

УДК 621.039.546

РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗДУТИЯ И РАЗРЫВА ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ ВВЭР И PWR В ЭКСПЕРИМЕНТАХ С РАЗЛИЧНЫМИ УСЛОВИЯМИ НАГРУЖЕНИЯ

© 2023 г. К. С. Долганов¹, А. Е. Тарасов¹, *, А. В. Капустин¹, Д. Ю. Томашик¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук (ИБРАЭ РАН), Москва, Россия

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

Поступила в редакцию 18.10.2022 г.

После доработки 17.02.2023 г.

Принята к публикации 20.02.2023 г.

В работе представлены результаты расчетного моделирования процессов раздутия и разрыва оболочек твэлов из отечественных и зарубежных сплавов в экспериментах, охватывающих различные условия нагружения. В качестве расчетного средства использована интегральная программа для ЭВМ СОКРАТ-B1/B2. Выполнен анализ неопределенностей результатов расчета к входным данным. Показано хорошее качественное и количественное согласие экспериментального и расчетного времени разрыва оболочек твэлов в условиях, соответствующих начальной стадии тяжелой аварии на АЭС с водо-водяными реакторами. Показана важность проведения современных экспериментов по исследованию процессов раздутия и разрыва оболочек твэлов из отечественных сплавов.

Ключевые слова: твэл, разрыв оболочек, термомеханика, СОКРАТ, валидация, анализ неопределенностей

DOI: 10.31857/S0002331023030044, **EDN:** SZVRQO

ВВЕДЕНИЕ

В ходе аварий на энергоблоках АЭС с водоохлаждаемыми реакторами, вызванных интенсивной потерей теплоносителя и отказом системы аварийного охлаждения активной зоны и пассивных систем отвода тепла (на современных проектах), происходит разогрев твэлов до высоких температур. Давление газов под оболочками твэлов к концу топливной кампании может достигать значений более 10 МПа. Поскольку потеря теплоносителя приводит к снижению давления в первом контуре реакторной установки, перепад давления на оболочках возрастает, и последующий рост температуры при осушении активной зоны приводит к их раздутию и разрыву. После разрыва оболочек твэлов начинается выход радиоактивных веществ (РВ) в первый контур, а в месте истечения теплоносителя РВ поступают под защитную оболочку (ЗО) реакторной установки. В зависимости от рассматриваемого сценария аварии поступление радиоактивных веществ в окружающую среду на этой стадии обусловлено либо проектной неплотностью ЗО, либо выбросом через систему вентиляции (если произошел отказ локализации ЗО), либо выбросом в обход ЗО (если нелокализованное место течи находится за пределами ЗО).

Таким образом, разрыв оболочек твэлов непосредственно определяет начало поступления радиоактивных веществ в окружающую среду. Разрыв оболочек твэлов имеет определяющее значение для радиационных последствий проектных и запроектных аварий, поскольку в этих авариях температура топлива не превышает 1200°C , и выход радиоактивных веществ в первый контур и ЗО ограничен главным образом накопленной активностью в газовых зазорах твэлов. Однако это явление играет важную роль и в развитии тяжелых запроектных аварий, сопровождающихся кратковременным разогревом твэлов свыше 1200°C , в частности, в сценариях с повторным заливом активной зоны на начальной стадии ее разрушения. Поэтому корректное моделирование термомеханического поведения оболочек твэлов в интегральных программах для ЭВМ (далее — кодах), используемых для расчетных оценок радиационных последствий запроектных аварий, включая тяжелые аварии, представляет собой важную задачу в области численного анализа безопасности АЭС.

В России основной интегральной программой, используемой для моделирования тяжелых аварий на АЭС с ВВЭР, является код СОКРАТ (версии В1/В2 и В3). Проверка корректности модели термомеханического нагружения оболочек твэлов в составе интегральных программ подразумевает необходимость ее валидации на данных представительных экспериментов. Ранее термомеханическая модель СОКРАТ была валидирована на экспериментальных данных ОКБ “ГИДРОПРЕСС” с отрезками оболочек твэлов [12] и на данных интегрального эксперимента HALDEN IFA650.11 [13] с одиночным отрезком твэла ВВЭР с облученным топливом. В экспериментах ОКБ “ГИДРОПРЕСС” нагружение оболочки твэла осуществлялось постоянным перепадом давления при постоянной температуре. Для полноценной валидации термомеханической модели в составе СОКРАТ требуется также рассмотрение других вариантов нагружения оболочки: плавный рост перепада давления при постоянной температуре оболочки твэла, плавный рост перепада давления совместно с ростом температуры оболочки твэла. Такого рода нагружение было реализовано в экспериментах PUKI и REBEKA соответственно.

Серия экспериментов PUKI [1–3] была проведена в 1995 г. Центром энергетических исследований Венгерской Академии Наук (МТА ЕК). Целью экспериментов являлось изучение процесса деформации и разрыва оболочек твэлов из сплава $\text{Zr-1\%Nb}$ и определение давления и времени разрыва в широком диапазоне температур и скоростей нагружения оболочки внутренним давлением. Также в задачи экспериментов входила проверка влияния на параметры разрыва оболочек защитного слоя ZrO_2 , образующегося в результате предварительного окисления образцов в водяном паре.

Эксперименты PUKI проводились при постоянной температуре и постоянной скорости роста давления под оболочкой. Серия тестов охватывала диапазон температур $650\text{--}1200^{\circ}\text{C}$ и диапазон скоростей нагружения внутренним давлением $0.01 \times 10^5\text{--}0.17 \times 10^5$ Па/с. В серии PUKI исследовались как неокисленные, так и предварительно окисленные оболочки с толщиной внешнего защитного слоя ZrO_2 в диапазоне $6\text{--}57$ мкм.

Оболочки раздувались внутренним давлением при постоянном внешнем давлении и постоянной температуре. Этот режим не характерен для аварий на РУ ВВЭР, поскольку в авариях одновременное постоянство температуры твэлов и рост перепада давления на оболочке невозможны. Рост перепада давления на оболочке может быть вызван либо увеличением давления в газовом зазоре в результате нагрева твэлов (но в этом случае не выполняется условие постоянства температуры), либо падением давления в первом контуре (что возможно лишь при потере теплоносителя из первого контура, сопровождающейся осушением активной зоны и ростом температуры твэлов).

Тем не менее данные эксперименты, являясь экспериментами по исследованию отдельных явлений, важны как с точки зрения понимания влияния отдельных факторов на состояние оболочек твэлов, так и для разработки полноценной модели деформации и разрушения оболочек. Результаты серии PUKI входят в базу данных экспериментов АЯЭ ОЭСР NEA-1799 IFPE/АЕКI-EDB-E110 [4], то есть признаются международным научным сообществом в качестве надежных данных, в том числе для валидации программ для ЭВМ.

В экспериментах РЕБЕКА [5] Технологического института Карлсруэ (KfK, Германия) исследовалось влияние нагрева на деформирование и разрушение твэльных оболочек из сплава Циркалой-4 под воздействием внутреннего давления. Эти эксперименты проводились на отдельных оболочках в паровой среде. Независимыми параметрами экспериментов являлись избыточное давление под оболочкой, варьировавшееся от 6.5×10^5 до 98×10^5 Па, и скорость нагрева (около 1 К/с). Указанные значения прототипны условиям разрушения оболочек твэлов во время аварии с потерей теплоносителя на АЭС с реакторами с водой под давлением (PWR, ВВЭР). В ходе экспериментов определялась температура разрушения, а также момент времени разрушения, окружная деформация и утончение оболочки.

В зависимости от конечной температуры образца в экспериментах РЕБЕКА наблюдалась деформация и разрушение оболочек в диапазоне температур, характерных для существования α -фазы циркония, переходной области $\alpha + \beta$ и β -фазы циркония. Оболочки твэлов в начале тестов были неокисленными. Но, поскольку нагрев происходил довольно медленно, в ходе экспериментов происходило постепенное насыщение кислородом поверхности оболочки. В частности, при нагреве до 900°C суммарная толщина слоя оксида циркония и альфа-фазы циркония, стабилизированной кислородом, достигала величины около 10^{-5} м [5]. В тестах на относительно низком давлении разрыв оболочки наблюдался позднее и при более высоких (до 1010°C) температурах. При этом оказывался существенным эффект упрочнения оболочки вследствие окисления в присутствии водяного пара.

Экспериментальные данные из серий экспериментов PUKI [1–3] и РЕБЕКА [5] были выбраны для валидации термомеханической модели кода СОКРАТ-B1/B2. Таким образом, область валидации, рассматриваемая в данной статье, ограничена процессами деформации и разрыва оболочки твэла реактора типа ВВЭР или PWR вследствие роста перепада давления на оболочке, а также в результате нагрева оболочек твэлов при воздействии на оболочку постоянного внутреннего давления применительно к начальной стадии тяжелой аварии. Также исследуется эффект упрочнения оболочки при обогащении циркония кислородом.

1. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ОБОЛОЧКИ ТВЭЛА В КОДЕ СОКРАТ-B1/B2

Моделирование раздутия и разрыва оболочек твэлов является важной задачей для корректного определения начальных условий тяжелой аварии. За счет увеличения газового зазора в твэлах и уменьшения проходного сечения в ТВС ухудшается теплоотвод от топлива, а разгерметизация оболочек твэлов определяет время начала выхода в первый контур радиоактивных продуктов деления (ПД), содержащихся в газовом зазоре, и величину уносимой ими мощности.

Термомеханика оболочек твэлов моделируется в коде СОКРАТ-B1/B2 при помощи модели CROX [6, 7]. Эта модель учитывает зависимость физических свойств материалов, входящих в состав материала оболочки, от температуры и концентрации накопленного в ней кислорода. Модель основана на самосогласованном решении системы

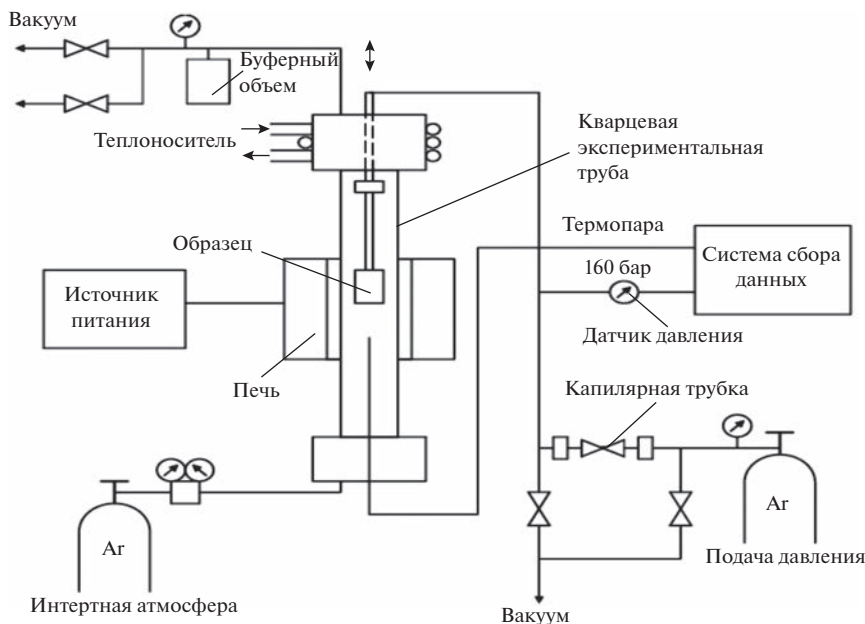


Рис. 1. Схема экспериментальной установки PUKI.

уравнений, описывающих пластические и упругие деформации для каждого материального слоя оболочки твэла. В частности, модель CROX может описывать следующие важные для тяжелых аварий явления:

- изменение геометрии оболочки твэла, исчезновение/появление зазора между топливной таблеткой и оболочкой;
- эффект упрочнения оболочки при обогащении циркония кислородом;
- эффект уменьшения прочности оболочки за счет образования продольных трещин в наружном слое диоксида циркония;
- ускорение процесса окисления за счет дополнительного доступа кислорода в оболочку через образовавшиеся в диоксиде циркония трещины;
- падение давления под оболочкой твэла в результате разрыва внутренним давлением газа;
- разрыв пленки диоксида циркония по механизму “flowering” и начало стекания расплава $U-Zr-O$.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ PUKI

2.1. Краткое описание экспериментальной установки

На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки. В электрической печи происходил нагрев кварцевой трубы и исследуемого отрезка оболочки до заданной температуры. С одного конца образец был закрыт заглушкой из сплава циркалой-4, а к другому концу образца подводилась трубка $\varnothing 2.15 \times 0.25$ мм из того же сплава, через которую под оболочку образца подавался аргон. Эта трубка была соединена с источником аргона через капиллярную трубку. Различная скорость увеличения давления достигалась благодаря использованию капиллярных трубок разного диаметра. Давле-

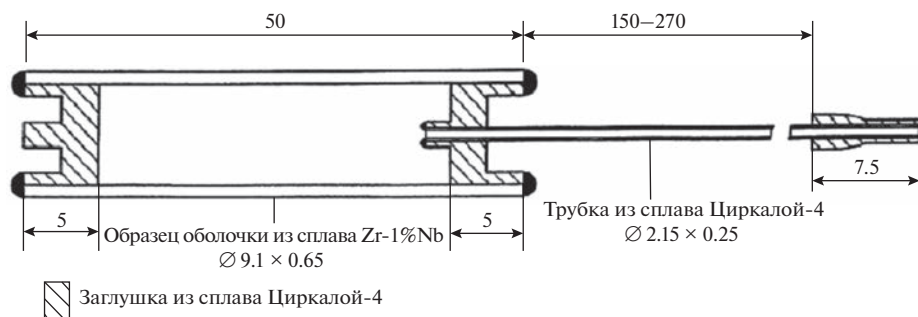


Рис. 2. Схема нагружения оболочки в экспериментах PUKI.

ние в кварцевой трубе составляло 1×10^5 Па и поддерживалось постоянным в течение всего эксперимента с помощью буферного объема, подключенного к кварцевой трубе.

Схема нагружения образца оболочки внутренним давлением показана на рис. 2. Опытный образец — отрезок натурной оболочки твэла ВВЭР длиной 50 мм, внутренним диаметром 7.8 мм и наружным диаметром 9.1 мм — размещался в кварцевой трубе, заполненной аргоном.

Для исследования влияния защитного слоя ZrO_2 на процесс деформации и разрыва образцов выполнялось предварительное окисление отрезков оболочек твэлов в паровой среде при температуре 900°C и временах выдержки от 50 до 3600 с.

2.2. Система измерений и источники неопределенностей

Ключевыми параметрами, которые использовались для валидации, являлись время разрыва оболочек твэлов и перепад давления при разрыве. Кроме этих параметров, в экспериментах PUKI измерялась температура оболочки, а также внутренний и внешний диаметр образцов. Неопределенность измерения в [1] не приводится, не указываются и инструментальные погрешности измерительной аппаратуры. Поэтому для оценки неопределенности измерений используются данные по подобным тестам, выполненным на аналогичных установках.

Так, в работе [8] в экспериментах по исследованию прочностных характеристик циркониевых оболочек приводится погрешность измерения температуры оболочки ± 2 К. Учитывая подобие экспериментов [8] и PUKI, эта величина была принята в качестве неопределенности измерения температуры в экспериментах PUKI.

Неопределенности измерения наружного диаметра образца и толщины слоя диоксида циркония в предокисленных образцах были приняты равными ± 5 и ± 0.05 мкм соответственно, исходя из точности представленных в [1] результатов измерений.

Неопределенность скорости роста внутреннего давления была принята равной $\pm 1\%$ от измеренного значения.

Время в экспериментах обычно фиксируется довольно точно, поэтому в качестве неопределенности измеренного времени разрыва оболочек твэлов принималась точность представления времени в [1], равная ± 0.01 с. Величинам неопределенностей измерения температуры, скорости роста внутреннего давления, а также времени разрыва оболочек приписывался равномерный закон распределения, а указанные значения интерпретировались как минимальное и максимальное отклонения от номинальных значений.

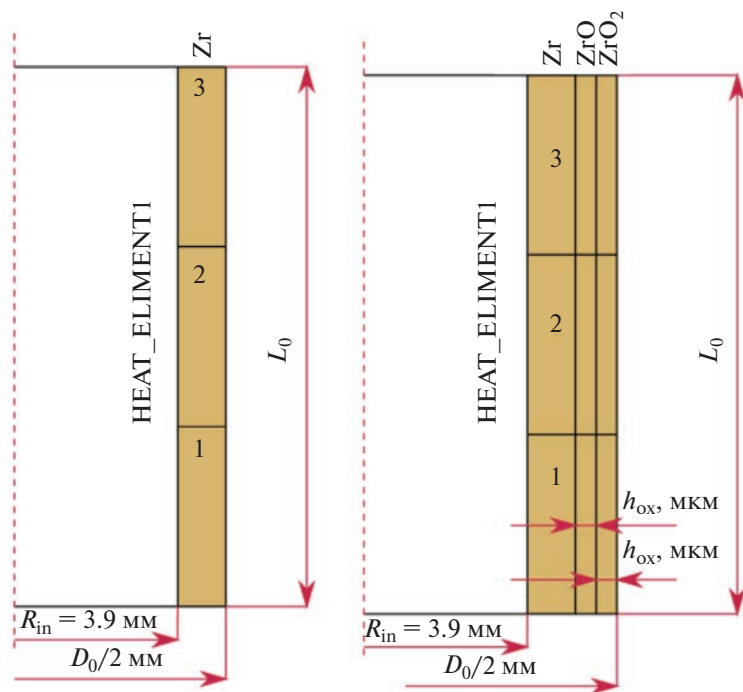


Рис. 3. Нодализация схема для моделирования экспериментов PUKI с неокисленными (слева) и предо-
кисленными оболочками (справа).

Неопределенность измерения внутреннего диаметра образца определяется полем допусков на производство оболочек твэлов [9] и была принята равной $+0.06$ мм. Величине приписывался нормальный закон распределения, а указанное значение интерпретировалось как три стандартных отклонения (3σ).

