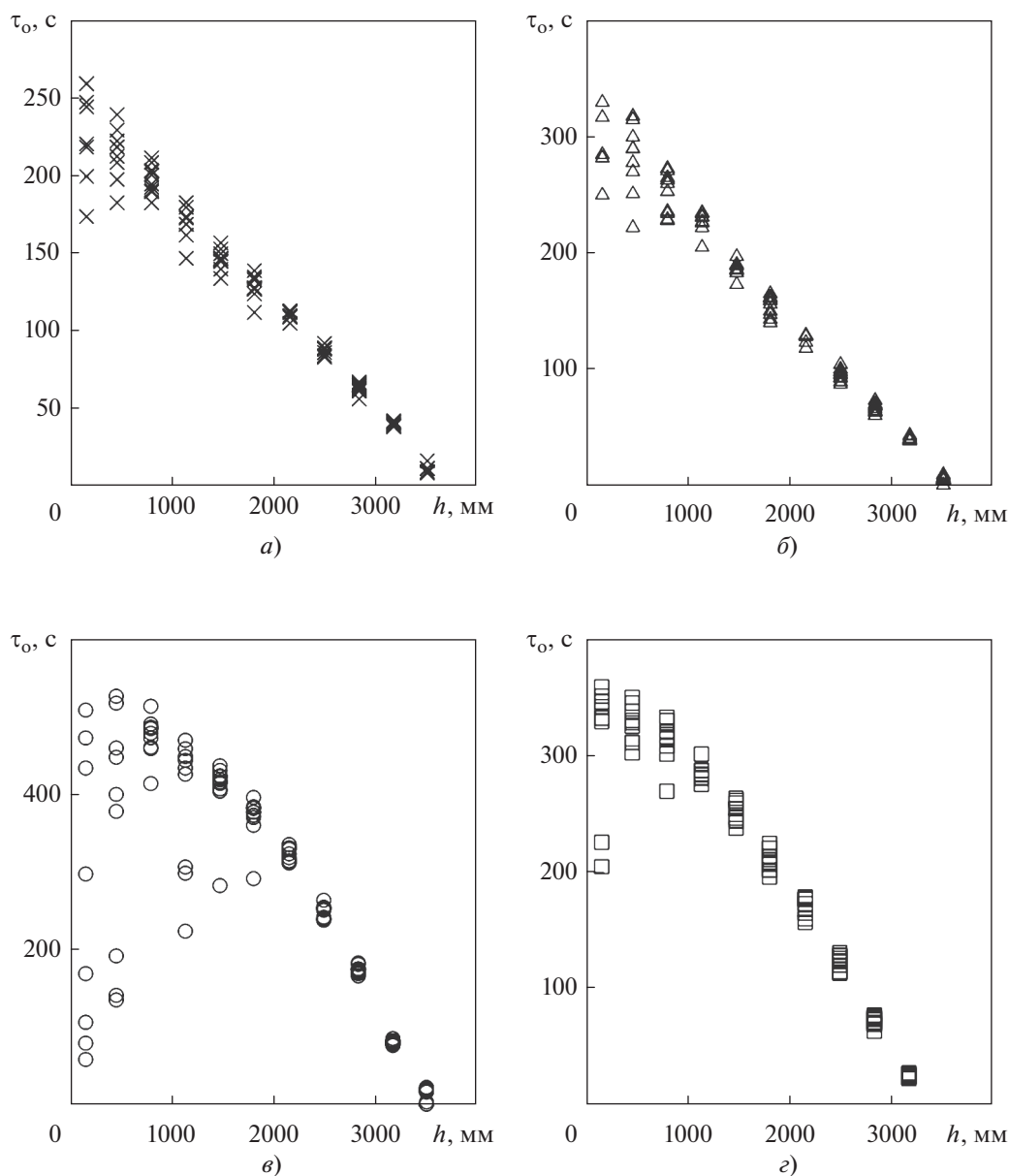


Рис. 5. Зависимость времени охлаждения термопары каждого имитатора твэла от координаты ее расположения при нижнем (а), комбинированном (б), верхнем (в) и нижнем гравитационном (г) заливе

