

ОПИСАНИЕ МОДЕЛЕЙ ГОРЕНИЯ НАТРИЯ В ПОМЕЩЕНИЯХ АЭС С РУ БН ИНТЕГРАЛЬНОГО КОДА ЕВКЛИД/V2 И РЕЗУЛЬТАТЫ ИХ ВАЛИДАЦИИ

© 2022 г. О. В. Тарасов^{а, *}, Д. А. Назаров^а, Д. С. Сеницын^а, Н. А. Мосунова^а, А. А. Сорокин^{а, b, **}

^аИнститут проблем безопасного развития атомной энергетики РАН,
Большая Тульская ул., д. 52, Москва, 115191 Россия

^бОбъединенный институт высоких температур РАН,
Ижорская ул., д. 13, стр. 2, Москва, 125412 Россия

*e-mail: olegtarasov79@gmail.com

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

Поступила в редакцию 18.03.2021 г.

После доработки 30.03.2021 г.

Принята к публикации 21.04.2021 г.

Представлены результаты валидации второй версии интегрального кода ЕВКЛИД (ЕВКЛИД/V2) с расширенными возможностями относительно его первой версии. Внедренные в код дополнительные модели включают, в частности, горение натрия, образование и перенос аэрозолей горения натрия и продуктов деления в помещениях АЭС в случае тяжелых аварий в реакторе на быстрых нейтронах. Настоящая работа посвящена результатам валидации кода для обоснования его применимости при расчете аварий с разгерметизацией контура реакторной установки на быстрых нейтронах (РУ БН) с натриевым теплоносителем, включая горение натрия и перенос аэрозолей продуктов его сжигания. Представлена информация о внедренных в код моделях и экспериментальных данных, использованных для валидации. Показано, что доступных экспериментальных данных достаточно для валидации кода в части указанных выше явлений. Изложены результаты валидации модели на экспериментах, проведенных на установках SOLFA и CSTF с горением натриевой лужи в различных условиях: с избытком кислорода и с кислородным голоданием; без пополнения и с пополнением натрием из свободно падающей струи; без источника пара (имитация испарения из бетона) и с ним; в замкнутом помещении и в помещении с вентиляцией. В рамках разработанной в ИБРАЭ процедуры анализа неопределенности и чувствительности проведено обоснование для основных расчетных параметров: температуры натриевой лужи, скорости ее горения, концентрации аэрозолей горения. Показано, что отклонения этих величин от экспериментальных значений могут быть объяснены неопределенностью входных данных. Обоснована применимость кода ЕВКЛИД/V2 для моделирования горения натрия и дальнейших аэрозольных явлений с продуктами его горения в помещениях АЭС с РУ БН.

Ключевые слова: валидация, реактор на быстрых нейтронах, натриевый теплоноситель, ЕВКЛИД/V2, HYDRA-IBRAE/LM, AEROSOL/LM, моделирование, интегральный код, аэрозоль

DOI: 10.1134/S0040363622010040

В настоящее время проводятся верификация и валидация разрабатываемой в ИБРАЭ РАН второй версии интегрального кода ЕВКЛИД (ЕВКЛИД/V2), предназначенного для моделирования режимов нормальной эксплуатации и ее нарушений нормальной эксплуатации, включая аварии на атомных станциях с реакторными установками на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем (натриевым, свинцовым или свинцово-висмутовым). По сравнению с первой версией кода [1, 2], вторая включает возможность моделирования тяжелых аварий, в том числе процессы горения натрия в помещениях

АЭС, разрушение активной зоны реактора [3] и взаимодействие расплава кориума и свинца с бетоном. При доработке кода предполагается снять ограничение в аттестационном паспорте для первой версии кода на его применение, в частности расчет горения натрия (Na).

Целью данной работы является представление моделей и результатов валидации ЕВКЛИД/V2, в том числе моделирование процессов горения натрия, образование и перенос аэрозолей продуктов деления, а также горение Na в помещениях АЭС с реакторной установкой с натриевым теплоносителем.

Валидация второй версии кода при натриевых пожарах проведена на результатах, полученных на экспериментальных установках и одном реальном пожаре на реакторной установке. Валидируемые модели горения натрия в помещениях АЭС реализованы в модуле AEROSOL/LM интегрального кода [4].

ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ МЕХАНИЗМЫ ОБРАЗОВАНИЯ АЭРОЗОЛЕЙ ГОРЕНИЯ НАТРИЯ

На рис. 1 представлена схема физико-химических явлений, происходящих при аварии с горением натрия и переносом продуктов деления (ПД) в помещениях РУ БН. В качестве исходного события рассматривается разрыв трубы I контура с натриевым теплоносителем. В точке разрыва возникает течь, из которой льется свободно падающая струя натрия. Натрий частично сгорает в струе, частично горит в луже, в результате чего в атмосферу выходят аэрозоли Na_2O , Na_2O_2 и NaOH , содержащие радиоактивные ПД. Возникают конвективные вихри, которые разносят аэрозоли по помещению. При повышении средней температуры в помещениях газ расширяется и его “излишки” выходят вместе с аэрозолями ПД в окружающую среду через щели в стенах. Горячая лужа натрия прогревает бетонный пол, что приводит к выходу пара воды H_2O и диоксида углерода CO_2 из бетона (при отсутствии стальной облицовки возможно также и его разъедание натриевой лужей вследствие химического взаимодействия). Вышедший из бетона пар H_2O проходит через лужу натрия, образуя газовые пузыри. В результате химической реакции с натрием пар отдает ему свой кислород, что приводит к поступлению горючего газа H_2 в атмосферу аварийного помещения.

Повышение температуры и давления газа в помещениях РУ БН при натриевом пожаре зависит от его местоположения: в струе, в луже на полу или одновременно в обоих местах. При прочих равных условиях горение натрия в струе является более эффективным источником выделения тепловой энергии вследствие существенно большей поверхности взаимодействия натрия с воздухом для капель, нежели для плоской поверхности при горении в луже.

Выход ПД в атмосферу помещения зависит от их типа (инертные газы, летучие радионуклиды и т.д.), массы радионуклидов, накопленных в натрии до аварии, и характера развития аварии. Например, изотопы инертных газов выходят в атмосферу помещения практически мгновенно по сравнению с временем развития пожара, а летучие и слаболетучие радионуклиды задерживаются в натрии, и их выход определяется массой сгорев-

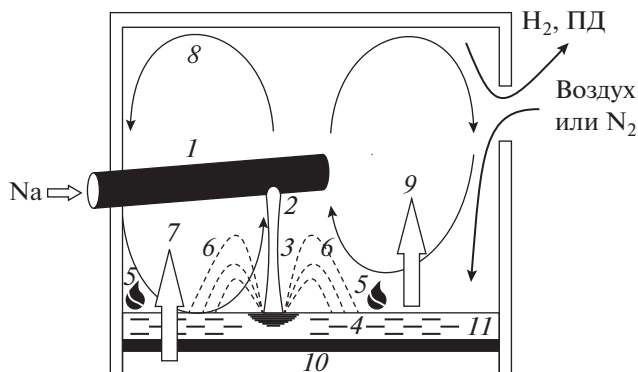


Рис. 1. Схема явлений переноса тепла и продуктов горения натрия при аварии с разрывом участка трубопровода с жидким натрием.

1 – труба с натриевым теплоносителем; 2 – течь натрия; 3 – свободно падающая струя; 4 – натриевая лужа; 5 – горение в луже; 6 – горение в струе; 7 – выход H_2O и CO_2 из бетона, реакция с лужей; 8 – конвективные вихри; 9 – выход аэрозолей Na и ПД из лужи; 10 – бетонный пол; 11 – стальная облицовка

шего Na . Основные параметры и физические явления, определяющие скорость горения натрия, источник аэрозолей продуктов горения и продуктов деления в атмосферу, следующие:

- при горении натрия в струе:

начальный диаметр капель в струе натрия;
горение капель в паровоздушной среде;
локальный расход кислорода в зоне струи;
теплообмен между горячей струей натрия и газом в помещении;

перенос аэрозолей продуктов горения струи натрия;

аэрозольные явления (коагуляция, осаждение, перенос, химические реакции) ПД в атмосфере помещения;

- при горении натрия в луже:

начальные параметры лужи натрия;
подвод кислорода к поверхности лужи, определяющий скорость ее горения;

теплообмен с окружающим газом и стенами помещения;

аэрозольные явления с продуктами горения Na и ПД.

Кроме того, важной, но не затрагиваемой в данной работе проблемой является выделение остаточного тепла вследствие распада радионуклидов в составе газов и аэрозолей в атмосфере помещений и в слое отложений на поверхностях. В этом случае действие источника запасенной радионуклидами энергии будет зависеть от их состава и продолжится существенно дольше (дни, недели и месяцы) по сравнению с временем развития натриевого пожара (примерно несколько десятков минут).

Поэтому после окончания пожара действие источника остаточного тепла будет длиться еще долгое время, которое будет зависеть от состава радионуклидов в отложениях и типа излучения.

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МОДЕЛЕЙ ГОРЕНИЯ НАТРИЯ, РЕАЛИЗОВАННЫХ В КОДЕ

В составе кода ЕВКЛИД/V2 за моделирование процессов, связанных с продуктами деления и аэрозолями, отвечает модуль AEROSOL/LM. В его последнюю версию были внедрены следующие модели:

испарения натрия с поверхности в условиях естественной конвекции;

выхода растворенных ПД из натрия с учетом его испарения (модифицированная модель);

горения натрия в струе в феноменологическом и кинетическом приближениях;

горения натрия в луже при радиационном и конвективном теплообмене пламени с окружающим газом и стенами помещения и диффузионного подвода кислорода к пламени из окружающего газа (усовершенствованная модель).