Температура в печи и внутреннее давление под оболочкой фиксировались компьютерной системой сбора данных с частотой 10 записей в секунду. Эта система использовалась для отслеживания динамики изменения давления во время эксперимента.

Перед началом испытаний экспериментаторы производили измерения наружного диаметра и длины каждого образца. Данные измерений представлены в [1] в табличном виде. После окончания эксперимента измерялись остаточные деформации образцов.

2.3. Расчетная модель для экспериментов PUKI

В расчетах моделировалась только оболочка и газовый объем внутри нее. Нодализация схема представлена на рис. 3. Оболочка моделировалась тепловым элементом HEAT_ELEMENT1. Тепловой элемент разбивался по длине на 3 одинаковые расчетные ячейки. Длина теплового элемента L_0 задавалась равной значению, измеренному перед началом каждого теста в серии. Внутренний радиус (R_{in}) теплового элемента задавался равным 3.9 мм, наружный радиус — равным $D_0/2$ мм, где D_0 — измеренный наружный диаметр образца для каждого теста в серии. Для моделирования экспериментов с предо-кислением оболочек в расчетную модель на внешней границе добавляется 2 слоя оксида и диоксида циркония (ZrO и ZrO_2) толщиной h_{ox} , которая

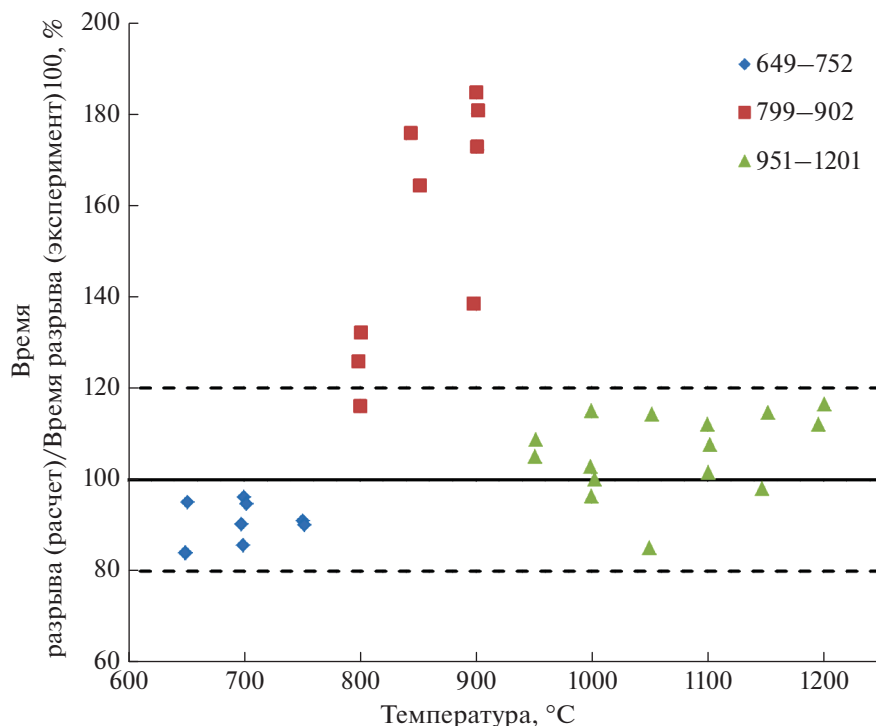


Рис. 4. Сравнение расчетного и измеренного времени разгерметизации неоокисленных оболочек в изотермических экспериментах PUKI при различных температурах.

задается равной измеренной в экспериментах толщине оксидной пленки для каждого теста в серии.

Начальная температура теплового элемента была установлена в расчетах равной 20°C. Это позволяет учесть эффект теплового расширения при нагреве до рабочей температуры в эксперименте.

Начальное давление под оболочкой задавалось равным 0.1 МПа. Динамика изменения давления под оболочкой моделировалась с постоянной скоростью в соответствии с экспериментальным значением для каждого конкретного теста в серии. Расчет завершался спустя 10 с после момента разрыва оболочки. В момент разрыва оболочки фиксировалось время разрыва и соответствующий перепад давления на оболочке.

2.4. Анализ результатов, полученных в референтных расчетах эксперимента

В результате моделирования каждого теста серии PUKI с заданием входных параметров без отклонений в пределах неопределенности (т.н. “референтные” расчеты) были определены расчетные значения времени разрыва оболочек твэлов и перепада давления при разрыве — основных валидируемых параметров. Во всех расчетах в качестве критерия разрыва использовалось условие превышения окружной деформацией предельного значения 20%. Это значение предельной окружной деформации установлено по умолчанию в модуле CROX на основании результатов моделирования экспериментов со сборками твэлов. На рис. 4 и 5 показано соотношение между

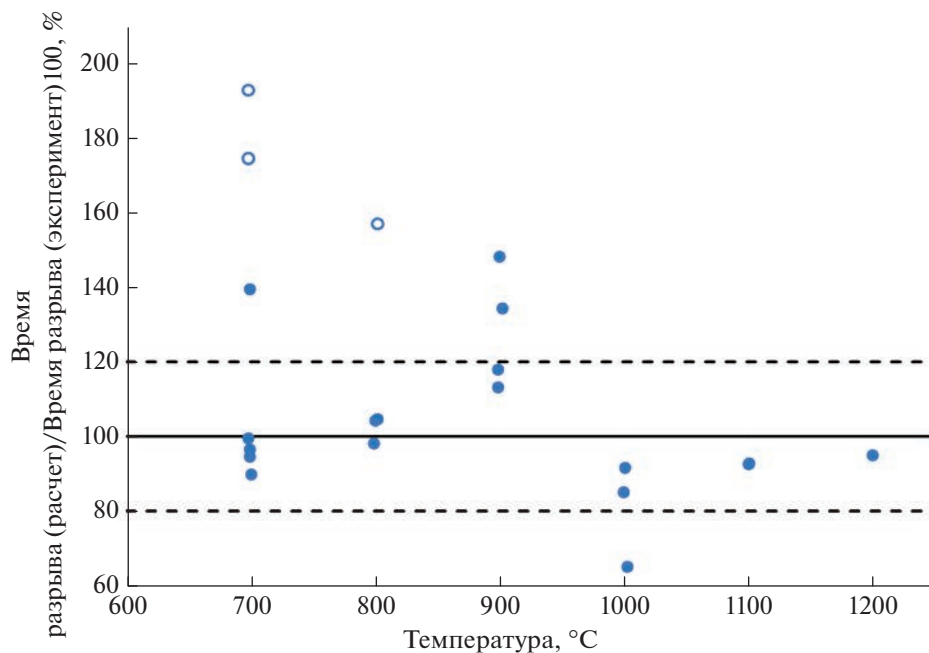


Рис. 5. Сравнение расчетного и измеренного времени разгерметизации предокисленных оболочек в изотермических экспериментах РУКИ при различных температурах (выколотыми маркерами показаны измерения для оболочек с максимальной толщиной оксида).

расчетным и экспериментальным временем разрыва в серии тестов с неоокисленными и предокисленными оболочками соответственно. Как следует из рис. 4, основное отличие расчета от эксперимента (20–90%) наблюдается для неоокисленных оболочек в интервале температур 799–902°C с явной тенденцией к переоценке измеренного времени разрыва. В области температур до 799°C и свыше 902°C отличие расчетного времени разрыва от экспериментального не превышает $\pm 20\%$. Согласно рис. 5, согласие между расчетным и экспериментальным временем разрыва предокисленных оболочек несколько хуже, чем для неоокисленных оболочек. Наибольшее отличие (60–90%) наблюдается для оболочек с максимальными толщинами оксидного слоя (28, 41 и 57 мкм, соответствующие точки помечены на рисунке выколотыми маркерами). Для остальных оболочек экспериментальное время разрыва воспроизводится с точностью $\pm 50\%$.

