

**ОБОБЩЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ ПОВТОРНОГО ЗАЛИВА ТВС ВОДОЙ В ПОДДЕРЖКУ
МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЯЖЕЛЫХ АВАРИЙ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММЫ
ДЛЯ ЭВМ СОКРАТ¹**© 2024 г. И. С. Ахмедов^a, *, К. С. Долганов^a, Н. И. Рыжов^a, Д. Ю. Томащик^a, А. Е. Киселев^a^aИнститут проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Большая Тульская ул., д. 52,
Москва, 115191 Россия

*e-mail: akhmedov_ilver@ibrae.ac.ru

Поступила в редакцию 11.03.2024 г.

После доработки 03.05.2024 г.

Принята к публикации 30.05.2024 г.

На основе современных теоретических знаний и результатов представительных экспериментальных исследований рассмотрена феноменология повторного залива тепловыделяющих сборок. Параметры (давление в рабочем участке, недогрев охлаждающей воды, максимальная температура оболочек на момент начала залива, мощность сборки и т.д.), поддерживаемые в рассматриваемых экспериментах, близки к ожидаемым при реализации мер по управлению гипотетическими тяжелыми авариями на реакторных установках с водой под давлением. Сформулирован перечень процессов, сопровождающих повторный залив тепловыделяющих сборок стержней, установлены специфические эффекты, которые могут приводить к изменению локальных условий теплообмена оболочек имитаторов твэлов с пароводяной смесью и влиять на их смачиваемость. Сравнение результатов экспериментальных исследований показало наличие влияния расхода охлаждающей воды на разброс измеряемых значений времени смачивания в верхней части тепловыделяющей сборки. Представление о физике повторного залива позволило провести анализ результатов валидации программы для ЭВМ СОКРАТ на экспериментах различной феноменологической сложности (в неизменной структуре активной зоны, при интенсивной пароциркуляционной реакции, образовании расплава). Анализ показал, что программа для ЭВМ СОКРАТ корректно прогнозирует температурные истории оболочек имитаторов твэлов, время смачивания и суммарную массу образовавшегося в процессе эксперимента водорода с тенденцией к небольшой недооценке, результаты моделирования не противоречат экспериментальным данным. При валидации установлено, что наибольший вклад в оценку модельной погрешности расчета времени смачивания и суммарной массы образовавшегося водорода при моделировании экспериментов различной феноменологической сложности вносит модель теплогидравлики. Хорошие прогнозные возможности программы для ЭВМ СОКРАТ подтвердили применимость одномерного подхода к моделированию повторного залива тепловыделяющих сборок.

Ключевые слова: тяжелая авария, ВВЭР, активная зона, тепловыделяющая сборка, имитаторы твэлов, расплав, пленочное кипение, фронт смачивания, большая течь, повторный залив, моделирование, водород

DOI: 10.56304/S0040363624700334

Залив осушенной активной зоны водой — важнейшая мера по предотвращению перехода аварии в тяжелую стадию и ослаблению ее последствий на реакторных установках типа ВВЭР. Последствия применения такой меры — возможность интенсивного окисления оболочек твэлов, образования во-

дорода и выхода его под герметичную оболочку реакторной установки (РУ), которая является последним физическим барьером на пути распространения радиоактивных материалов в окружающую среду. При возникновении под герметичной оболочкой областей с высокой концентрацией водорода создается опасность его горения, сопровождающегося повышением давления и температуры в ее помещениях. Превышение предельных нагрузок на герметичную оболочку может вызвать потерю локализирующей функции. Следова-

¹ Работа выполнена по государственному заданию № 075-00996-23-01 ПР “Создание новых поколений вычислительных алгоритмов, моделей и программных средств для инновационных ядерных и термоядерных энерготехнологий и ядерного топливного цикла (FFGZ-2019-0005)”.

тельно, программы для ЭВМ (ПрЭВМ), применяемые для анализа безопасности АЭС, должны включать в себя соответствующие современному уровню знаний модели, которые воспроизводят физико-химические процессы, сопровождающие залив разогретой активной зоны водой.

В России расчетный анализ безопасности применительно к тяжелым авариям на АЭС с РУ типа ВВЭР, сопровождающимся повреждением активной зоны, выходом водорода и выбросом радиоактивных веществ в окружающую среду, выполняется с использованием ПрЭВМ СОКРАТ-В1/В2 и СОКРАТ/В3 (далее ПрЭВМ СОКРАТ), которые аттестованы Ростехнадзором [1, 2].

Цель настоящего исследования — актуализация знаний о феноменологии повторного залива тепловыделяющих сборок (ТВС) при разных степенях повреждения активной зоны и оценка возможностей ПрЭВМ СОКРАТ для моделирования явления повторного залива водой разогретых стержневых сборок в широком диапазоне условий, характерных для РУ типа ВВЭР.

ФЕНОМЕНОЛОГИЯ ПОВТОРНОГО ЗАЛИВА В НЕИЗМЕНЕННОЙ СТРУКТУРЕ АКТИВНОЙ ЗОНЫ

При проведении экспериментальных исследований за начало фазы повторного залива обычно принимают время начала подачи охлаждающей воды в рабочий участок установки. Когда охлаждающая вода достигает нижней части тепловыделяющей сборки, на оболочках имитаторов твэлов, разогретых до высоких температур, формируется фронт смачивания и под действием теплового потока генерируется большое количество пара, вследствие чего давление в рабочем участке возрастает. При этом замедляются продвижение пароводяной смеси вверх и повышение уровня воды в тепловыделяющей сборке. Таким образом, при смачивании имитаторов твэлов происходят колебания уровня воды в рабочем участке. Такие колебания с наибольшими амплитудой и частотой характерны для начальной фазы залива, после чего они постепенно затухают с продвижением фронта смачивания [3].

Во время повторного залива тепловыделяющей сборки снизу смачивание имитаторов твэлов обычно распространяется снизу вверх. Вода, поступающая в рабочий участок, смачивает нижнюю часть имитаторов твэлов, в результате чего их температура в этой области уменьшается до температуры насыщения при данном давлении в рабочем участке.

Разрушение волн на межфазной границе и возникновение пузырьков пара способствуют образованию большого количества капель жидкости в области контакта воды с имитаторами

твэлов [3]. Вскоре после начала фазы повторного залива в несмоченной области рабочего участка около имитаторов твэлов развивается обращенное кольцевое или дисперсное течение жидкости и теплообмен осуществляется в режиме пленочного кипения. До наступления полного смачивания имитаторов твэлов их охлаждение в закритическом режиме обеспечивается конвективным теплообменом с паром и орошением поверхности оболочек каплями с их последующим испарением [4]. Смачивание оболочек имитаторов твэлов сопровождается резким увеличением коэффициента теплопередачи, поскольку происходит переход от пленочного режима кипения теплоносителя к пузырьковому [3].