В интегральной конструкции реакторов на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем предполагается наличие газовой полости с аргоном над свободным объемом натрия. В газовом объеме пары натрия могут конденсироваться на более холодных, по сравнению с ними, стенках газового контура, а также образовывать взвешенные аэрозольные частицы в результате нуклеации. Это может повлиять на работоспособность элементов реакторной установки и стать источником химических и радиоактивных аэрозолей из газового контура в атмосферу помещений станции через неконтролируемые протечки и систему вентиляции. Поэтому необходимо учитывать данное явление для обоснования безопасности разрабатываемых АЭС с реакторами на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем.

Возможность образования аэрозолей в газовой полости и их интенсивность зависят от скорости испарения жидкого натрия с поверхности бассейна. Доработка модуля обусловлена необходимостью учитывать процесс испарения натрия со свободной поверхности в объем защитного газа путем использования диффузионного приближения, основанного на аналогии процессов тепло- и массообмена, и принимать во внимание этот процесс при моделировании выхода ПД из расплава натрия в защитный газ [5, 6].

Влияние эффекта испарения натрия на дегазацию летучих ПД из него в газовую полость рассматривается в двухплечном приближении. При этом учитывается наличие двух диффузионных пограничных слоев (пленок) по обе стороны от поверх-

ности раздела жидкой фазы и газовой среды и, соответственно, двух согласованных между собой диффузионных потоков примеси через эти слои [6]. При испарении натрия меняется условие равновесия для концентрации растворенной примеси на поверхности раздела газ – натрий. В этом случае выход ПД определяется не только диффузионным механизмом, но и переносом ПД вместе с парами натрия пропорционально скорости его испарения.

Наиболее простым для создания модели горения натрия в струе является феноменологическое приближение с использованием зависимости экспериментальных данных для средней скорости выгорания натрия B , кг/с, в струе от основных параметров [7], как, например, в коде КУПОЛ-БР [8]:

$$B = 0.228W_{\text{Na}}H^{1.28}C_{\text{O}_2}, \quad (1)$$

где W_{Na} – скорость истечения струи натрия, кг/с; H – эффективная высота источника относительно пола, м; C_{O_2} – текущая мольная доля кислорода в воздухе (например, 0.21 при нормальных условиях).

Более сложное – кинетическое приближение, в котором моделируется:

расход кислорода на горение, лимитируемый его диффузией к фронту пламени;

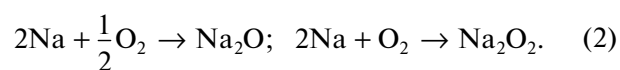
соответствующий расход Na с учетом стехиометрии рассматриваемых реакций горения;

площадь и глубина лужи натрия в процессе выгорания;

теплообмен лужи и фронта пламени с газом и поверхностями.

Структура кинетической модели горения натрия в струе в модуле AEROSOL/LM в целом соответствует модели из модуля FEUMIX, реализованной в составе интегрального кода ASTEC-Na [9, 10]. Источник струи Na в помещении АЭС при разрыве трубы контура с натрием либо вычисляется в теплогидравлическом коде, либо задается пользователем.

В модели рассматриваются две химические реакции взаимодействия натрия и кислорода во фронте пламени струи с образованием продуктов реакций в виде монооксида и пероксида натрия:



Соответственно этим реакциям вычисляются потоки тепла и кислорода между пламенем и атмосферой в приближении подобия процессов тепло- и массообмена. Особенностью кинетической модели является моделирование источников натрия и кислорода в аэрозольную фазу в составе оксидов Na с учетом возможного истощения кис-

лорода и затухания горения натрия в замкнутом помещении.

В рамках данной модели в зависимости от условий в пламени струи сгорает лишь часть Na, а остаток разливается по полу и горит уже в режиме лужи. В модели этот эффект учитывается введением характерного времени пребывания натрия в виде взвешенных в атмосфере капель струи между точкой инжекции и лужей натрия на полу.

Радиационный теплообмен между пламенем, окружающей средой и стенами помещения моделируется следующим образом. Считается, что аэрозоли настолько непрозрачны, что забирают от лужи всю энергию излучения, которая переходит к газовой фазе, передающей, в свою очередь, энергию стенам в результате теплообмена. Повышенный теплообмен вследствие усиленной конвекции или излучения газовой фазы на стены задается пользователем в виде множителя во входном файле (этот параметр можно варьировать).