Важно отметить, что в расчетах воспроизводится наблюдаемая в экспериментах тенденция быстрого снижения перепада давления на оболочке, при котором происходит ее разрыв, с увеличением температуры от 649 до 951°C (рис. 6). Также воспроизводится разрыв оболочек при очень небольших перепадах давления в диапазоне температур 951–1201°C. При этом время разгерметизации оболочек в области более высоких температур не превышает 1200 с, тогда как в области низких температур (649–951°C) время разгерметизации оболочек твэлов может составлять от 100 до 7500 с (рис. 8), в зависимости от достигаемого перепада давления на оболочке. Также расчеты отражают зависимость максимального перепада давления до разрыва и времени разгерметизации от температуры в случае предокисленных оболочек (рис. 7, 9). На этих рисунках квадратными

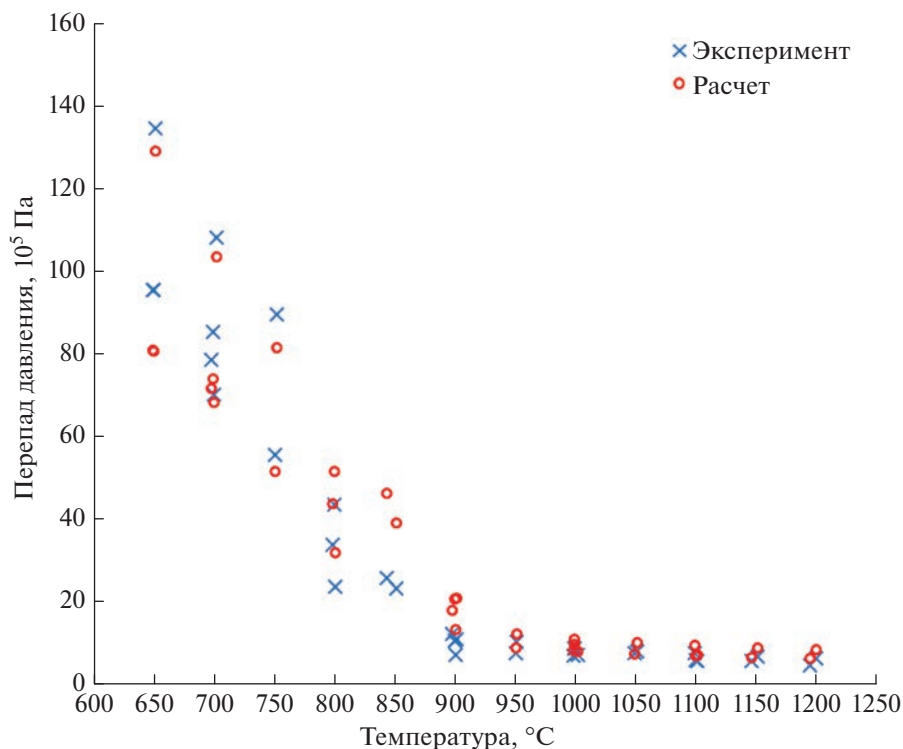


Рис. 6. Расчетная и измеренная зависимость перепада давления на оболочке от температуры оболочки в момент разрыва неокисленных оболочек в изотермических экспериментах PUKI.

маркерами обозначены измерения для оболочек с наибольшей толщиной оксидной пленки (28, 41 и 57 мкм).

2.5. Анализ погрешностей и неопределенностей

Оценка погрешности программ для ЭВМ δ_{model} выполняется на основе результатов валидации с использованием как экспериментов по отдельным процессам и явлениям, так и интегральных экспериментов, выполненных в условиях, приближенных к ожидаемым условиям на объекте моделирования (в данном случае – в активной зоне). Полученная оценка характеризует погрешность моделирования, связанную с упрощениями и аппроксимациями в физико-математических моделях, и учитывает неопределенности экспериментальных данных и результатов валидационных расчетов. Анализ неопределенности выполнялся по методике, описанной в [11]. Данная методика представляет собой адаптацию метода ASME [10] для верификации и валидации кодов вычислительной гидродинамики и теплопереноса к интегральным кодам. Целью анализа в данной работе является оценка погрешности δ_{model} расчета времени разрыва оболочек.

Метод ASME V&V 20 подразумевает проведение анализа неопределенностей с целью оценки погрешности модели δ_{model} , связанной с модельными упрощениями и предположениями. Конечным количественным результатом в данном подходе явля-

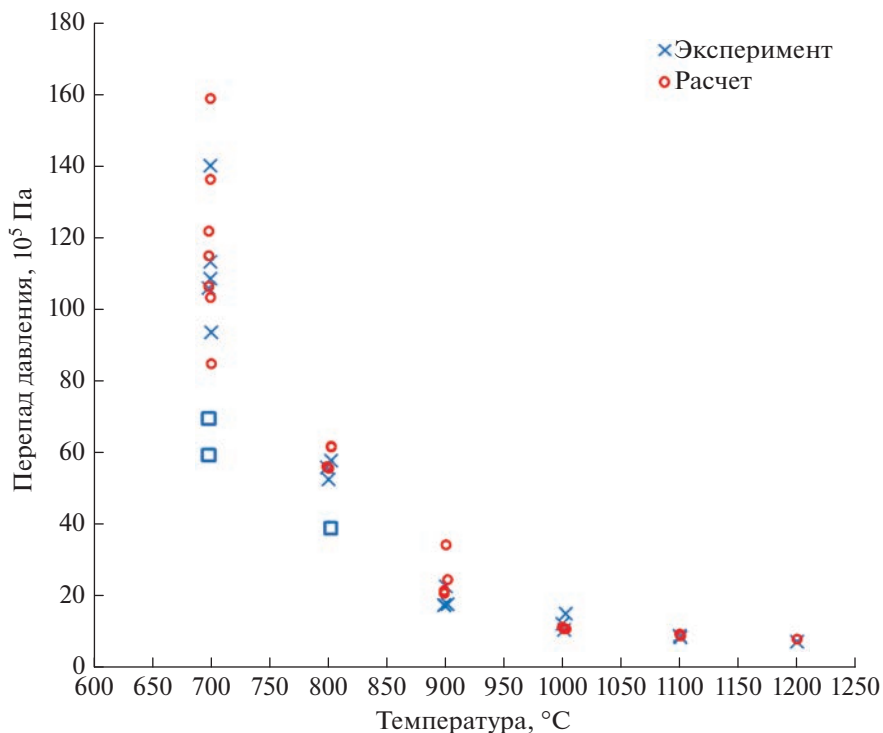


Рис. 7. Расчетная и измеренная зависимость перепада давления на оболочке от температуры оболочки в момент разрыва предокисленных оболочек в изотермических экспериментах PUKI.

ется интервал $(\bar{E}_{\%} - u_{\text{val},\%}^{\text{tot}}; \bar{E}_{\%} + u_{\text{val},\%}^{\text{tot}})$, в котором находится погрешность δ_{model} , где $\bar{E}_{\%}$ — средняя погрешность сравнения, характеризующая отклонение результата расчета от измерения (систематическая составляющая), а $u_{\text{val},\%}^{\text{tot}}$ — суммарная стандартная неопределенность валидации, учитывающая неопределенность входных данных и неопределенность измерений (случайная составляющая):

$$u_{\text{val},\%}^{\text{tot}} = \sqrt{u_{\text{input}}^2 + u_{\text{num}}^2 + u_D^2}, \quad (1)$$

где u_{input} , u_D и u_{num} — стандартные неопределенности входных данных, измерений и численной схемы соответственно. Стандартная неопределенность численной схемы u_{num} в данной работе не исследовалась.

В качестве источников неопределенности входных данных рассматривались неопределенность внутреннего диаметра оболочки в поле допуска, указанном производителем, а также неопределенности измерений внешнего диаметра оболочки, скорости нагружения и температуры оболочки твэла. Для экспериментов с предокисленными оболочками дополнительно учитывалась неопределенность измерения толщины слоя диоксида циркония. В качестве неопределенности измерения времени разрыва u_D принималось значение, которое соответствует точности предоставления данных в [1]. Численные значения неопределенностей обсуждались выше в разделе 1.2.

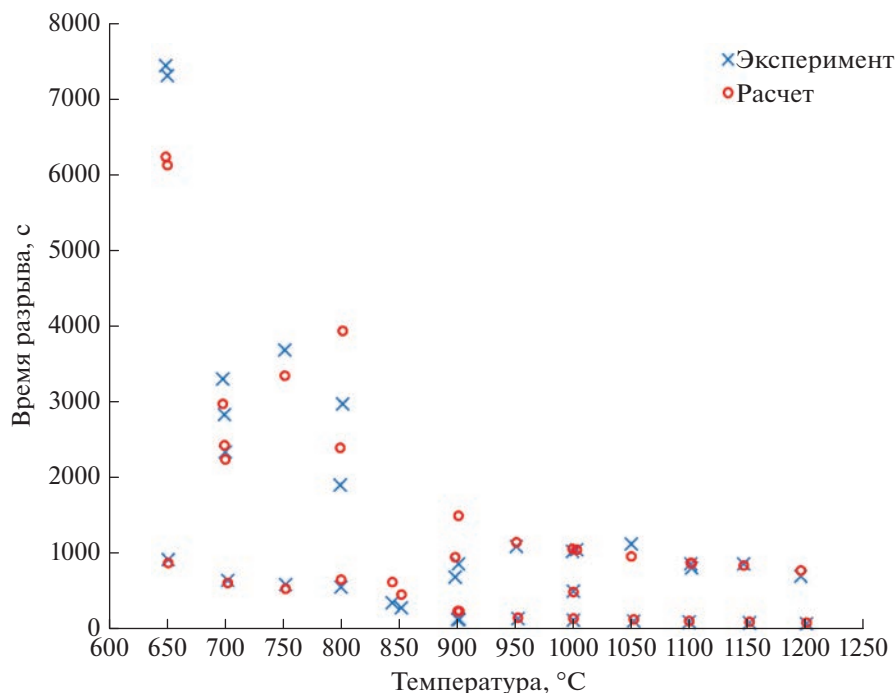


Рис. 8. Расчетная и измеренная зависимость времени разгерметизации неокисленных оболочек от температуры в изотермических экспериментах PUKI.