Для подробного исследования повторного залива тепловыделяющих сборок была проведена серия экспериментов на установке NEPTUN [5]. Тестовая сборка была геометрически подобна ТВС в зарубежных реакторах с водой под давлением и состояла из 33 имитаторов твэлов с электрическим нагревом и четырех направляющих трубок. В проведенных на установке NEPTUN испытаниях наблюдался процесс смачивания оболочек в широком диапазоне режимных параметров (давление в сборке, недогрев охлаждающей воды, максимальная температура оболочек на момент начала залива, мощность сборки и т.д.). Особое внимание уделяли качеству системы сбора данных и точности измерений, что позволило использовать экспериментальные данные для валидации теплогидравлических программ улучшенной оценки RELAP [5], TRACE [6] и др.

Результаты экспериментальных исследований на других стендах свидетельствуют о том, что увлеченные потоком пара капли воды могут приводить к началу смачивания оболочек имитаторов твэлов на нескольких высотных отметках рабочего участка одновременно. Так, например, в экспериментах FLECHT-Seaset [7] по заливу тепловыделяющей сборки, состоявшей из 161 стержня (68 из них — измерительные), была отмечена интенсификация теплопередачи благодаря наличию в потоке пара капель жидкости, которые выступали в роли дополнительных источников турбулентности. Кроме того, капли поглощали часть тепла, что изменяло локальный профиль температуры в объеме рабочего участка. Также было отмечено, что эффект от присутствия капель в потоке существенен при самых низких значениях чисел Рейнольдса пара, при которых естественная турбулентность наименьшая [7].

На установке FEBA [7] была выполнена отдельная серия испытаний, целью которых было исследование влияния блокировки каналов на характер теплообмена во время залива различных тепловыделяющих сборок (1 × 5 стержней и 5 × 5 стержней). Блокировка проходного сечения ак-

тивной зоны реактора может возникать вследствие раздутия оболочек твэлов под действием внутреннего избыточного давления газов. В экспериментах блокировку каналов моделировали с помощью пластин и цилиндрических втулок. При пробных тестах было установлено, что небольшие блокировки каналов не оказывают существенного влияния на охлаждение сборки при повторном заливе. Для получения заметных эффектов использовали коэффициент блокирования проходного сечения 62%, что соответствует раздутию оболочек твэлов до касания друг с другом. В [7] отмечается, что капли, увлекаемые паром, перехватывались на пути потока поверхностью раздутых оболочек или кромками лопнувших оболочек. Увеличение отношения площади поверхности капель к их объему (при уменьшении размера капель) и дополнительная турбулизация потока способствовали интенсификации испарения, а значит, и отвода тепла при заданном расходе. Помимо этого, могли происходить и другие явления, например падение более крупных капель под действием силы тяжести в области с низкой скоростью пара, их дробление на горячей поверхности и выход струй пара из суженных участков [8]. Кроме того, дистанционирующие решетки частично блокировали проходное сечение тепловыделяющей сборки и выступали дополнительными концентраторами капель жидкости. Эксперименты ФЕВА показали, что хотя решетки не сильно уменьшали проходное сечение сборки, но из-за своей геометрической формы они способствовали развитию турбулентности и дроблению капель в потоке. Локальная интенсификация охлаждения происходила главным образом на первой стадии повторного залива и ослабевала к моменту начала пленочного кипения. Степень влияния дистанционирующей решетки на интенсификацию охлаждения в аксиальном направлении уменьшалась с удалением от нее [8].

Эксперименты на отечественном экспериментальном стенде СВД-1 [9] с 37 обогреваемыми стержнями в стальном шестигранном корпусе по исследованию повторного залива также показали, что сразу после дистанционирующей решетки образовывался локальный фронт смачивания (длиной около 20 мм), который оставался на месте до прихода основного фронта.

При заливе тепловыделяющей сборки с большим количеством имитаторов твэлов самые горячие области могут охлаждаться восходящими потоками пароводяной смеси, а в более холодных и периферийных областях возникают нисходящие потоки пароводяной смеси и происходит более раннее смачивание [10].

Описанные феноменологические особенности позволяют полагать, что во время повторного залива активной зоны основные потоки парово-

дяной смеси и фронты смачивания являются двумерными, т.е. твэлы, находящиеся в различных областях активной зоны, охлаждаются по-разному, а охлаждение твэла в конкретной области зависит от характеристик местного потока пароводяной смеси. Вследствие такой неравномерности измерения времени смачивания в представительных экспериментах характеризуются большим разбросом значений, который, например, отмечается в публикации [11], посвященной исследованиям повторного залива на установке PARAMETER.

В [12] опубликованы результаты измерения времени смачивания в тестах на установке RHBT с тепловыделяющей сборкой 7×7 имитаторов твэлов. Сравнение испытаний с близкими режимными параметрами показывает, что неопределенность оценки времени смачивания зависит от расхода охлаждающей воды. При малом расходе охлаждающей воды меньше сказывается эффект уноса капель потоком пара в верхнюю часть сборки и небольшие отклонения в измерениях момента смачивания связаны, главным образом, с разными условиями охлаждения стержней в разных частях сборки. При увеличении скорости охлаждающей воды образующийся поток пароводяной смеси захватывает большее количество капель, что может приводить к раннему смачиванию оболочек в верхней части рабочего участка, где оболочки не нагреты до высоких температур. Причем при больших значениях расхода охлаждающей воды раннее смачивание верхних частей имитаторов твэлов может наступать одновременно со смачиванием самых нижних уровней сборки.

Еще большая неопределенность определения момента смачивания оболочек наблюдалась в эксперименте PERICLES 8PD [3]. Отличительной особенностью установки PERICLES являлся ее масштаб – повторный залив исследовали в системе из трех сборок 7×17 имитаторов твэлов длиной 3.656 м. Каждая из сборок геометрически подобна сборкам, применяемым в реакторах типа ВВЭР (за исключением типа решетки имитаторов). В установках такого масштаба, помимо описанных ранее эффектов, на разброс значений времени смачивания влияет существенная неравномерность потоков. Так, например, наиболее разогретые области сборки в тесте 8PD смачивались примерно за 200–300 с, тогда как время смачивания имитаторов на верхних отметках составляло 20–400 с.