Реализованная в коде модель горения натрия в луже аналогична модели из кода SOFIRE-II [11]. Коэффициент массопереноса кислорода к фронту пламени над лужей натрия рассчитывается в соответствии с аналогией между процессами теплообмена и массопереноса. Формула для расчета коэффициента массопереноса основана на нескольких упрощающих предположениях: однородности температуры лужи, турбулентности течения газа, отсутствии зависимости от особенностей формы лужи и всего помещения. В связи с этим в формулу введен безразмерный корректирующий множитель у скорости подвода кислорода к луже, по умолчанию равный 1.0. Он может быть задан пользователем самостоятельно во входном файле (ввиду сложности задачи данный параметр можно варьировать).

В первом варианте модели горения натрия в луже использовалось приближение сколь угодно малой глубины лужи при сохранении ее постоянной площади, соответствующей размеру свободного пространства для расплава натрия на полу. В доработанном варианте модели введено ограничение снизу на глубину лужи, которое задается силой поверхностного натяжения жидкого натрия, удельной плотностью и массой Na в луже. Кроме того, в доработанном варианте учитываются теплообмен излучением между лужей и газом с аэрозолями, а также конвективный теплообмен газа со стенами помещения. Радиационный теплообмен рассматривается в приближении “серого тела”. Прямая передача теплоты горения стенам в модели лужи отсутствует: она осуществляется только через атмосферу с аэрозольными частицами, как описано выше.

В первом варианте модели для совместного горения натрия в струе и луже предполагался консервативный вариант с полным сгоранием натрия

в струе до момента попадания на пол. Однако этот вариант не соответствует результатам большинства экспериментов с большими массовыми расходами натрия в струе или высокой начальной скоростью инжекции струи в помещении. Соответственно, в доработанной версии учитывается возможность неполного сгорания натрия в струе. В этом случае создается дополнительный источник массы Na в существующей луже либо образуется новая лужа натрия, которая также может воспламениться.

Важно отметить, что рассчитываемые источники для образования продуктов горения натрия в струе и луже в виде его оксидов могут затем рассматриваться в модели либо как источники паров с последующей нуклеацией наночастиц оксидов натрия при создании соответствующих термодинамических условий, либо как источники непосредственно аэрозолей оксидов натрия определенного размера, задаваемого пользователем во входном файле. Данный подход позволяет моделировать образование многокомпонентных аэрозолей вследствие взаимодействия частиц горения натрия и аэрозолей продуктов деления. При этом учитываются дополнительное поглощение паров воды из окружающего воздуха и переход частиц оксидов натрия в частицы гидроксида NaOH.

Аэрозольный модуль AEROSOL/LM, включающий модели горения Na и аэрозольных явлений, входит в состав теплогидравлического модуля HYDRA-IBRAE/LM интегрального кода ЕВКЛИД. В совокупности все они представляют собой единый программный код с общим интерфейсом для расчета процессов теплогидравлики в помещениях АЭС, а также переноса продуктов деления и горения натрия в газовой и аэрозольной формах. Отличительной особенностью аэрозольного модуля является возможность расчета кинетики образования (нуклеации) многокомпонентных аэрозолей с учетом действия различных по физической природе источников, например образование смешанных по составу аэрозолей, состоящих из продуктов горения натрия, продуктов деления и аэрозолей взаимодействия расплава с бетоном. Нуклеация различных паров рассматривается в однокомпонентном приближении классической теории нуклеации. Образование многокомпонентных аэрозолей определяется как коагуляцией разных по составу первичных аэрозолей, так и конденсацией на аэрозольных частицах различных паров [12].

Моделирование аэрозолей продуктов деления и горения натрия рассматривается в приближении метода фракций для массы аэрозольных частиц [13], при котором концентрации и составы многокомпонентных частиц определяются системой уравнений для масс M_i^p p -го компонента в частицах i -й размерной фракции в объеме пространственной расчетной ячейки. Как следствие,

масса и концентрация всех частиц данной фракции вычисляются по соотношениям

$$M_i = \sum_p M_i^p; \quad N_i = M_i/m_i.$$

Здесь $m_i = x_i \rho_p$ и x_i – характерная масса и объем частиц i -й фракции с границами v_{i-1} , v_i ($v_{i-1} < x_i \leq v_i$); ρ_p – фазовая плотность, постоянная и одинаковая для всех частиц.

Суммирование проводится по всем компонентам ($p \leq N_{FP}$, где N_{FP} – количество компонентов). Основным параметром, характеризующим структуру фракций, является отношение объемов соседних фракций $\alpha = v_i/v_{i-1} = \text{const} > 1$.

Детальное описание уравнений и методов их решения можно найти в руководствах по использованию модуля и соответствующих журнальных публикациях, например [4].