Перечень входных параметров, варьируемых при выполнении анализа неопределенности, параметры распределения случайной величины и пояснения к их выбору приведены в табл. 1. Для оценки погрешности сравнения $\bar{E}_{\%}$ и неопределенности входных данных u_{input} используется метод трансформирования распределений вероят-

Таблица 1. Параметры, варьируемые в рамках анализа неопределенностей, их диапазоны варьирования и законы распределения

Параметр	Номинальное значение (пояснение к выбору диапазона варьирования)	Диапазон варьирования	Закон распределения
Внутренний диаметр оболочки, мм	7.8 (поле допусков производителя)	[0, 0.06]	Нормальный
Внешний диаметр оболочки, мм	Измерение*	± 0.005	Равномерный
Скорость роста давления, МПа/с	Измерение	$\pm 1\%$	
Температура образца, °C	Измерение	$\pm 2^{\circ}\text{C}$	
Толщина слоя ZrO_2 , мкм	Измерение	± 0.05	

* Измеренное значение в конкретном тесте экспериментальной серии.

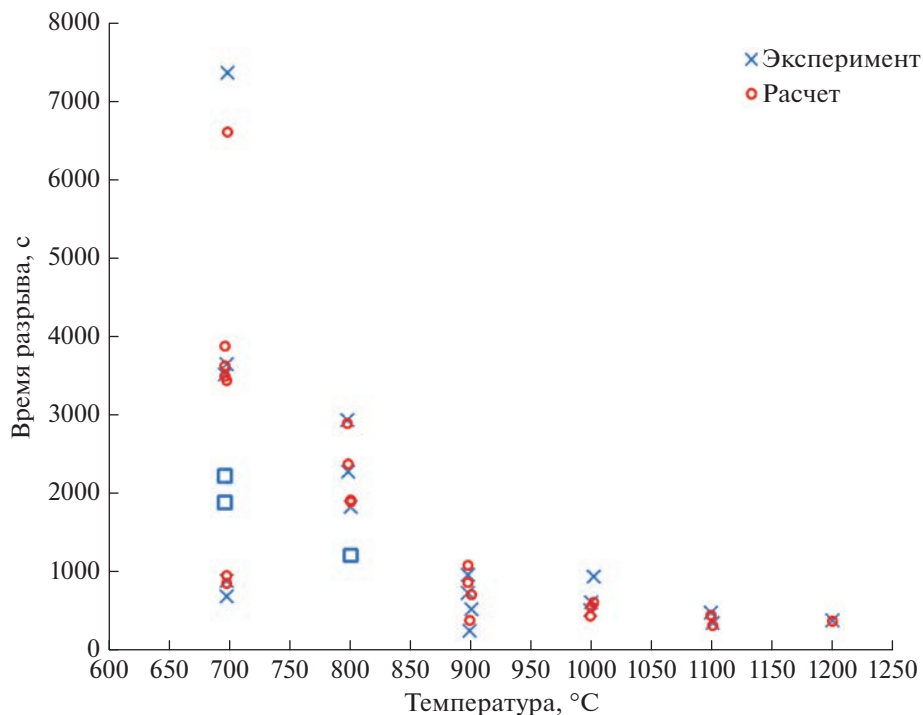


Рис. 9. Расчетная и измеренная зависимость времени разгерметизации предокисленных оболочек от температуры в изотермических экспериментах PUKI.

ностей входных величин в распределение вероятности выходной величины. В настоящей работе трансформирование распределений вероятностей осуществляется по методу Монте-Карло. Объем выборки для каждой экспериментальной точки составил 100 расчетов.

Результаты оценки погрешности прогнозного времени разрыва, полученные на основе анализа неопределенностей, приведены в табл. 2. Согласно полученным результатам для неокисленных оболочек, погрешность δ_{model} расчета времени разрыва оболочки лежит в интервале $(-15.2\%; 43\%)$, где средняя относительная ошибка $\bar{E}_{\%}$ составляет 13.9%, а стандартная неопределенность $u_{\text{val},\%}^{\text{tot}}$ валидации, учитывающая неопределенность входных параметров модели и погрешность измерений, равна 29.1%. Для предокисленных оболочек погрешность δ_{model} расчета времени разрыва

Таблица 2. Погрешность расчета времени разрыва оболочек на основе моделирования экспериментов с неокисленными и предокисленными оболочками

Эксперимент	$\bar{E}_{\%}$	$u_{\text{val},\%}^{\text{tot}}$	$\delta_{\text{model}}, \% \in$
Неокисленные оболочки	13.9	29.1	$[-15.2\%; 43.0\%]$
Предокисленные оболочки	13	32	$[-19.0\%; 45.0\%]$

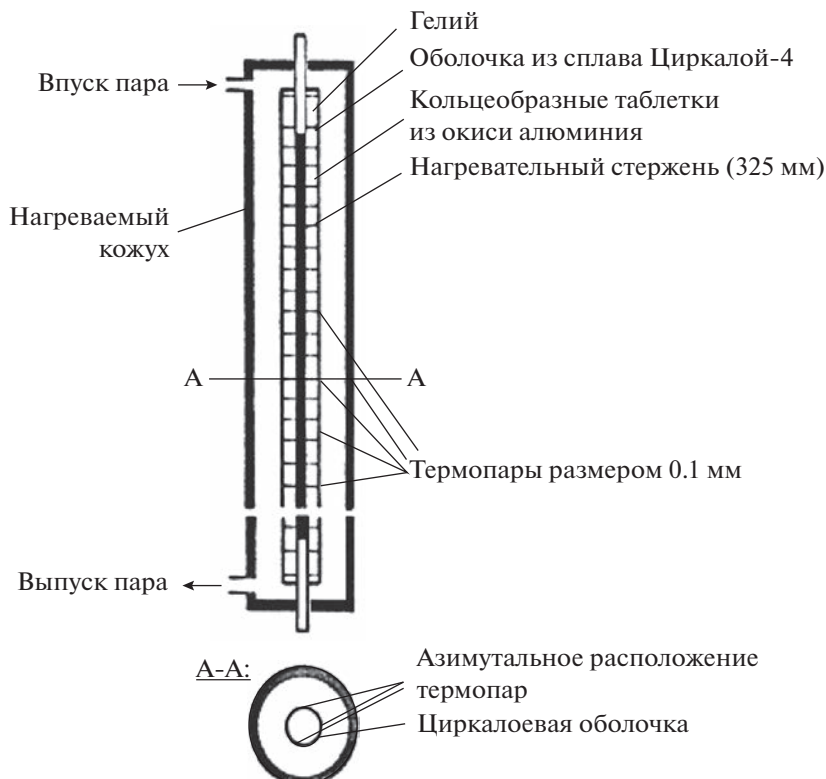


Рис. 10. Схема экспериментальной установки РЕВЕКА.

оболочки лежит в интервале $(-19\%; 45\%)$, где средняя относительная ошибка $\overline{E}_{\%}$ составляет 13%, а стандартная неопределенность $u_{\text{val},\%}^{\text{tot}}$ валидации равна 32%.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕРИИ ЭКСПЕРИМЕНТОВ РЕВЕКА

3.1. Краткое описание экспериментальной установки

Схема экспериментальной установки РЕВЕКА представлена на рис. 10 [5]. Замкнутая оболочка из сплава Циркалой-4 была помещена в нагреваемый цилиндрический кожух. Пар подавался внутрь кожуха сверху и выходил из нижней части кожуха. Внутри оболочки находились таблетки из окиси алюминия с нагреваемым стержнем, уложенным в осевые отверстия таблеток. Внутри замкнутой оболочки из сплава Циркалой-4 для создания избыточного давления закачивался гелий.

Номинальный внешний диаметр оболочки в исследуемых образцах составлял 11.9 мм, а толщина оболочки — 0.55 мм. Все образцы имели полную длину, равную 500 мм, а длина обогреваемого участка составляла около 325 мм.

Температура поверхности оболочки измерялась на различных уровнях и в трех азимутальных положениях с помощью бесчехловых платино-палладиевых термопар размером 0.1 мм. В некоторых тестах использовалась рентгенографическая высокоскоростная съемка для записи изменения диаметра трубки во времени.

Таблица 3. Результаты тестов РЕВЕКА и неопределенность измеренной температуры разрыва

Номер серии	Избыточное давление, Па	Температура разрыва, К	Количество тестов в серии	u_D , К
1	4.0E+06	1092.2	6	29.0
2	5.4E+06	1049.4	5	15.2
3	6.7E+06	1025.0	6	22.0
4	6.4E+06	1013.0	1	29.0
5	8.0E+06	998.3	6	4.2
6	9.4E+06	982.7	6	6.0
7	2.7E+06	1159.3	6	9.6
8	9.8E+06	976.0	1	29.0
9	4.7E+06	1067.0	1	29.0
10	2.3E+06	1174.0	1	29.0
11	1.3E+06	1232.0	2	29.0
12	6.5E+05	1283.0	2	29.0

3.2. Система измерений и источники неопределенностей

Ключевыми параметрами, которые использовались для валидации, являлись температура, при которой происходит разрыв оболочки, и время до разрыва. В [5] не указывается неопределенность измерения этих параметров, поэтому величина неопределенности была оценена на основе общедоступной информации и анализа экспериментальных данных.