В целом можно заключить, что при нижнем заливе тепловыделяющей сборки высотой примерно 4 м механизмы охлаждения топливных стержней на разных высотных отметках будут различные. Теплообмен с разогретой оболочкой имитатора твэла включает в себя несколько режимов, последовательно возникающих в канале

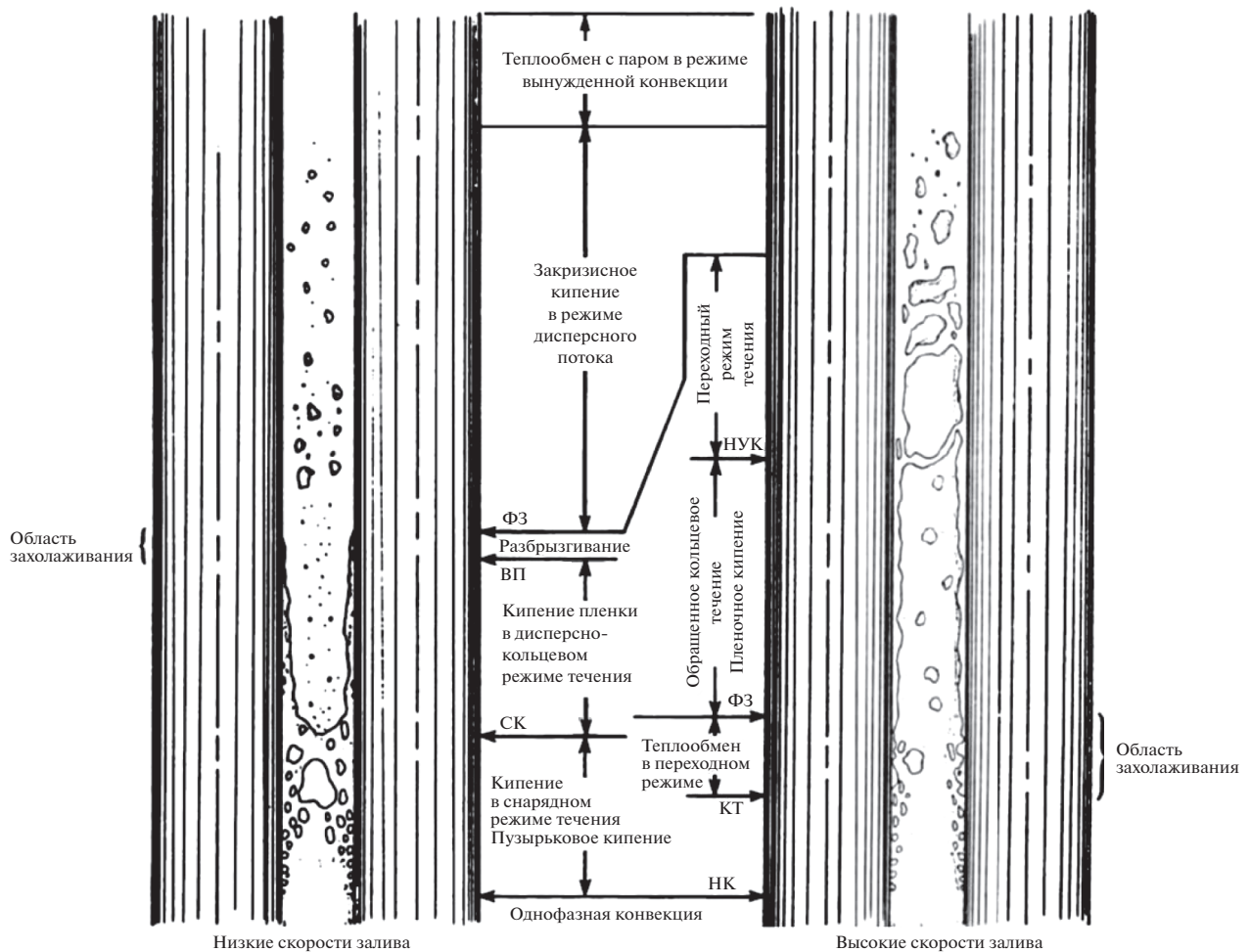


Рис. 1. Схема режимов теплообмена теплоносителя со стенками твэлов при повторном заливе активной зоны [3].
 ФЗ – фронт захлаживания; ВП – высыхание жидкой пленки (кризис теплообмена); СК – переход от кипения в сырьевом режиме к кольцевому режиму; НК – начало кипения; КТ – кризис теплообмена; НУК – начало уноса капель

после начала поступления воды. Важно подчеркнуть, что наступление того или иного режима теплообмена зависит от массового расхода пароводяной смеси. Процессы и явления, наблюдаемые при повторном заливе, представлены на рис. 1 [3].

ФЕНОМЕНОЛОГИЯ ПОВТОРНОГО ЗАЛИВА ПРИ ИНТЕНСИВНОЙ ПАРОЦИРКОНИЕВОЙ РЕАКЦИИ

Начиная с температур 1373–1473 К интенсифицируется экзотермическая пароциркониевая реакция окисления оболочек. Таким образом, если температура тепловыделяющих сборок превышает указанные значения, феноменология повторного залива усложняется эффектами, сопутствующими химической реакции. Вода, подаваемая при заливе, является дополнительным источником пара в активной зоне, что снижает вероятность возникновения условий для парового голодания (ограничение скорости реакции

окисления массой доступного окислителя). Если до залива окисление в активной зоне происходило в режиме парового голодания и рост температур определялся главным образом мощностью остаточного тепловыделения, то подача воды и последующая генерация пара приводят к увеличению потока окислителя, что, в свою очередь, повышает интенсивность окисления разогретой активной зоны, а следовательно, и мощность тепловыделения. Тепло, выделяющееся в ходе химической реакции, вызывает эскалацию нагрева оболочек (интенсивность реакции экспоненциально зависит от температуры). Кроме того, при пароциркониевой реакции выделяется водород, который является основной угрозой целостности герметичной оболочки при аварии.

До настоящего времени в мире были проведены единичные интегральные эксперименты, в которых осуществлялся повторный залив тепловыделяющих сборок, моделирующих ТВС реакторов с водой под давлением, перегретых до температур

свыше 1473 К. Одним из таких экспериментов является QUENCH-15 [13], в процессе выполнения которого исследовался повторный залив сборки имитаторов с оболочками из сплава ZIRLO на основе циркония с учетом длительной предварительной стадии окисления при температуре 1500 К. Тепловыделяющая сборка состояла из 24 имитаторов твэлов обогреваемой длиной 1 м, расположенных в квадратной решетке, и восьми стержней в углах пучка. Согласно сценарию, после стадии предокисления мощность нагрева имитаторов увеличивалась, соответственно возрастали температуры в сборке. Повторный залив сборки водой был начат, как только максимальная температура имитаторов достигла 2150 К. Исследование сопровождалось отказом некоторых термопар в наиболее горячих областях рабочего участка, что существенно усложнило анализ времени смачивания оболочек. На рис. 2 показано изменение температур оболочек внутреннего ряда стержней в области горячего пятна (+850 мм) в эксперименте QUENCH-15.

Экзотермическая парациркониевая реакция является дополнительным источником тепла, что увеличивает время смачивания, но при этом не оказывает принципиального влияния на теплогидравлическое поведение сборки при заливе.