МАТРИЦА ВАЛИДАЦИИ КОДА ЕВКЛИД/V2 В ЧАСТИ НАТРИЕВЫХ ПОЖАРОВ

Под валидацией того или иного разработанного кода в настоящей работе понимаются обоснование возможности его использования в заявленной области применения и определение диапазонов погрешности расчета отдельных параметров в результате сравнения их расчетных значений с экспериментальными данными. Следует отметить, что такое определение соответствует термину “валидация”, принятому в отечественных документах в области использования атомной энергии и зарубежных публикациях [10, 14].

Перед проведением валидации должен быть составлен список явлений и соответствующих им ключевых параметров безопасности, для моделирования которых предназначен разработанный код. Затем, согласно этому списку, по имеющимся экспериментальным данным проводится анализ доступной информации, достаточной для валидации кода. Необходимо добавить, что обычно валидации предшествует верификация, т.е. проверка кода на тестовых задачах с известным аналитическим решением. Для кода ЕВКЛИД/V2 верификация осуществлена как для моделей горения натрия, так и для моделей последующих аэрозольных явлений для продуктов его горения. Объем проведенных расчетов составил более 10 аналитических тестов и 9 экспериментов для отдельных явлений.

Под термином “ключевые параметры безопасности” применительно к процессам горения натрия и переноса продуктов горения авторы данной статьи понимают следующие параметры:

давление и температура газа в помещении при горении натрия;

температура поверхностей (пол, стены);

концентрация паров и аэрозолей продуктов горения натрия в помещениях.

Кроме того, важной является оценка степени неопределенности имеющихся экспериментальных данных. В табл. 1 представлена матрица ранжирования физических явлений по степени влияния на ключевые параметры безопасности для аварий с горением натрия в помещениях АЭС с РУ БН.

В целях обоснования возможности кода моделировать указанные процессы был проведен анализ доступных экспериментальных данных. В результате было установлено, что данных из открытых литературных источников, пригодных для валидации моделей совместного горения натрия в струе и луже на реальной реакторной установке, очень мало, а точнее всего один эксперимент (SOLFA, Япония). Поэтому подавляющее большинство данных, пригодных для валидации, относится к экспериментальным (лабораторным) установкам. Из них для валидации были выбраны только те эксперименты, которые удовлетворяют следующим условиям: достаточный объем представленной информации для проведения расчетов, надежность и отсутствие противоречий результатов измерений, использование этих данных для валидации известных расчетных кодов, таких как ASTEC-Na [10], CONTAIN-LMR [15], MELCOR-Na [16], КУПОЛ-БР [17].

Матрица валидации для моделей горения натрия в помещениях АЭС с РУ БН приведена в табл. 2. Она включает эксперименты по горению натрия в струе на установках CSTF (Containment System Test Facility), SOLFA (Sodium Leak, Fire and Aerosol) и FAUNA, в луже (установки CSTF, SOLFA, FAUNA и EMIS), по теплообмену и переносу аэрозолей продуктов горения Na и продуктов деления (установки CSTF, SOLFA, FAUNA и EMIS). В данной работе приведены результаты валидации для эксперимента по совместному горению натрия в струе и луже (SOLFA) и горению натрия в луже с теплообменом и переносом аэрозолей (эксперименты АВ1 и АВ2 на установке CSTF).

ВАЛИДАЦИЯ КОДА НА БАЗЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ПРОГРАММЕ ABCOVE

Эксперименты АВ1 и АВ2 в рамках экспериментальной программы ABCOVE (Aerosol Behavior Code Validation and Evaluation) на установке CSTF (Containment System Test Facility) были посвящены исследованию горения натрия в луже с образованием аэрозолей продуктов горения и дальнейшими аэрозольными явлениями в воздушной атмосфере установки [17]. Установка CSTF

Таблица 1. Ранжирование физических явлений по степени влияния на ключевые параметры безопасности для аварий с горением натрия в помещениях АЭС

Физическое явление	Давление газа	Температура газа	Температура стен	Выход паров и аэрозолей ПД	Необходимость экспериментов*
<i>Горение натрия в струе</i>					
Начальный диаметр капель	В	С	С	Н	Н
Горение натрия	В	В	С	С	Н
Локальный расход кислорода	С	С	С	С	С
Теплообмен струи с газом	В	В	С	Н	Н
Перенос аэрозолей горения струи	С	Н	Н	С	С
Аэрозольные явления с ПД**	Н	Н	Н	С	В
<i>Горение натрия в луже</i>					
Динамика растекания лужи	С	Н	С	Н	Н
Горение натрия	С	С	В	В	Н
Теплообмен с газом и стенками	С	С	В	Н	Н
Радиационный теплообмен	С	С	С	Н	Н
Перенос аэрозолей горения лужи	Н	Н	Н	Н	Н
Поведение паров и аэрозолей ПД	Н	Н	Н	В	В

* Данный пункт определяет степень необходимости проведения дополнительных экспериментов.