Неопределенность температуры обуславливается двумя факторами. Во-первых, в неопределенность температуры разрыва вносит вклад величина инструментальной погрешности термопар. Во-вторых, вследствие небольшого неизбежного эксцентриситета в расположении таблеток окиси алюминия толщина газового зазора имеет некоторую неравномерность по азимуту, что приводит к азимутальной неравномерности температуры поверхности величиной несколько градусов. Таким образом, неопределенность (два стандартных отклонения) температуры поверхности определялась как

$$u_D = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}, \quad (2)$$

где σ_1 — стандартное отклонение, обусловленное неопределенностью показаний термопары; σ_2 — стандартное отклонение, обусловленное случайным отклонением толщины газового зазора. Величина неопределенности термопары ($2\sigma_1$) была принята равной 1.0°C. Неопределенность измеренной температуры оболочки вследствие неравномерности газового зазора по азимуту можно оценить на основе экспериментальных данных, поскольку эксперименты выполнялись сериями, отличающимися величиной избыточного давления, и большинство серий включало 6 повторений. Это дает возможность выполнить статистическую обработку и оценить величину σ_2 и u_D для

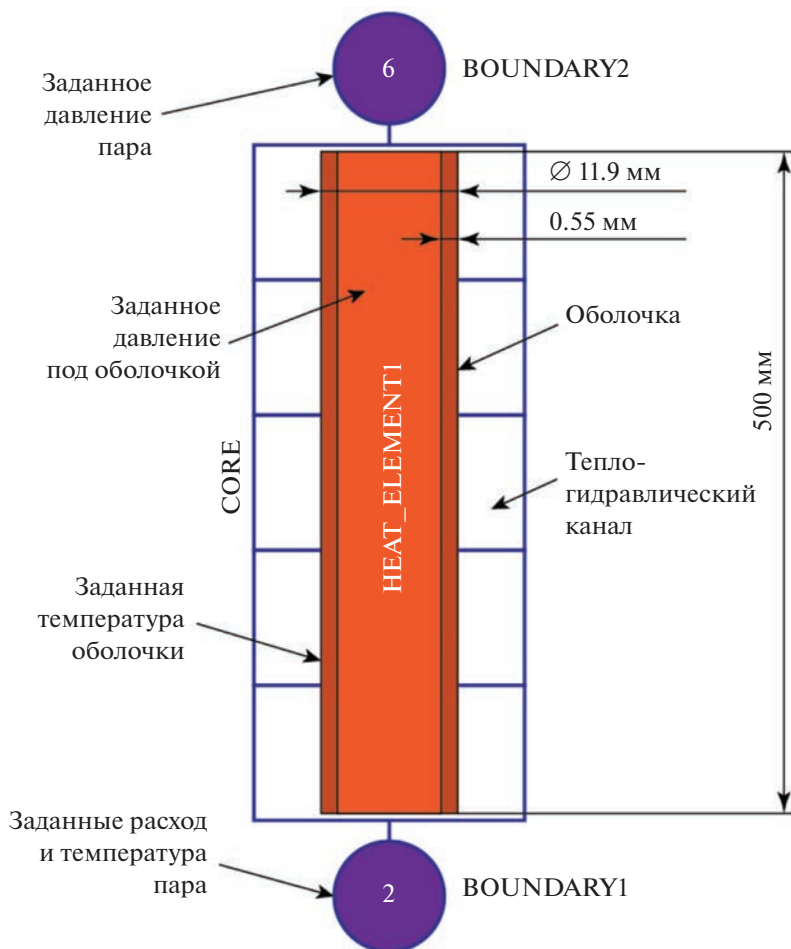


Рис. 11. Нодализационная схема установки.

каждой серии. В табл. 3 представлены значения средней температуры разрыва в каждой из серий и величины неопределенности. Как видно из табл. 3, каждая серия характеризуется своей величиной стандартного отклонения σ_2 . Для серий, состоящих из 1 и 2 тестов, в качестве σ_2 принималось максимальное значение 14.5 K.

Время до разрыва — это промежуток времени, который проходит с момента начала эксперимента (начало нагрева оболочки) до разрыва. Поскольку время в экспериментах обычно фиксируется довольно точно, в качестве неопределенности измеренного времени принималась точность представления времени в [5], равная ± 1 с. Эта величина интерпретировалась как два стандартных отклонения.

3.3. Расчетная модель для экспериментов REBEKA

Нодализационная схема экспериментальной установки приведена на рис. 11. Образец с замкнутым газовым объемом моделируется с помощью теплового элемента

“HEAT_ELEMENT1”, который позволяет использовать модели деформации и разрушения оболочки твэлов, а также окисления циркония паром, не задавая ядерное топливо внутри стержня.

Тепловой элемент сопряжен с гидравлическим каналом “CORE”, состоящим из пяти контрольных объемов. На вход в канал подается водяной пар с заданным расходом, а на выходе задано постоянное давление 0.1 МПа. Температура пара и температура внутренней поверхности оболочки в расчетной модели заданы одинаковыми и увеличиваются с постоянной скоростью, известной из эксперимента.

В расчетной модели были приняты следующие допущения. Поскольку внешний нагреваемый кожух в эксперименте использовался для выравнивания азимутального распределения температуры внешней поверхности образца, в осесимметричной расчетной модели этот кожух избыточен и поэтому не моделируется. Таблетки из окиси алюминия также не моделировались, вместо этого оболочка принималась пустотелой. Нагрев образца со стороны внешней поверхности осуществлялся путем изменения температуры пара, подававшегося в соответствующий гидравлический канал. Расход пара задавался достаточно большим, чтобы исключить недостаток пара для окисления оболочки (т.н. паровое голодание).

Начальная температура образца и пара внутри канала была задана равной 300°C в соответствии с условиями эксперимента. Давление внутри замкнутой полости в расчетной модели было постоянным и задавалось таким, чтобы избыточное давление равнялось экспериментальной величине. В описании эксперимента [5] номинальная скорость нагрева для всех тестов указывается равной 1 К/с. Фактическая скорость нагрева, заданная в расчетной модели, была определена как отношение величины нагрева ко времени до разрушения согласно данным [5] и принята равной 1.2 К/с.

3.4. Результаты референтных расчетов экспериментов

Результаты референтных расчетов в сравнении с результатами измерений приведены на рис. 12 и 13. Из рис. 12 видно, что при фиксированной скорости нагрева с повышением внутреннего давления температура разрушения уменьшается, что является ожидаемым результатом. Дополнительно, в качестве исследования влияния окисления на деформацию оболочек, были выполнены расчеты без учета окисления, результаты которых показаны на рис. 12 и 13 синими квадратными маркерами. Результаты расчетов показывают, что при скоростях нагрева около 1 К/с и давлении до 6.5×10^5 Па лучшее совпадение с экспериментом наблюдается при учете окисления в паровой среде. Этот результат обусловлен тем, что в ходе этого эксперимента оболочки успели обогатиться кислородом. При окислении скорость ползучести материала снижается по сравнению с неокисленными оболочками, это приводит к меньшим скоростям деформаций и, поскольку эксперименты неизотермические, к более высоким наблюдаемым температурам разрыва оболочек. Расчетная величина температуры разрыва оболочки находится в пределах интервала неопределенности измеренной величины как при низком перепаде давления, где проявляется эффект упрочнения оболочки вследствие окисления в паре (большее время окисления и выше температура разрыва), так и в области более высоких перепадов давлений, где эффект упрочнения не выражен. Максимальное относительное отклонение расчета от эксперимента составило 2.8%, среднее относительное отклонение составило 0.9%.

Тенденция к уменьшению времени до разрыва при увеличении избыточного давления также воспроизводится в расчете (рис. 13). Как и для температуры разрыва оболочки, при избыточном давлении до 6.5×10^5 Па на расчетное время разрыва влияет

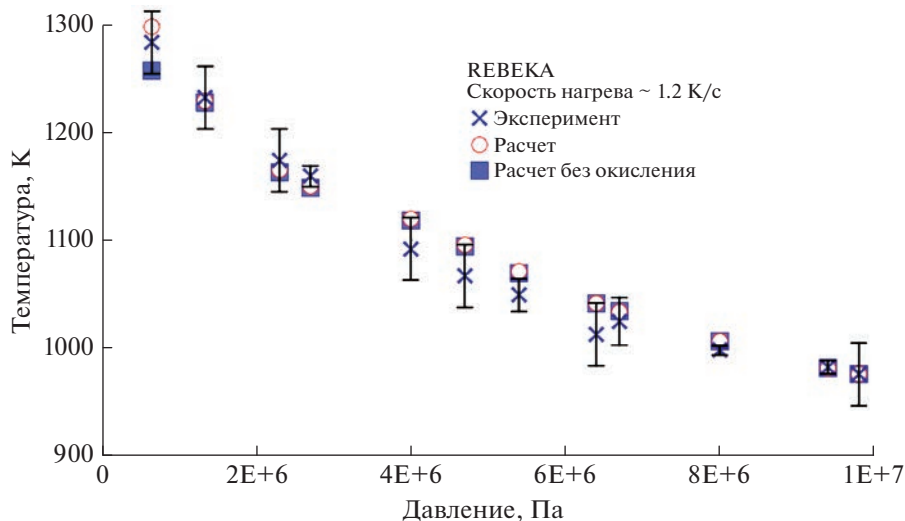


Рис. 12. Сравнение расчетной и измеренной температур разрыва оболочки в зависимости от избыточного давления в серии REBEKA.