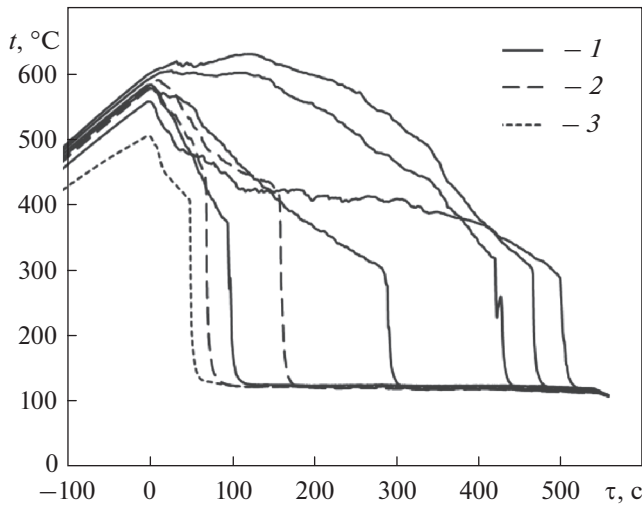
ступает под активную зону и затем вовлекается в залив снизу. Аналогичный вывод сделан по результатам исследований на экспериментальной крупномасштабной установке UPTF [10, 11].

При этом результаты экспериментов однозначно не демонстрируют, что имитаторы твэлов, примыкающие к “холодным” элементам, расхолаживаются быстрее (рис. 6).

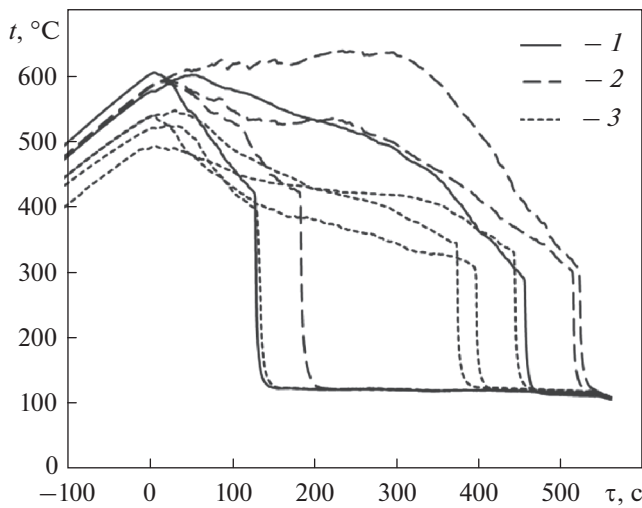
Даже при нижнем заливе (см. рис. 4, а, г) в верхних сечениях некоторых имитаторов твэлов расхолаживание начинается значительно раньше, чем прогнозируется линиями тренда в нижней части модели ТВС (см. рис. 5, а, г). Это можно

объяснить орошением верхней части модели ТВС жидкой фазой, которая формируется благодаря сепарации на имитаторе головки ТВС капель, уносимых паром из зоны смачивания, а также возможной частичной конденсацией пара на верхних более холодных элементах колонки. Этим явлением можно объяснить заметный разброс температур имитаторов в верхней части модели ТВС.

Результаты экспериментов второго этапа обобщены на рис. 7, где в зависимости от относительной мощности имитаторов η (мощность имитатора, отнесенная к средней мощности твэла в



a)

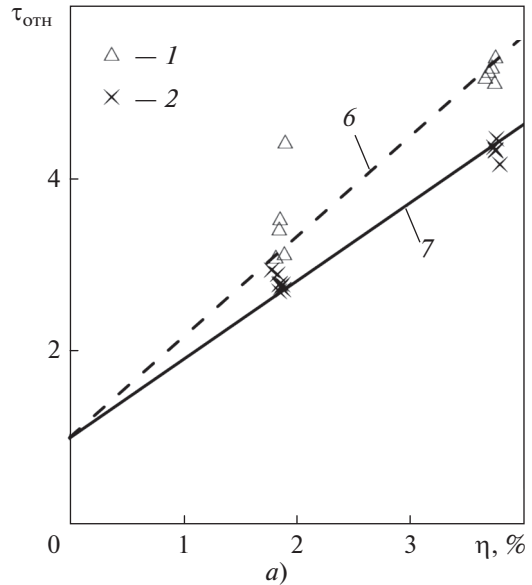


б)