** Для фазы струи выход ПД в помещение зависит от массового расхода натрия, аналогично для фазы горения в луже выход ПД зависит от массы натрия в луже и скорости выгорания натрия.

Примечание. Заглавными буквами обозначена влажность: Н – низкая; С – средняя; В – высокая.

Таблица 2. Матрица валидации кода ЕВКЛИД/V2 в части моделей горения натрия и аэрозольных явлений с продуктами горения в помещениях АЭС с РУ БН

Физическое явление	Горение в луже ABCOVE AB1, AB2	Горение струи ABCOVE AB5, AB6	Горение струи FAUNA, FS4	Горение лужи ABCOVE AB7	Горение лужи FAUNA, F4	Горение лужи EMIS, 10b	SOLFA, Япония
Горение струи	–	+	+	–	–	–	+
Теплообмен струи с газом	+	+	+	–	–	–	+
Горение натрия в луже	+	–	–	+	+	+	+
Теплообмен горячей лужи с газом	+	–	–	+	+	+	+
Теплообмен между газом и стенками	+	+	+	+	+	+	+
Перенос и осаждение аэрозолей горения натрия	0	+	0	+	+	+	+
Перенос и осаждение аэрозолей продуктов деления	+	+	–	+	–	–	–

Примечание. Знак “+” означает применимость данного эксперимента для валидации в части данного физического явления, “0” – частичную применимость, “–” – неприменимость.

Таблица 3. Параметры тестов АВ1 и АВ2 на установке CSTF

Параметр	Тест	
	АВ1	АВ2
Начальное давление, Па	1.22×10^5	1.28×10^5
Начальная температура установки, °С	26.5	20.5
Масса натриевой лужи, кг	410	472
Начальная температура лужи, °С	600	600
Начальная мольная доля кислорода, %	19.8	20.9
Время горения лужи, с	0–3600	0–3600
Расход инъекции пара, г/с	0	19
Время инъекции пара, с	–	960–4560

представляет собой вертикальный цилиндр и имеет следующие параметры:

Высота, м	20.3
Диаметр, м	7.62
Вместимость, м ³	850
Площадь, м ² :	
поверхностей седиментации	88
всей поверхности	1000
лужи натрия	4.4
Масса стен, кг	103000

В экспериментах АВ1 и АВ2 горение натрия проходило в луже, которая создавалась на специально отведенном для нее теплоизолированном поддоне. В начале обоих экспериментов в рабочем объеме установки создавались условия, близкие к условиям нормальной атмосферы. Начальная температура натриевой лужи составляла 600°С. По истечении 1 ч крышка над поддоном закрывалась и горение прекращалось. Масса лужи в экспериментах была достаточно большой для того, чтобы исключить прекращение пожара из-за нехватки топлива, поэтому интенсивность пожара определялась лишь скоростью подвода кислорода. После прекращения горения эксперимент продолжался еще несколько дней, в течение которых происходили коагуляция аэрозольных частиц и их осаждение на поверхности.

Тест АВ1 являлся “сухим” с очень небольшим значением относительной влажности атмосферы. Тест АВ2 специально проводился как “влажный” с подачей водяного пара с расходом 19 г/с в период времени $t = 960–4560$ с после начала пожара. Подача водяного пара имитировала выход пара из горячего бетона при его взаимодействии с горящим натрием. Существенное повышение влажности атмосферы приводило к обводнению гигроскопических аэрозолей горения, влияя тем са-

мым на интенсивность их осаждения. Параметры тестов АВ1 и АВ2 приведены в табл. 3.

Для оценки степени неопределенности результатов расчетов, вследствие наличия погрешности экспериментальных данных и параметров моделей, проводились многовариантные расчеты с использованием следующих варьируемых параметров во входных данных:

Поправка к начальной температуре лужи, °С	±50
Микроскопическая плотность аэрозолей, кг/м ³	1000–2000
Доля сгоревшего Na, вышедшая в аэрозоли	0.3–0.4
Множитель:	
у коэффициента теплообмена газа со стенкой	3–5
у скорости подвода кислорода к луже	0.8–1.2

Согласно методике, разработанной в ИБРАЭ РАН [18], для каждого эксперимента проводилось 100 многовариантных расчетов, в которых случайным образом варьировались определяющие параметры в диапазоне их изменения. Распределение параметров по интервалу предполагалось равномерным. В процессе проведения многовариантных расчетов определялись коэффициенты чувствительности многомерной линейной регрессии к каждому из варьируемых параметров, которые затем были представлены в виде гистограмм. В результате последующего статистического анализа вычислялись минимальные, средние и максимальные значения моделируемых параметров. Использовался безразмерный коэффициент ранговой корреляции Спирмена. Значения расчетных величин брались в момент завершения горения натриевой лужи $t = 3600$ с.