ФЕНОМЕНОЛОГИЯ ПОВТОРНОГО ЗАЛИВА ПРИ ОБРАЗОВАНИИ РАСПЛАВА

Увеличение темпа нагрева оболочек твэлов при недостаточном отводе тепла может приводить к достижению температуры плавления металлического циркония, а в случае разрушения защитного оксидного слоя — к выходу расплава в пространство между твэлами. Такое явление наблюдалось в тесте SF1 на стенде PARAMETER (НИИ НПО “Луч”). На базе эксперимента был проведен бенчмарк — сравнительный анализ результатов расчетов, полученных с помощью программ для ЭВМ СОКРАТ, PARAM-TG, RELAP/SCDAPSIM, MELCOR, MAAP4, ATHLET-CD, ICARE/CATHARE [14]. Условия эксперимента соответствовали моделированию повторного залива на начальной фазе деградации активной зоны в ходе тяжелой аварии с потерей теплоносителя. Таким образом, в тесте SF1 наблюдалась еще более сложная феноменология повторного залива, чем в QUENCH-15.

В отличие от ранее рассмотренных экспериментов, в тесте PARAMETER-SF1 осуществлялся залив сборки сверху. При заливе сверху встречный поток пара препятствует продвижению фронта смачивания сверху вниз, а значительная часть воды поступает на вход в сборку по относительно холодной периферийной области рабочего участка, тем самым формируя залив снизу. При этом при любом типе залива (снизу, сверху, ком-

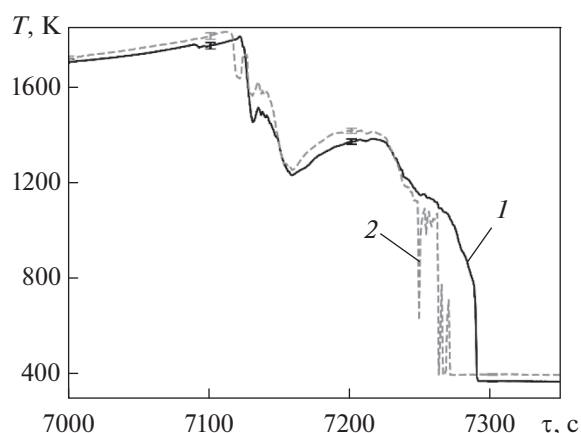


Рис. 2. Зависимость температуры T оболочек имитаторов твэлов № 12 (1) и № 16 (2) периферийного ряда от времени τ на отметке +850 мм в эксперименте QUENCH-15 [13]

бинированном) разогретые оболочки имитаторов твэлов взаимодействуют с водой, следовательно, справедливо ожидать подобие физических процессов, сопровождающих повторный залив. Ключевым и уникальным отличием теста SF1 от большинства других экспериментальных программ по повторному заливу являются экстремально высокие температуры, достигнутые на стадии разогрева (свыше 2273 К).

Модель ТВС в эксперименте PARAMETER-SF1 представляла собой сборку из 19 стержней имитаторов твэлов с обогреваемой зоной длиной 1275 мм, т.е. моделировалась 1/3 часть высоты активной зоны. При изготовлении модели ТВС использовали штатные материалы ВВЭР-1000: сплав Zr + 1% Nb для оболочек твэлов и дистанционирующих решеток, диоксид урана UO_2 для топливных таблеток. Радиальные размеры оболочек и топливных таблеток также соответствовали прототипу. Остаточное энерговыделение в твэлах имитировалось электронагревом.

Эксперимент включал в себя следующие этапы:

подготовительный (продолжительность от 0 до 11 000 с) — стабилизация заданных расходов аргона (около 2 г/с) и пара (примерно 3 г/с) при температуре ТВС 773 К, разогрев сборки в потоке пароаргоновой смеси до температуры приблизительно 1500 К в наиболее горячей зоне;

предокисление (от 11 000 до 14 450 с) — выдержка ТВС при температуре около 1473 К в наиболее горячей зоне в течение примерно 3450 с, максимальные отклонения температуры в наиболее горячем сечении (1300 мм) приблизительно 603 К;

быстрый разогрев (от 14 450 до 14 850 с) — подъем температуры ТВС в наиболее горячем сечении до 2273 К и выше;

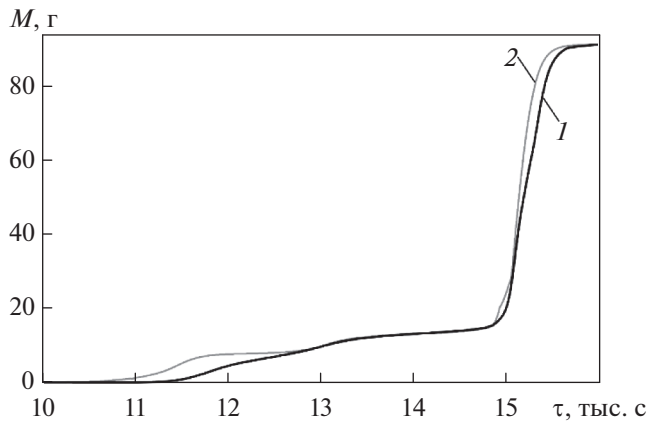


Рис. 3. Зависимость суммарной массы водорода M от времени τ [15].
1 – данные эксперимента; 2 – результаты расчета

верхний залив (от 14850 до 15408 с) – залив сборки водой сверху с расходом около 41 г/с при продолжающейся инъекции аргона снизу.

При подаче воды сверху кардинально изменились условия по доступности пара, а интенсивное окисление расплава на начальной фазе залива, зарегистрированное датчиком концентрации водорода (рис. 3) [15], вызвало временный рост температуры до примерно 2800 К (в эксперименте отсутствовали показания термопар в горячем

пятне, но результаты посттестового анализа свидетельствовали об образовании расплава UO_2).

Косвенно о динамике захлаживания существенно разрушенной сборки можно судить по смачиванию элементов установки выше и ниже области расплава (рис. 4) [15] (время смачивания составляет 7.5–8.0 мин). Справедливо полагать, что имитаторы твэлов в области горячего пятна смачивались еще позже.

Более позднее смачивание частично расплавленных топливных сборок также отмечалось при анализе последствий тяжелой аварии на АЭС ТМІ-2 в 1979 г. [16]. В результате растекания материалов расплава и формирования на днище слоя пористого дебриса была достигнута “охлаждаемая” конфигурация кориума, а деградация активной зоны была остановлена. При этом под охлаждаемой конфигурацией в [16], по-видимому, понимается такая совокупность ее характеристик и параметров залива, при которой расплав не нагревается, но при этом его температура может оставаться довольно высокой длительное время. Температура расплава в ходе аварии на АЭС ТМІ-2 оставалась высокой вплоть до момента запуска еще одного главного циркуляционного насоса петли А (около 15.5 ч) [17].