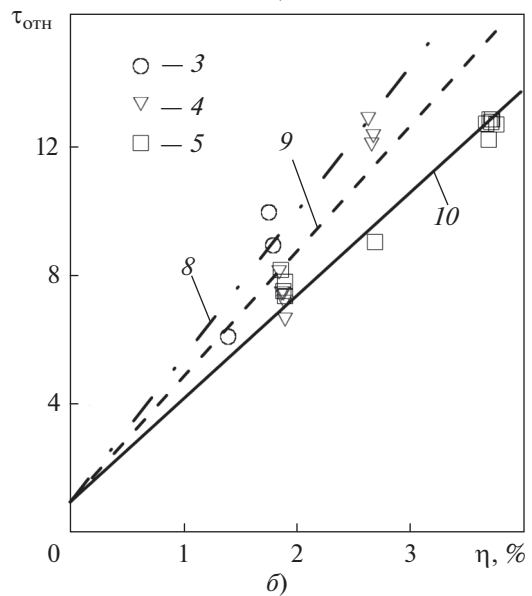
Рис. 6. Зависимость температуры имитаторов твэлов от времени при верхнем заливе для высотных групп с $h = 150$ мм (a) и $h = 450$ мм (б).

1 – имитаторы в регулярной ячейке; 2 – имитаторы у направляющих каналов или центральной трубки; 3 – периферийные имитаторы

активной зоне на номинальном уровне) представлено относительное время залива всей модели ТВС $\tau_{отн}$, которое определяется как отношение времени залива к времени, необходимому для заполнения объема обогреваемого участка модели ТВС в колонке водой с заданным в эксперименте расходом. Вследствие сильного различия времени залива при разных способах подачи воды в модель реактора эксперименты разделены на две группы (см. рис. 7, а, б). Одна точка при комбинированном заливе (см. рис. 7, а) сильно выбивается из общей совокупности вследствие того, что этот эксперимент был проведен с иной пропор-



a)



б)

Рис. 7. Зависимости относительного времени залива от относительной мощности имитатора твэла при комбинированном (1) и нижнем (2) заливе (a), верхнем (3), комбинированном гравитационном (4) и нижнем гравитационном (5) заливе (б).

Линейные функции, аппроксимирующие экспериментальные данные при заливах: 6 – комбинированном ($k = 116$); 7 – нижнем ($k = 91$); 8 – верхнем ($k = 450$); 9 – комбинированном гравитационном ($k = 388$); 10 – нижнем гравитационном ($k = 320$)

цией между расходами воды, подаваемой сверху и снизу, чем в остальных экспериментах.

Относительное время залива характеризует долю подаваемой воды, “выбрасываемую” из модели реактора и не участвующую в охлаждении модели ТВС. В экспериментах, в которых не используется имитатор опускной камеры, вода вы-