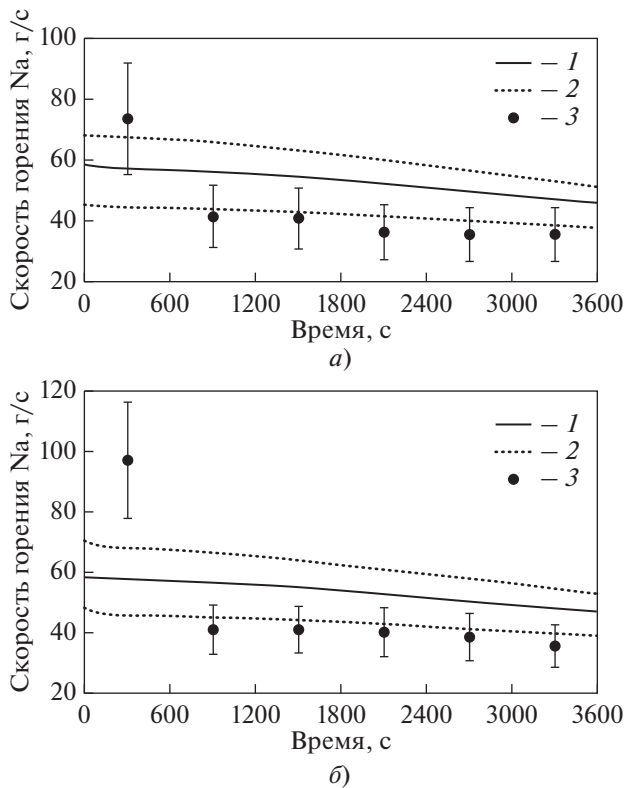


Рис. 2. Скорость горения лужи в экспериментах ABCOVE. *a* – тест AB1; *b* – тест AB2. 1 – расчетное среднее; 2 – расчетные минимум и максимум; 3 – эксперимент (с погрешностью измерений)

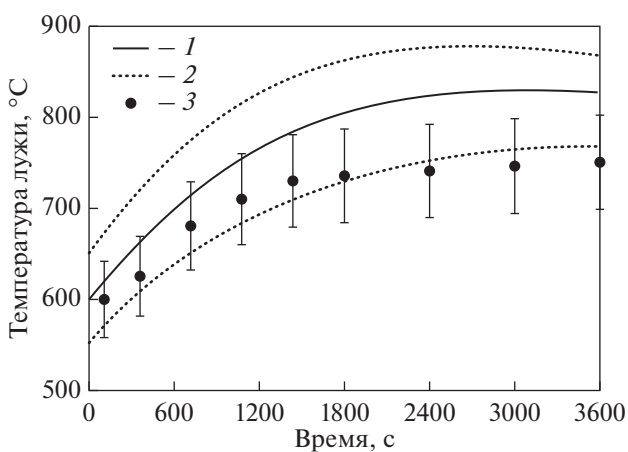


Рис. 3. Температура лужи в тесте AB1 эксперимента ABCOVE. 1 – расчетное среднее; 2 – расчетные минимум и максимум; 3 – эксперимент (с погрешностью измерений)

На рис. 2 и 3 приведены расчетные зависимости (средние, минимальные и максимальные значения) от времени скорости горения лужи и ее температуры, а также экспериментальные данные, по-

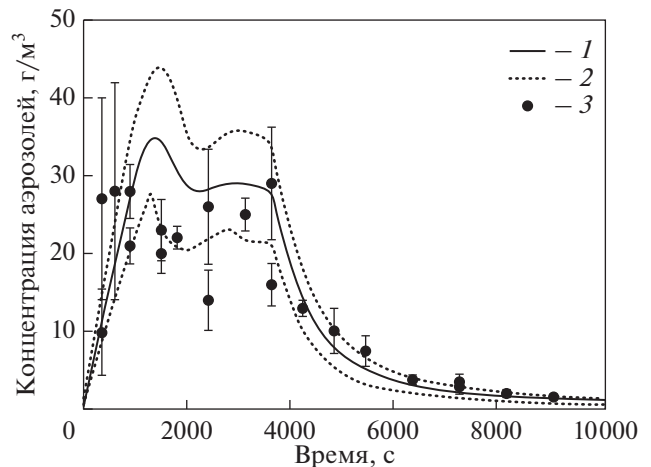


Рис. 4. Концентрация аэрозолей в тесте AB1 эксперимента ABCOVE. 1 – расчетное среднее; 2 – расчетные минимум и максимум; 3 – эксперимент (с погрешностью измерений)

лученные по программе ABCOVE. Видно, что с учетом погрешности экспериментальных данных получено хорошее их соответствие результатам многовариантных расчетов, что свидетельствует о корректности моделирования горения натрия, тепловыделения и распределения тепла между газом и лужей.