Во время тяжелой аварии на АЭС ТМІ-2 расплав стекал из активной зоны в виде струй и взаимодействовал с водой в нижней части реактора. При определенных условиях сопровождающая

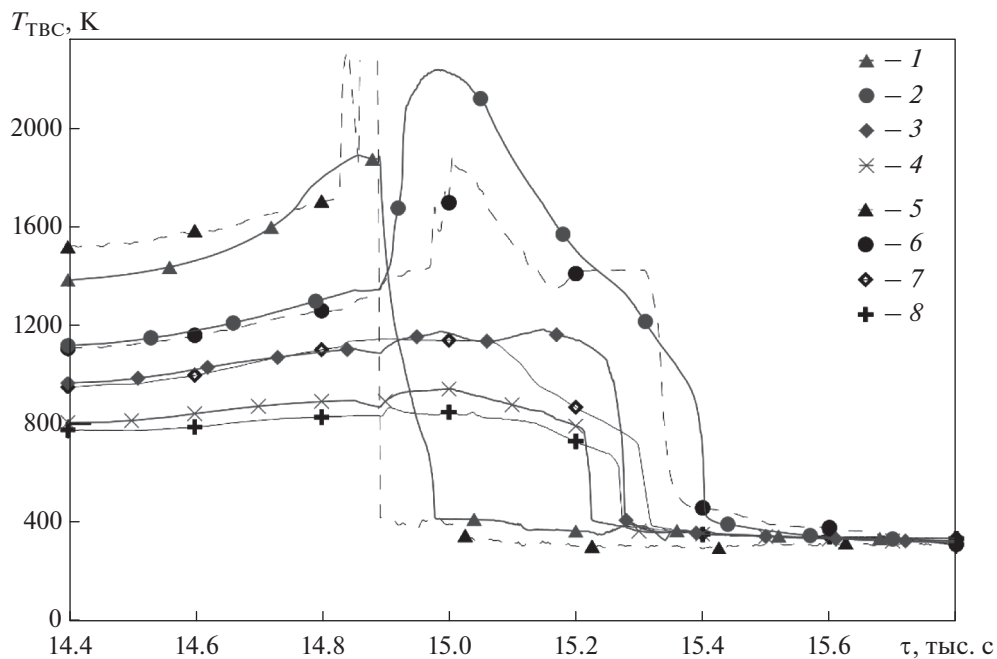


Рис. 4. Температура тепловыделяющих сборок $T_{ТВС}$ на уровнях выше (1300 мм) и ниже (100, 400 и 700 мм) блокады [15].
Результаты расчета $T_{ТВС}$ на отметках высоты, мм: 1 – 1300; 2 – 700; 3 – 400; 4 – 100; данные эксперимента: 5 – Т2513 (1300 мм); 6 – Т267 (700 мм); 7 – Т3124 (400 мм); 8 – Т3111 (100 мм)

такое взаимодействие фрагментация расплава может вызвать паровой взрыв (интенсивное самоподдерживающееся парообразование с возникновением ударных волн и, в пределе, с детонацией в зоне взаимодействия). Пики давления в результате паровых взрывов с детонацией могут приводить к дополнительному разрушению активной зоны и границ I контура. Однако убедительные экспериментальные доказательства возникновения паровых взрывов с детонацией внутри корпусных энергетических реакторов отсутствуют [18]. Важно, что данное явление не регистрировалось и при тяжелых авариях с плавлением активной зоны на АЭС ТМ1-2 и “Фукусима-1”.

ВЛИЯНИЕ ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ПОВТОРНОГО ЗАЛИВА НА ПРОГНОЗНУЮ СПОСОБНОСТЬ ПрЭВМ СОКРАТ

Сценарии тяжелых аварий могут быть разными, что обусловлено различными исходными событиями и совокупностью дополнительных отказов и ошибок операторов. Современная концепция безопасности АЭС предполагает проведение на этапе разработки проекта РУ расчетного анализа наиболее представительных сценариев, включая гипотетические с очень малой вероятностью реализации. Такой анализ выполняется с использованием накопленного опыта эксплуатации и экспериментальной базы, передовых технологий и современных численных моделей, описывающих определяющие процессы. Согласно нормативным требованиям [19], для расчетного анализа могут использоваться только валидированные и аттестованные программы для ЭВМ.

Особенностью требований к современным ПрЭВМ для анализа тяжелых аварий является необходимость учета теплогидравлических процессов, возникающих на их начальной стадии (до превышения максимального проектного предела повреждения твэлов). Поэтому для версии СОКРАТ-В1/В2 были выполнены обширные валидационные исследования в области теплогидравлических процессов.

При валидации ПрЭВМ СОКРАТ-В1/В2 были использованы в том числе и эксперименты из базы [20] с заливом разогретых моделей ТВС снизу: NEPTUN 5050, NEPTUN 5052, PERICLES 8PD. Дополнительно был использован интегральный эксперимент QUENCH-LOCA-L1, в котором процесс повторного залива осуществлялся при раздутии и разрыве оболочек имитаторов твэлов. В этих экспериментах максимальная температура оболочек перед заливом составляла от 873 до 1140 К, т.е. практически отсутствовало образование водорода в результате пароциркониевой реакции. Поэтому объем валидации ПрЭВМ СОКРАТ применительно к явлению повторного залива был расши-

рен благодаря экспериментам QUENCH-15 и PARAMETER-SF1. На рис. 5 для сопоставления в графическом виде представлены результаты расчетов и измерений некоторых параметров в экспериментах NEPTUN 5050, PERICLES 8PD, QUENCH-LOCA-L1, QUENCH-15 (для эксперимента PARAMETER данные были приведены ранее – на рис. 3).

Для получения оценки погрешности моделей (модельной погрешности) использовал современную методику, которая подробно описана в [21]. В таблице для сравнения представлены основные параметры экспериментов и результаты оценки модельной погрешности для валидируемых параметров, полученные при валидации ПрЭВМ СОКРАТ. Важно отметить, что эта модельная погрешность характеризует совместную работу всех моделей ПрЭВМ СОКРАТ, задействованных в моделировании конкретного эксперимента.

В области относительно низких температур в качестве валидируемого параметра рассматривалось время смачивания как интегральный параметр, характеризующий теплообмен с водой и паром в режиме вынужденной конвекции, а также при кипении теплоносителя в дисперсном, дисперсно-кольцевом, снарядном, пузырьковом и обращенном кольцевом режимах. Таким образом, по времени смачивания можно косвенно судить о корректности воспроизведения температурных историй оболочек и теплогидравлических процессов и явлений, протекающих при заливе. Время смачивания определяется закризисным теплообменом и теплообменом в переходном режиме. В программе для ЭВМ СОКРАТ тепловой поток рассчитывается по модели Нигматулина [22] при парокапельном потоке теплоносителя и по модели Бромли [23] при пленочном кипении. Минимальная температура пленочного кипения определяется по соотношению Мюрао [24].

Результаты расчетов экспериментов NEPTUN и PERICLES позволяют сделать вывод о том, что ПрЭВМ СОКРАТ с хорошей степенью точности воспроизводит поведение температур оболочек во время повторного залива тепловыделяющих сборок.