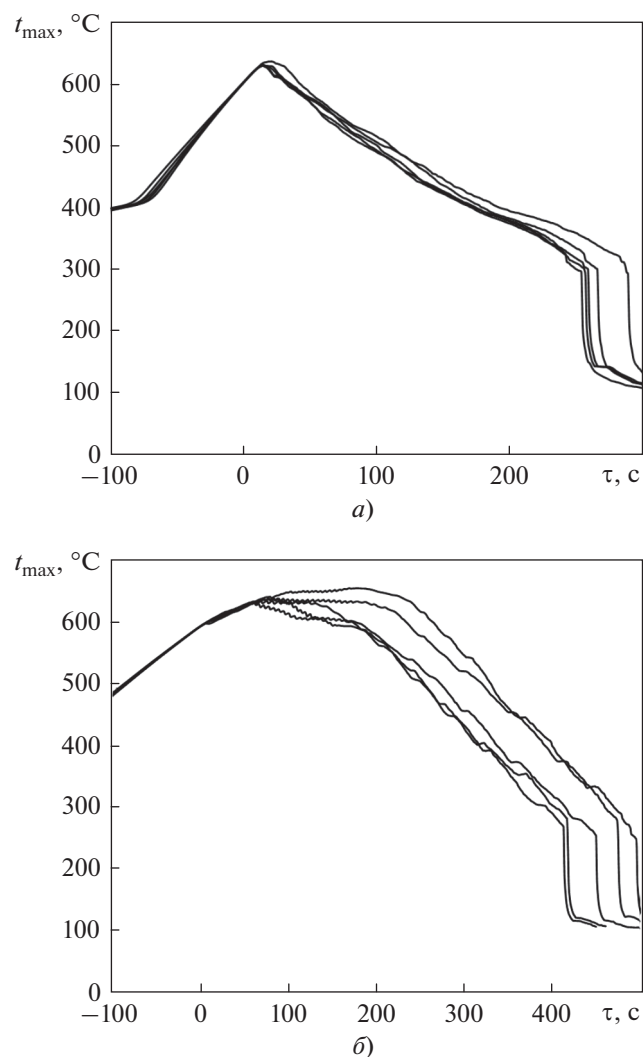


Рис. 8. Зависимость максимальной температуры имитаторов твэлов от времени в группе экспериментов на повторяемость результатов при нижнем (а) и комбинированном гравитационном (б) заливах

носятся потоком пара из модели реактора в его сборную камеру и далее через выпускной паропровод в атмосферу.

Таблица 3. Средние характеристики изменчивости основных параметров по всем группам экспериментов

Параметр	\bar{s}	s_{\max}	C_p
Расход подачи воды, м ³ /ч	0.17	0.34	0.303
Мощность модели ТВС, кВт	1.8	2.9	0.274
Время залива, с	19	39	0.334
Максимальная температура оболочек имитаторов твэлов, °С	8	18	0.344

Примечание. Критическое значение критерия Кохрена $C_{95\%} = 0.358$.

При гравитационном заливе вода поступает в имитатор напорной камеры реактора и попадает в колонку снизу по перепускному трубопроводу под воздействием статического напора столба воды. При повышении давления в колонке из-за вскипания теплоносителя на разогретых имитаторах твэлов статического напора воды не хватает для преодоления давления в колонке и часть воды сливается из модели реактора по горизонтальному трубопроводу, расположенному на уровне нижней образующей патрубка холодной нитки главного циркуляционного трубопровода ВВЭР-1200 (происходит “выброс в течь”). В результате расход воды, идущей в колонку на охлаждение модели ТВС, становится меньше, чем расход воды, подаваемой насосом. Например, для представленного в статье эксперимента с нижним гравитационным заливом усредненный расход от насоса подачи воды равен 2.53 м³/ч, а усредненный расход поступления воды в колонку – 1.4 м³/ч.

На рис. 7 показаны также линии, отображающие линейные функции, аппроксимирующие экспериментальные данные, вида

$$\tau_{\text{отн}} = k\eta + 1,$$

где k – угловой коэффициент линейной функции, который подбирали по минимуму среднеквадратического отклонения.

В соответствии с представленной формулой при нулевой мощности имитаторов твэлов время залива равно времени заполнения водой обогреваемого участка модели ТВС.

На рис. 7 видно, что в проведенных экспериментах выявлена такая последовательность заливов охлаждающей воды в модель реактора по эффективности охлаждения модели ТВС (от наиболее эффективного способа к менее эффективному): нижний, комбинированный, нижний гравитационный, комбинированный гравитационный, верхний.