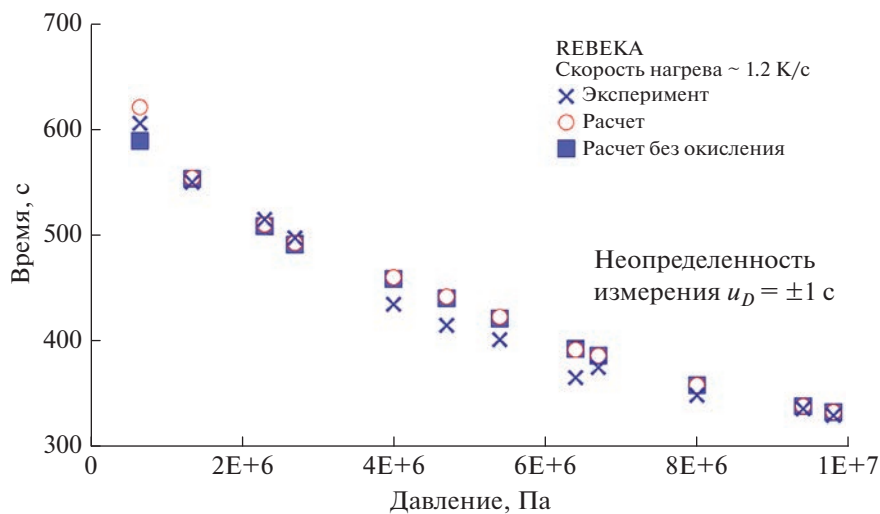


Рис. 13. Сравнение расчетного и измеренного времени до разрыва оболочки в зависимости от избыточного давления в серии REBEKA.

окисление циркония в паровой среде: при включенной модели окисления разрыв оболочки происходит позже, чем в расчетах с выключенной моделью окисления. Согласно результатам референтных расчетов, максимальное относительное отклонение расчетного времени до разрыва оболочки составило 7.2%, а средняя величина отклонения равна 2.8%.

Таблица 4. Варьируемые параметры в расчетах экспериментальной серии REBEKA

Параметр	Номинальное значение	Стандартное отклонение	Диапазон варьирования	Пояснения к выбору	Закон распределения
Отклонение давления под оболочкой	0	0.1×10^5 Па	$\pm 0.2 \times 10^5$ Па	Точность представления данных в [5]	Нормальный
Скорость нагрева	1.2	0.058	(1.0; 1.2)	Неопределенность граничных условий	Равномерный

Таблица 5. Погрешность расчета времени разрыва и температуры оболочки в экспериментальной серии REBEKA

Параметр	$\bar{E}_{\%}$	$u_{val,\%}^{tot}$	$\delta_{model}, \%$
Температура разрыва оболочки, К	0.7	1.7	[−1.0%; 2.4%]
Время разрыва оболочки, с	11.3	6.6	[4.8%; 17.9%]

3.5. Анализ погрешностей и неопределенностей

Анализ неопределенности результатов моделирования тестов REBEKA выполнялся по той же методике, которая была использована при расчете экспериментов PUKI.

В качестве источников неопределенности входных данных рассматривались величина избыточного давления и скорость нагрева. Перечень входных параметров, варьируемых при выполнении анализа неопределенности, параметры распределения случайной величины и пояснения к их выбору приведены в табл. 4. В [5] не приводятся данные по неопределенности измеренного избыточного давления под оболочкой. Исходя из точности представленных в [5] данных, погрешность давления была принята равной $\pm 0.2 \times 10^5$ Па. Скорость нагрева варьировалась в интервале от номинального значения 1 К/с, указанного в [5] одинаковым для всех тестов, до фактического значения, вычисленного как отношение величины нагрева ко времени до разрушения согласно данным [5].

Результаты оценки погрешностей результирующих параметров с учетом анализа неопределенности приведены в табл. 5. Согласно полученным результатам, погрешность δ_{model} расчета температуры разрыва оболочки лежит в интервале (−1.0%; 2.4%), где средняя относительная ошибка $\bar{E}_{\%}$ составляет 0.7%, а стандартная неопределенность $u_{val,\%}^{tot}$ валидации равна 1.7%. Погрешность расчета времени разрыва оболочки находится в интервале (4.8–17.9%), где $\bar{E}_{\%}$ равна 11.3%, а $u_{val,\%}^{tot}$ равна 6.6%.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Валидация кода СОКРАТ-B1/B2 на экспериментальной серии PUKI продемонстрировала, что модель термомеханики оболочек твэлов CROX позволяет корректно описывать момент разрыва как неокисленных, так и предокисленных оболочек твэлов ВВЭР из сплава Э110 в диапазоне температур 650–1200°C. В диапазоне температур 799–902°C модель демонстрирует тенденцию к переоценке измеренного времени разрыва неокисленных оболочек, которая достигает 20–90%. Стоит отметить,

что в результате валидации модели CROX для условий аварии с большой течью теплоносителя при такой же комбинации перепада давления и температуры (интегральный эксперимент IFA650.11 [13]) погрешность расчета времени разрыва оболочек Э110 с учетом анализа неопределенности составила от 6 до 14%, при этом систематическое отклонение перепада давления (~50 атм) и температуры оболочки (~840°C) в момент разрыва оболочки в согласованном расчете составило менее 1%. Поэтому требуется дополнительное исследование погрешности расчета времени разрыва оболочек Э110 в диапазоне температур 800–900°C с использованием альтернативных прецизионных экспериментальных данных, воспроизводящих прототипные условия нагружения.

В остальной части температурного диапазона серии PUKI погрешность модели укладывается в интервал $\pm 20\%$. Полная погрешность модели δ_{model} , учитывающая погрешность измерений и неопределенность входных параметров, лежит в интервале $[-15\%; 43\%]$, то есть, в целом модель демонстрирует тенденцию к переоценке времени разрыва неокисленных оболочек твэлов из сплава Э110.

Применительно к предокисленным оболочкам твэлов из сплава Э110 погрешность модели очень близка к погрешности для неокисленных оболочек и составляет $[-19\%; 45\%]$. Погрешность, выходящая за эти границы (до 90%), была получена в трех тестах для наиболее сильно окисленных оболочек с толщиной оксидного слоя 28–57 мкм. Стоит отметить, что в имеющихся данных по экспериментам PUKI не предоставлены данные по погрешностям основных измерений, в том числе измерений толщины диоксида циркония, а число тестов с сильно окисленными оболочками недостаточно для однозначных выводов о погрешности модели. Для более надежной оценки погрешности модели в этих условиях (для сильно окисленных оболочек) также необходимо проведение дополнительных валидационных расчетов на альтернативных прецизионных экспериментальных данных.

В расчетах экспериментов REBEKA по раздутию и разрыву оболочек твэлов из сплава циркалой-4 продемонстрировано, что при совместной работе с моделью окисления PROF модель CROX качественно верно моделирует зависимость температуры и времени разрыва от избыточного давления в диапазоне температур разрыва 700–1000°C и избыточных давлений 6.5×10^5 – 98×10^5 Па в условиях окисления в паре. Погрешность расчета температуры разрыва оболочки, учитывающая погрешность измерений и неопределенность входных параметров, лежит в интервале $(-1.0\%; 2.4\%)$, т.е. при постоянном давлении и постоянной скорости нагрева модель демонстрирует высокую точность расчета температуры разрыва оболочки. Погрешность расчета времени разрыва оболочки находится в интервале $(4.8\%; 17.8\%)$, что подтверждает тенденцию к переоценке времени разрыва, полученную в расчетах серии PUKI.

Стоит также отметить, что в прототипных экспериментах REBEKA максимальная расчетная толщина образовавшегося в результате реакции окисления диоксида циркония до момента разрыва оболочки не превышает 10 мкм. Также и при моделировании интегрального эксперимента CORA-15 при помощи СОКРАТ разрыв оболочек имитаторов твэлов происходил при температуре 985 К еще до формирования защитного слоя диоксида циркония [14]. Важно также отметить, что и эксперименты REBEKA и CORA-15 выполнялись с применением в качестве материала оболочек зарубежного сплава циркалой-4, который по своим свойствам не имеет принципиальных отличий от отечественного сплава Э-110. Поэтому три теста в серии PUKI с большими толщинами на предокисленных образцах можно рассматривать как недостаточно представительные относительно условий, ожидаемых в авариях с течью теплоносителя.