Наибольшая модельная погрешность времени смачивания оболочек получена при расчетах эксперимента PERICLES 8PD, поскольку оценка проводилась относительно усредненного времени смачивания. Результаты измерений времени смачивания в тесте 8PD характеризуются большим разбросом, что может быть обусловлено существенной неравномерностью задачи (ввиду большого масштаба сборки и радиального профиля мощности) и проявлением феноменологических особенностей, связанных с осаждением капель на большом расстоянии от входа теплоно-

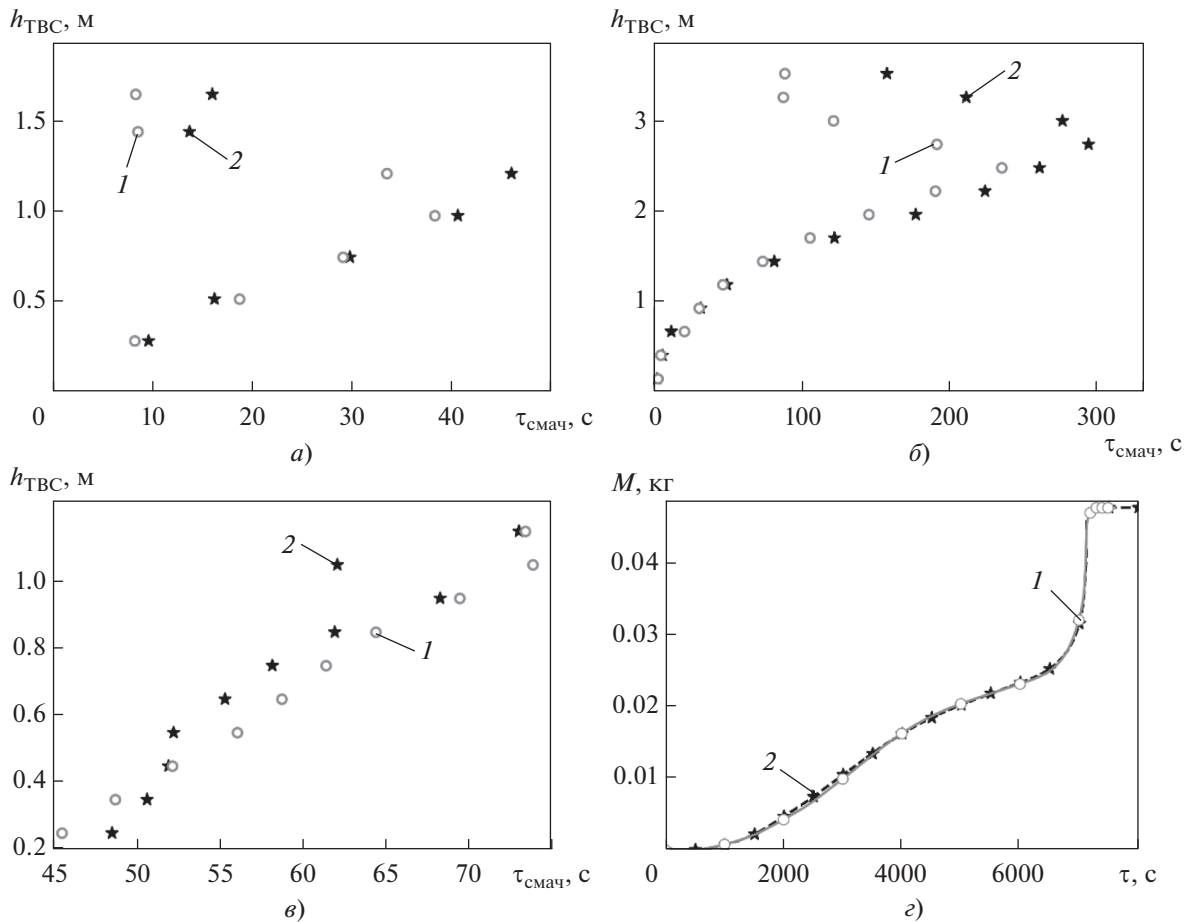


Рис. 5. Сопоставление расчетных (1) и измеренных (2) значений времени смачивания $\tau_{смач}$ (а–в) и зависимость суммарной массы водорода M от времени τ (г) в экспериментах NEPTUN 5050 (а), PERICLES 8PD (б), QUENCH-LOCA-L1 (в), QUENCH-15 (г)

сителя в рабочий участок (ввиду более длинной обогреваемой части имитаторов). Эти особенности выходят за рамки интегрального подхода к моделированию.

Полученные результаты расчета эксперимента QUENCH-LOCA-L1 указывают на корректность совместной работы моделей теплогидравлики и термомеханики оболочек твэлов [25, 26] при повторном заливе. Модельная погрешность определения времени смачивания близка к полученной при валидации на экспериментах близкого масштаба на установке NEPTUN без раздутия оболочек.

В процессе экспериментов QUENCH-15 и PARAMETER-SF1 наблюдался отказ термопар в области горячего пятна, в связи с чем оценка времени смачивания по всей высоте сборки в этих испытаниях ограничена высотными отметками, на которых были получены надежные результаты измерений. Кроме того, корректность моделирования процесса смачивания в области горячего пятна может быть косвенно проверена по сум-

марной массе водорода, выделившегося в ходе эксперимента, поскольку интенсивность пароциркониевой реакции определяется температурой оболочки в горячем пятне. Корректность модели выхода водорода вследствие пароциркониевой реакции при заданных температурах была продемонстрирована в [27].

В тесте QUENCH-15 [13] охлаждающая вода подавалась в момент, когда температуры оболочек имитаторов в горячем пятне превышали 1500 К, что приводило к интенсивной пароциркониевой реакции. Кроме того, как и в эксперименте QUENCH-LOCA-L1, оболочки испытательных стержней находились под внутренним давлением для моделирования раздутия. Таким образом, модельная погрешность расчета массы водорода на конец эксперимента QUENCH-15 характеризует совместную работу следующих моделей СОКРАТ: теплогидравлики, термомеханики, окисления циркония в неизменной структуре. Полученное значение погрешности может косвенно свидетельствовать о том, что в расчетах сохраняется

Результаты валидации ПрЭВМ СОКРАТ на экспериментах по повторному заливу разогретых стержневых сборок

Эксперимент	$T_{\max}$, К	N	Валидируемый параметр	Погрешность*, %
NEPTUN 5050 и 5052 (повторный залив)	1140	33	Время смачивания	–28.9; –12.7
PERICLES 8PD (повторный залив)	873	357		–41.6; –20.3
QUENCH-LOCA-L1 (повторный залив, раздутие оболочек)	1000	21		–28.2; –7.0
QUENCH-15 (повторный залив, раздутие оболочек, повышение темпа нагрева)	2150	24	Масса водорода на конец эксперимента	–23.6; 8.0
PARAMETER-SF1 (повторный залив, раздутие оболочек, повышение темпа нагрева, образование локальных ванн расплава)	Более 2273	19		–16.8; 3.6

Примечание. $T_{\max}$ – максимальная температура, при которой включается подача воды; N – количество имитаторов твэлов.
* Интервальная оценка модельной погрешности.