Как отмечалось ранее, модернизация экспериментальной установки была направлена, главным образом, на достижение повторяемости результатов экспериментов. Из 49 выполненных на втором этапе экспериментов 41 был проведен в составе девяти групп по три–пять опытов для демонстрации повторяемости результатов. Остальные эксперименты были пробными для настройки необходимых параметров основных групп экспериментов. В каждой группе экспериментов с доступной точностью поддерживались одинаковые граничные условия.

В табл. 3 для четырех основных параметров экспериментов приведены средние \bar{s} и максимальные s_{\max} значения среднеквадратического отклонения и расчетные значения критерия Ко-

хрена C_p [12]. Из данных табл. 3 следует, что для всех основных параметров эксперимента выполняется условие $C_p < C_{95\%}$, чем подтверждается повторяемость (воспроизводимость) экспериментов с доверительной вероятностью 95%.

Повторяемость результатов экспериментов демонстрируется также на рис. 8, где приведены максимальные температуры имитаторов твэлов в каждом из пяти опытов в группе на повторяемость при нижнем, наиболее детерминированном, заливе и комбинированном гравитационном заливе, который является наименее детерминированным вследствие сильного влияния процессов в модели ТВС на количество воды, участвующей в охлаждении имитаторов.

ВЫВОДЫ

1. В ходе экспериментов по изучению теплогидравлических явлений при повторном заливе активной зоны ВВЭР при аварии “большая течь” получен статистически значимый объем новых экспериментальных данных, необходимых для валидации современных расчетных кодов, которые используются для обоснования безопасности энергоблоков АЭС с ВВЭР. Эксперименты проводились с использованием крупномасштабной модели ТВС со 120 обогреваемыми имитаторами твэлов. Продемонстрирована повторяемость экспериментов с доверительной вероятностью 95%.

2. Новые эксперименты на крупномасштабной модели ТВС подтвердили сделанный ранее вывод, что даже при только верхнем заливе охлаждение активной зоны начинается снизу. Сепарация капель на головке ТВС способствует более раннему охлаждению верхней части пучка твэлов по сравнению с ожидаемым темпом охлаждения.

3. Полученные экспериментальные зависимости относительного времени залива модели ТВС от относительной мощности имитаторов, а также линейные зависимости между этими величинами позволили расположить способы подачи охлаждающей воды в экспериментальную колонку в следующей последовательности по эффективности охлаждения модели ТВС (от наиболее эффективного к менее эффективному): нижний, комбинированный, нижний гравитационный, комбинированный гравитационный, верхний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Расчетное** обоснование теплогидравлических характеристик реактора и РУ ВВЭР / В.П. Спасков, Ю.Г. Драгунов, С.Б. Рыжов, А.К. Подшибякин, Г.А. Волков, Ю.Г. Абагян, В.И. Абрамов, Е.И. Левин, Е.М. Дамрин, В.Н. Лубянко,

Н.С. Филь, С.Н. Зайцев, Г.В. Алехин, С.Н. Краснов, А.М. Шумский, В.П. Денисов. М.: Академкнига, 2004.