В экспериментах ОКБ “ГИДРОПРЕСС” по раздутию и разрыву оболочек твэлов из отечественного сплава Э110, ранее использовавшихся для валидации СОКРАТ [12], отмечались значительные погрешности измерения перепада давления и температуры. При использовании методики валидации, учитывающей погрешность измерения реперных экспериментальных данных, это обусловило большую расчетную погрешность модели. Поэтому большая погрешность измерений сильно ограничивает их использование в задачах валидации моделей и интегральных программ для ЭВМ. Рассмотренные в данной статье условия экспериментов PUKI с оболочками из отечественного сплава Э110 являются специфичными для аварийных условий на РУ ВВЭР в части нагружения оболочек твэлов, т.е. могут рассматриваться в качестве дополнительного, но не основного источника реперных данных для оценки погрешности модели. В экспериментах BALL [1] нагружение оболочек из Э110 было прототипно, однако исследуемый диапазон давлений нагружения был очень узок, и максимальное давление в диапазоне ограничивалось величиной 40×10^5 Па. Еще одна экспериментальная серия с оболочками из Э110 – SONYRA [1] – так же как и PUKI, представляет собой непрототипные изотермические тесты. Отметим, что в данных по исследованию процессов раздутия и разрыва оболочек твэлов, приводимых в [1], авторами не указываются неопределенности измерений определяющих параметров.

Для валидации термомеханических моделей оболочек из сплава Э110 могут использоваться данные отечественных экспериментов по исследованию деформационного поведения оболочек из Э110, выполнявшихся в 1980–2000-х гг. в НИЦ КИ (установка “Март”) [15], ВИАМ, НИИАР [16], НПО “Луч” (установка “Параметр”) [17], ВНИИНМ [18], ФЭИ [19]. Однако сведения об этих экспериментах в основном ограничены внутренними отчетами, а объем данных, приводящихся в открытых публикациях, не удовлетворяет современным требованиям к валидации программ для ЭВМ, поэтому использование этих данных для валидации в настоящее время не представляется возможным.

Таким образом, можно утверждать, что применительно к оболочкам из сплава Э110 сохраняется дефицит прецизионных и представительных экспериментов по исследованию термомеханического поведения в условиях аварий на РУ ВВЭР, причем не только экспериментов по исследованию отдельного явления деформации и разрыва оболочки, но и в особенности интегральных экспериментов. В этой связи важной задачей является инвентаризация всех имеющихся экспериментальных данных для сплава Э110, их квалификация и оформление в виде общеотраслевой базы экспериментальных данных, которые могли бы использоваться для валидации термомеханических моделей и интегральных программ для ЭВМ, а также, в случае необходимости, для определения сценариев дополнительных экспериментов. В качестве положительного примера можно привести экспериментальные данные для зарубежного сплава циркалой-4. Для этого сплава накоплен большой объем экспериментальных данных с высоким качеством измерительной базы, моделирующих прототипные условия нагружения оболочек твэлов в запроектных авариях с потерей теплоносителя на реакторах типа PWR (REBEKA, CORA-15, QUENCH-LOCA-L1). Погрешность определения времени разрыва оболочки твэла из Zry-4 в расчетах этих экспериментов при помощи СОКРАТ оказывается существенно меньше, чем в экспериментах с оболочками из сплава Э110, несмотря, как было отмечено ранее, на отсутствие принципиальных отличий между этими двумя материалами. Так, например, при моделировании интегрального эксперимента CORA-15 при помощи СОКРАТ максимальная погрешность времени разрыва оболочек имитаторов твэлов не превышает 2% [14].

Аналогично, другой важной задачей является проведение на современном экспериментальном уровне прецизионных испытаний оболочек твэлов из новых отечественных сплавов, имеющих более высокую коррозионную стойкость и устойчивость к окислению в аварийных ситуациях, и формирование отраслевого банка квалифицированных данных. К таким сплавам можно отнести сплав Э110М с увеличенным содержанием железа, сплав Э110Г на основе губчатого циркония, сплав Э110 с защитным слоем хрома, а также сплав 42ХНМ, применяемый в реакторных установках малой мощности (РИТМ-200).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Perez-Feró E. et al.* Experimental database of E110 Claddings under Accident Conditions, Report EK-FRL-2011-744-01/04, MTA EK, Budapest, April 2012.
2. *Hózer Z. et al.* Ballooning Experiments with VVER Cladding, Nuclear Technology, 2005. 152:3. P. 273–285.
3. *Stuckert J. et al.* Results of the QUENCH-LOCA Experimental Program at KIT, Journal of Nuclear Materials, 2020. P. 534.
4. <https://www.oecd-neo.org/tools/abstract/detail/nea-1799>, ссылка активна по состоянию на 29.08.2022.
5. *Markiewicz M.E., Erbacher F.J.* Experiments on Ballooning in Pressurized and Transiently Heated Zircaloy-4 tubes (KFK-4343). Germany, 1988.
6. *Veshchunov M.S., Kiselev A.Ye. et al.* “SVECHA” Code Package, Modeling of Core Degradation Phenomena at Severe Accidents // Proceedings of NUREG-7, 1995. V. 3. P. 1914–1929.
7. *Yamshchikov N., Boldirev A., Komarov O.* The Modelling of Fuel Cladding Deformation Behavior under Severe Accident, Preprint NSI-2-93, Nuclear Safety Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 1993.
8. *Воробьев Е.В.* Кинетика ползучести и неустойчивость циркониевых труб под давлением. Дис. канд. физ.-мат. наук, НИТУ МИСиС, Москва, 2019 г.
9. *Маркелов В.А.* Совершенствование состава и структуры сплавов циркония в обеспечение работоспособности твэлов, ТВС и труб давления активных зон водоохлаждаемых реакторов с увеличенным ресурсом и выгоранием топлива, Дис. д.т.н., Москва, 2010 г.
10. Standard for Verification and Validation in Computational Fluid Dynamics and Heat Transfer – V&V 20, ASME, 2009.
11. *Долганов К.С., Киселев А.Е., Рыжов Н.И., Томащук Д.Ю., Филиппов М.Ф., Чалый Р.В., Юдина Т.А., Шевченко С.А., Яшников Д.А., Козлова Н.А.* Оценка возможности кода СОКРАТ моделировать процессы растворения диоксида уранового топлива жидким цирконием, Атомная энергия, 2018. Т. 125. № 2. С. 79–85.
12. *Тарасов А.Е., Чалый Р.В., Томащук Д.Ю., Долганов К.С., Киселев А.Е., Семишкин В.П., Пантюшин С.И., Быков М.А.* Исследование термомеханического поведения оболочек твэлов ВВЭР с помощью кода СОКРАТ/В1. – ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов, 2019. № 2.
13. Fuel Modelling in Accident Conditions (FUMAC). IAEA TECDOC-1889, Vienna, 2019.
14. *Stuckert J., Austregesilo H., Bals Ch., Hollands Th., Kiselev A., Tomashchik D., Yudina T.* Post-test analyses of the CORA-15 bundle test with the system codes ATHLET-CD and SOCRAT, NED. 2019. T. 342. P. 320–335.
15. *Тутнов А.А., Тутнов Ал.А., Алексеев Е.Е.* Верификация программного комплекса PULSAR+, Атомная энергия, 1997. Т. 83. № 2.
16. *Asmolov V., Yegorova L., Kaplar E., Lioutov K., Smirnov V., Prokhorov V. and Goryachev A.* Development of Data Base with Mechanical Properties of Un- and Preirradiated VVER cladding, Proceedings of the 25th Water Reactor Safety Information Meeting, Bethesda, Maryland, USA. NUREG/CP-0162, 1998. V. 2.
17. *Афанасьев П.Г., Денискин В.П., Константинов В.С. и др.* Моделирование поведения 37-ми твэльной сборки в авариях большой течи на стенде ПАРАМЕТ, Сб. трудов 2-ой Всероссийской научно-технической конференции “Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР”, Подольск, 2001.
18. *Соляный В.И., Андреева-Андреевская Л.Н., Библиашвили Ю.К., Салатов А.В., Тонков В.Ю.* Блокировка проходного сечения ТВС реактора ВВЭР при аварии с потерей теплоносителя. М.: Атомная энергия, 1989. Т. 66. № 6. С. 383–388.
19. *Trojanov V. et al.* Experimental study of the core structure behaviour in LOCA conditions, Proceedings of a Technical Committee meeting held in Dimitrovgrad, Russian Federation, 9–13 October 1995, IAEA-TECDOC-921. Vienna, 1996. P. 153–163.

Numerical Investigation of Cladding Ballooning and Burst in VVER and PWR Fuel Rods in Experiments with Various Loading Conditions

K. S. Dolganov^a, A. E. Tarasov^{a, *}, A. V. Kapustin^a, and D. Yu. Tomashchik^a

^a *Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

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

The paper presents the results of numerical modeling for ballooning and burst of fuel rods claddings made of domestic and foreign alloys. The integral code SOCRAT-V1/V2 is used as a means of modeling. The uncertainty analysis of the calculation results to input uncertainties of the temperature and pressure measurements was performed. The modeling results demonstrate a good qualitative and quantitative compliance with measured times of cladding failure under partial core uncover conditions. The results of SOCRAT-V1/V2 validation evidence on the importance of performing new experiments for domestic fuel rod cladding ballooning and burst.

Keywords: fuel rod, cladding burst, thermal mechanics, SOCRAT, validation, uncertainty analysis