тенденция к более раннему остыванию оболочек, наблюдавшаяся в тестах с заливом при меньших температурах.

Результаты моделирования эксперимента SF1 на стенде PARAMETER подробно рассмотрены в статье [15]. Поскольку в этом эксперименте наблюдалось образование локальной ванны расплава, в расчетах использовался еще больший набор моделей, по сравнению с QUENCH-15, так как необходимо было учитывать окисление расплава и его взаимодействие с водой. В ПрЭВМ СОКРАТ поведение расплава в активной зоне описывается согласно [25, 28–32]. Модельная погрешность расчета массы водорода, образовавшегося к концу эксперимента, также косвенно указывает на небольшую недооценку времени охлаждения оболочек. При этом значения модельной погрешности слабо отличаются от оценок, полученных при расчете эксперимента QUENCH-15.

ВЫВОДЫ

1. При рассмотрении феноменологии повторного залива водой разогретой активной зоны реакторных установок с водой под давлением в контексте реализации мер по управлению тяжелыми авариями на АЭС с водным теплоносителем установлено, что с увеличением степени повреждения активной зоны перед заливом феноменология усложняется.
2. Анализ феноменологии повторного залива проведен с привлечением качественных и прототипных экспериментальных данных, полученных в широком диапазоне определяющих условий и структуры активной зоны.

3. Феноменологические особенности повторного залива тепловыделяющих стержневых сборок связаны с интенсификацией теплообмена, вызванной осаждением из потока и диспергированием капель жидкости в местах сужения проточной части сборок (дистанционирующие решетки, область раздутия оболочек имитаторов твэлов, кромки разрушенных оболочек). В совокупности с пространственной неравномерностью задачи залива пучков перегретых стержней эти эффекты приводят к большой неопределенности измерения времени смачивания.

4. Для анализа экспериментов разной феноменологической сложности, сопровождавшихся повторным заливом тепловыделяющих сборок, использовалась ПрЭВМ СОКРАТ, с помощью которой можно составить корректный прогноз температурных историй оболочек имитаторов твэлов с небольшой тенденцией к раннему охлаждению. Результаты расчетов не противоречат экспериментальным данным, полученным на установках разного масштаба.

5. Применение одномерного подхода позволяет моделировать повторный залив тепловыделяющих сборок с хорошей степенью точности.

6. Основной вклад в модельную погрешность при численном анализе экспериментов вносит модель теплогидравлики, которая формирует граничные условия для моделей других процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аттестационный паспорт программы для ЭВМ СОКРАТ-B1/B2 № 564. М.: Ростехнадзор, 2022.

2. **Results** of SOCRAT code development, validation and applications for NPP safety assessment under severe accidents / L.A. Bolshov, K.S. Dolganov, A.E. Kiselev, V.F. Strizhov // Nucl. Eng. Des. 2019. V. 341. P. 326–345. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2018.11.013>
3. **Reinhardt H.J.** A study of 2-Dimensional effects in the core of a PWR during the refueling phase of a LOCA. Analysis of data of PERICLES experiments with the COBRA-NC code: Final Report EUR 12408 EN. Luxembourg: Commission of the European Communities, Sept. 1989. Contract No. 3138-87-05 ELISPD.
4. **Петухов Б.С., Генин Л.Г., Ковалев С.А.** Теплообмен в ядерных энергетических установках: учеб. пособие для вузов / под ред. Б.С. Петухова. М.: Атомиздат, 1974.
5. **Richner M., Analytis G.Th., Aksan S.N.** Assessment of RELAP5/MOD2, Cycle 36.02, using NEPTUN reflooding experimental data: Intern. Agreement Report. Paul Scherrer Institute (PSI), U.S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG/IA-0054, Aug. 1992.
6. **Hillberg S.** Assessment of NEPTUN reflooding experiments 5050 and 5052 with TRACE V5.0 Patch 5: Intern. Agreement Report. VTT Technical Research Centre of Finland Ltd: U.S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG/IA-0495, Febr. 2019.
7. **Rod bundle heat transfer test facility test plan and design** / L.E. Hochreiter, F.B. Cheung, T.F. Lin, C. Frepoli, A. Sridharan, D.R. Todd, E.R. Rosal. NUREG/CR-6975, NRC USA, 2010.
8. **Rust K., Ihle P.** FEBA flooding experiments with blocked arrays evaluation: Report KfK 3657. Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe, 1984.
9. **Экспериментально-расчетное** исследование процессов теплообмена в аварийных ситуациях с потерей теплоносителя / А.Д. Ефанов, В.В. Ложкин, Б.И. Куликов, О.А. Судницын, Ю.А. Безруков, С.Н. Зайцев // Изв. вузов. Ядерная энергетика. 2000. № 1. С. 49–63.
10. **Validation matrix for the assessment of thermal-hydraulic codes for VVER loca and transients: A report by the OECD Support Group on the VVER Thermal-Hydraulic Code Validation Matrix.** Nuclear Energy Agency Committee on the Safety of Nuclear Installations, 2001.
11. **Базюк С.С.** Расчетно-экспериментальное исследование повторного залива модельных тепловыделяющих сборок ВВЭР при максимальной проектной и запроектной авариях: дис. ... канд. техн. наук. М., 2011.
12. **RBHT** reflood heat transfer experiments data and analysis / L.E. Hochreiter, Fan-Bill Cheung, T.F. Lin, J.P. Spring, S. Ergun, A. Sridharan, A. Ireland, E.R. Rosal // NUREG/CR-6980, NRC USA. 2012.
13. **Results** of severe fuel damage experiment QUENCH-15 with ZIRLO cladding tubes / J. Stuckert, M. Große, U. Stegmaier, M. Steinbrück // KIT Scientific Reports; 7576. 2011. <https://doi.org/10.5445/KSP/1000022788>
14. **The PARAMETER** test series, Nesseber / V. Nalivaev, A. Kiselev, J.-S. Lamy, S. Marguet, V. Semishkin, J. Stuckert, Ch. Bals, K. Trambauer, T. Yudina, Yu. Zvonarev // European Review Meeting on Severe Accident Research (ERMSAR-2008). Nesseber, Vigo Hotel, Bulgaria, 23–25 Sept. 2008. P. 1–14.
15. **Numerical** assessment of PARAMETER-SF1 test on oxidation and melting of LWR fuel assembly under top flooding conditions / D.Yu. Tomashchik, K.S. Dolganov, A.E. Kiselev, N.I. Ryzhov, T.A. Yudina // Nucl. Eng. Des. 2020. V. 369. P. 1–18. <https://doi.org/10.16/j.nucengdes.2020.110852>
16. **TMI-2** analysis exercise final report/TMI-2 Analysis Exercise Task Group: Principal Working Group No. 2; Committee on the Safety of Nuclear Installations: Nuclear Energy Agency. https://doi.org/inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/41/023/41023511.pdf
17. **Rempe J.L., Knudson D.L.** TMI-2 – A case study for PWR instrumentation performance during a severe accident. Idaho National Laboratory, March 2013.
18. **Методика** расчетной оценки нагружения корпуса реактора ВВЭР-1200 при внутрикорпусных паровых взрывах / К.С. Долганов, В.Н. Семенов, А.Е. Киселев, Д.Ю. Томашик, А.Л. Фокин, В.В. Астахов, А.В. Николаева, Д.Л. Гаспаров, С.И. Пантюшин, Н.В. Букин, М.А. Быков // Изв. РАН. Энергетика. 2018. Вып. 5. С. 42–58. <https://doi.org/10.31857/S000233100003214-9>
19. **НП-001-15.** Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций. М.: Ростехнадзор, 2016.
20. **Nusret Aksan** Overview on CSNI separate effects test facility matrices for validation of best estimate thermal-hydraulic computer codes // THICKET 2008 – Session III – Paper 03. 2008. P. 23–43.
21. **Оценка** возможности кода СОКРАТ моделировать процессы растворения диоксидаuranового топлива жидким цирконием / К.С. Долганов, А.Е. Киселев, Н.И. Рыжов, Д.Ю. Томашик, М.Ф. Филиппов, Р.В. Чалый, Т.А. Юдина, С.А. Шевченко, Д.А. Яшников, Н.А. Козлова // Атомная энергия. 2018. Т. 125. Вып. 2. С. 79–86.
22. **Нигматулин Б.И., Кухаренко В.Н.** Теплоотдача в закризисной области теплообмена в парогенерирующем канале с парокапельным потоком // ТВТ. 1991. Т. 29. Вып. 3. С. 557–563.
23. **Bromley L.** Heat transfer in stable film boiling. Lawrence Berkeley National Laboratory, 1949. LBNL Report UCRL-122. <https://escholarship.org/uc/item/0pj1211q>. (Дата обращения: 06.02.2024.)
24. **RELAP3.3 MOD3.3** code. Manual volume IV: models and correlations / Nuclear Safety Analysis Division: Information Systems Laboratories Inc., Rockville, Maryland, Idaho Falls, Idaho. Prepared for the Division of Systems Research Office of Nuclear Regulatory Research, U. S. Nuclear Regulatory Commission, March 2006.
25. **Code Package 'SVECHA':** Modeling of core degradation phenomena at severe accidents / M.S. Veshchunov, A.Ye. Kiselev, A.V. Palagin, A.V. Lemekha, A.M. Volchek, N.V. Yamshchikov, A.V. Boldyrev, A.I. Deryugin // Proc. of the 7th Intern. Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NUREG-7). Saratoga Springs, N.Y., 10–15 Sept. 1995. V. 3. P. 1914–1929.