2. **Анализ** явлений во время повторного залива активной зоны ВВЭР / Ю.А. Безруков, В.И. Шеколдин, С.И. Зайцев, А.Н. Чуркин // ВАНТ. Сер.: Обеспечение безопасности АЭС. 2014. № 34. С. 99–110.
3. **Расчетно-экспериментальные** исследования процессов повторного залива на крупномасштабной модели ТВС ВВЭР / М.А. Быков, Ю.А. Мигров, М.В. Сазонтова, А.Н. Чуркин // Теплоэнергетика. 2025. № 4. С. 29–38.
<https://doi.org/10.56304/S0040363624600964>
4. **Логвинов С.А., Безруков Ю.А., Драгунов Ю.Г.** Экспериментальное обоснование теплогидравлической надежности реакторов ВВЭР. М.: Академкнига, 2004.
5. **Создание** полномасштабного макета кассеты реактора ВВЭР-440 для исследования температурного режима активной зоны на стадии повторного залива / Ю.А. Безруков, С.А. Логвинов, С.В. Левчук, В.Д. Накладнов, В.П. Оншин, А.С. Соколов // Сб. докл. семинара СЭВ “Теплофизика-82”. Карловы Вары, 1982. С. 197–208.
6. **Экспериментальные** исследования повторного залива активной зоны на модели ТВС-2М с перемешивающими решетками / Е.А. Лисенков, А.Н. Чуркин, Ю.А. Безруков, А.В. Селезнев, Д.В. Мальчевский // ВАНТ. Сер.: Физика ядерных реакторов. 2020. № 2. С. 54–58.
7. **Сергеев В.В.** Теплообмен в закризисной зоне парогенерирующих каналов и теплогидравлика ТВС в переходных и аварийных режимах: дис. ... докт. техн. наук. ГНЦ РФ-ФЭИ, 2007.
8. **Верификация** теплогидравлических кодов на стандартной задаче нижнего повторного залива / А.Д. Ефанов, В.Н. Виноградов, Э.Ф. Гальченко, В.В. Сергеев, О.А. Судницын // Теплоэнергетика. 2003. № 11. С. 16–20.
9. **Исследование** теплогидравлики ВВЭР в аварийных и переходных режимах на стенде ПСБ-ВВЭР / В.Н. Блинков, О.И. Мелихов, В.И. Мелихов, И.В. Елкин, С.М. Никонов, Ю.В. Парфенов // Вестник МЭИ. 2016. № 5. С. 11–18.
10. **Weiss P.A., Hertline R.J.** UPTF test results: first three separate effect tests // Nucl. Eng. Des. 1988. V. 108. Is. 1–2. P. 249–263.
[https://doi.org/10.1016/0029-5493\(88\)90071-4](https://doi.org/10.1016/0029-5493(88)90071-4)
11. **Glaeser H.** Downcomer and tie plate countercurrent flow in the Upper Plenum Test Facility (UPTF) // Nucl. Eng. Des. 1992. V. 133. Is. 2. P. 259–283.
[https://doi.org/10.1016/0029-5493\(92\)90186-Y](https://doi.org/10.1016/0029-5493(92)90186-Y)
12. **ГОСТ Р ИСО 5725-2-2002.** Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Ч. 2: Основной метод определения повторяемости и воспроизводимости стандартного метода измерений. М.: Стандартинформ, 2009.

Experimental Study of the Core Cooling at the Reflooding Stage of a Large Break Loss-of-Coolant Accident

A. N. Churkin^{a, *}, A. G. Karetnikov^a, M. A. Bykov^a, A. S. Bogdanov^a, and Yu. A. Bezrukov^a

^a AO OKB Hidropress, Podolsk, 142103 Russia

*e-mail: churkin.an@mail.ru

Abstract—The paper presents a description of the experimental facility at OKB Hidropress designed to study thermohydraulic phenomena during the core reflooding caused by a large break loss of a coolant accident in a water-moderated water-cooled (VVER) power reactor. The performed studies yielded a statistically significant amount of experimental data on the time-dependence of the temperature of the fuel-rod simulator cladding at several sections of the fuel-assembly (FA) model that is necessary for the validation of computational codes. The experiments were carried out with two fuel-assembly models with uniform and nonuniform heat release distribution along the height. Each model included 120 heated fuel-rod simulators, 13 spacer grids, six guide channel simulators, and a fuel assembly's upper end fitting. In the experiments, five options of cooling water supply—bottom, gravity-driven bottom, top, combined, combined gravity-driven—were implemented. To confirm the reproducibility of the experiments, most of them were repeated three to five times. The fuel-assembly models, fuel-rod simulators, used instrumentation items, and experimental procedure are described. Examples are presented of the cooling dynamics of the fuel-rod simulators for different methods of cooling water supply to the reactor model, and the features of each flooding pattern are outlined. The data on the flooding time of the fuel-assembly model are generalized in the form of linear dependencies of this parameter on the relative power of the fuel element simulators.

Keywords: VVER, large break accident, emergency core cooling systems, reflooding, experimental facility, fuel-assembly model, fuel-rod simulator, flooding time