26. **Yamshchikov N., Boldirev A., Komarov O.** The modeling of fuel cladding deformation behavior under severe accident: Preprint NSI-2-93. M.: Nuclear Safety Institute, Russian Academy of Sciences, 1993.
27. **Квалификационный анализ экспериментальных данных по высокотемпературному окислению в паре отечественных сплавов на основе циркония / И.С. Ахмедов, Т.А. Юдина, Д.Ю. Томашик, К.С. Долганов, М.Ф. Филиппов // Изв. РАН. Энергетика. 2023. № 3. С. 3–17.**
28. **Palagin A.V.** Relocation of molten materials during core degradation (candling) // Transactions of SMiRT-13 Conf. Porto Alegre, Brazil, 13–18 Aug. 1995. V. 1. P. 139–144.
29. **Code package SVECHA: Modeling of core degradation phenomena at severe accidents / M.S. Veshchunov, A.V. Palagin, A.M. Volchek, N.V. Yamshchikov, A.V. Boldyrev // Transactions of SMiRT-13 Conf. Porto Alegre, Brazil, 13–18 Aug. 1995. V. 1. P. 159–163.**
30. **Palagin A.V.** On the flowing down the fuel rod of Zr–U–O liquefied mixture during severe accident at nuclear power plant: Preprint NSI-1-93. M.: Nuclear Safety Institute, Russian Academy of Sciences, 1993.
31. **Palagin A.V.** SVECHA project candling model: Description of melt relocation during core degradation // Proc. of the 31st National Heat Transfer Conf. Severe Accidents Fundamentals Session. Houston, USA, 1996. V. 1.
32. **Палагин А.В.,** Физическая модель перемещения расплавленных материалов на начальном этапе разрушения активной зоны АЭС // Изв. РАН. Энергетика. 2002. № 4. С. 93–100.

Summary of the Results of Computational and Experimental Studies of Repeated Water Filling of FA in Support of Modeling of Severe Accidents using the SOKRAT Computer Program

I. S. Akhmedov^{a,*}, K. S. Dolganov^a, N. I. Ryzhov^a, D. Yu. Tomaszczyk^a, and A. E. Kiselev^a

^a *Institute for Problems of Safe Development of Nuclear Energy, Russian Academy of Sciences, Moscow, 115191 Russia*

^{*}*e-mail: akhmedov_ilver@ibrae.ac.ru*

Abstract—Based on modern theoretical knowledge and the results of representative experimental studies, the phenomenology of reflooding of fuel assemblies is considered. The parameters (pressure in the working section, underheating of the cooling water, maximum temperature of the cladding at the start of the flooding, assembly power, etc.) maintained in the experiments under consideration are close to those expected when implementing measures to manage hypothetical severe accidents at reactor installations with pressurized water. A list of processes accompanying the repeated filling of fuel-rod assemblies has been formulated, and specific effects have been established that can lead to a change in the local conditions of heat exchange between the cladding of fuel-rod simulators and the steam-water mixture and affect their wettability. A comparison of the results of experimental studies showed the influence of cooling water consumption on the spread of measured values of wetting time in the upper part of the fuel assembly. The concept of refill physics allowed us to analyze the results of validation of the computer program SOKRAT in experiments of varying phenomenological complexity (in an unchanged structure of the active zone, with an intense steam-zirconium reaction, formation of a melt). The analysis showed that the SOKRAT computer program correctly predicts the temperature histories of the fuel-rod simulator claddings, the wetting time, and the total mass of hydrogen formed during the experiment with a tendency toward slight underestimation; the modeling results do not contradict the experimental data. During validation, it was established that the thermal hydraulics model makes the greatest contribution to the assessment of the model error in calculating the wetting time and the total mass of hydrogen formed when modeling experiments of varying phenomenological complexity. Good predictive capabilities of the computer program SOKRAT confirmed the applicability of a one-dimensional approach to modeling the refilling of fuel assemblies.

Keywords: severe accident, WWER, core, fuel assembly, fuel-rod simulators, melt, film boiling, wetting front, large leak, refill, modeling, hydrogen