На рис. 4 представлены результаты расчетов изменения во времени массы взвешенных в атмосфере аэрозолей для тестов AB1. Полученный график демонстрирует корректность реализованной модели образования аэрозолей горения натрия и дальнейшего моделирования процессов коагуляции полидисперсных частиц и их осаждения на поверхности.

Проведена валидация моделей массопереноса, теплообмена и образования аэрозолей горения натрия с учетом абсорбции водяного пара гигроскопическими компонентами (в данном случае NaOH) в помещении АЭС при разливе и горении натрия на поверхности лужи, входящих в состав интегрального кода ЕВКЛИД/V2. Для экспериментов AB1 и AB2 на установке CSTF валидировались в первую очередь модель горения Na в луже, модели коагуляции частиц в условиях высокой концентрации и механизмы осаждения полидисперсных частиц на поверхности в помещении.

Выявлено, что динамическая модель горения достаточно точно воспроизводит скорость выгорания натрия. Суммарное количество сожженного Na отличается от измеренного на 13%. При анализе чувствительности определено, что наибольшее влияние на этот параметр оказывает заданный пользователем множитель у скорости подвода кислорода к луже. Концентрация взвешенных аэрозолей отличается от экспериментальной в среднем на 30%, что

является хорошим результатом с учетом погрешности экспериментальных данных и неопределенности варьируемых параметров расчетов. Концентрация аэрозолей наиболее чувствительна к микроскопической плотности аэрозольных частиц, которая влияет на их осаждение на поверхности.

ВАЛИДАЦИЯ КОДА НА БАЗЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА УСТАНОВКЕ SOLFA

Цель эксперимента SOLFA-2 – воссоздание условий аварии с разрывом трубопровода натрия и его последующим воспламенением, произошедшей в апреле 1996 г. на АЭС Моңжу (Япония) и приведший к натриевому пожару [19]. Эксперимент был проведен спустя всего несколько месяцев после аварии, поэтому параметры течи на экспериментальной установке были наиболее близки к параметрам на АЭС в момент аварии, а именно:

- расход свободно падающей струи натрия составлял примерно 44 г/с;
- температура струи 480°C;
- длительное время действия протечки;
- образование лужи натрия на полу и горение натрия как в струе, так и в луже.

Установка SOLFA, схема которой приведена на рис. 5, представляет собой вертикальный герметичный стальной сосуд и оборудована системами впрыска струи натрия и вентиляции для подвода воздуха или азота, а также имеет стальной поддон в нижней части сосуда для обеспечения горения натрия в луже.

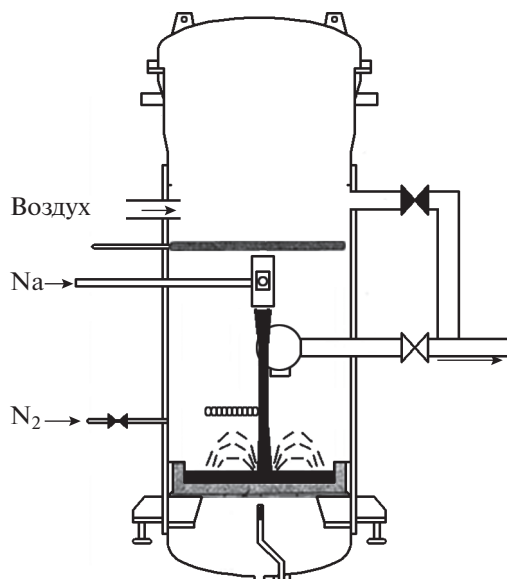


Рис. 5. Схема установки SOLFA для проведения экспериментов с совместным горением натрия в струе и луже

На рис. 6 приведены результаты расчетов суммарной скорости горения натрия в луже и в струе с учетом варьирования входных параметров. Из экспериментальных входных данных варьировались масса стенки, расход воздуха, время завершения его подачи и др., из параметров модели – масса нагреваемой части пола, описанные выше поправочные множители у скорости горения натрия и теплообмена между газом и сосудом и др. Полный список параметров и диапазоны их варьирования приводятся далее:

Масса нагреваемой части пола, кг	100–800
Коэффициент массы стенки	0.8–1.2
Коэффициент расхода воздуха	0.8–1.2
Момент завершения подачи воздуха, мин	80–100
Множитель у скорости подвода Na к луже	0.8–1.2
Доля:	
тепла горения Na, отдаваемая луже	0.3–0.7
продуктов горения, уносимая в виде аэрозолей	0.2–0.4
натрия, окисляющегося до Na ₂ O	0.5–1.0
Множитель у коэффициента теплообмена газа со стенкой	2–4
Излучательная способность поверхности лужи	0.4–0.9

Из представленных результатов следует, что в течение первых 20 мин скорость горения натрия

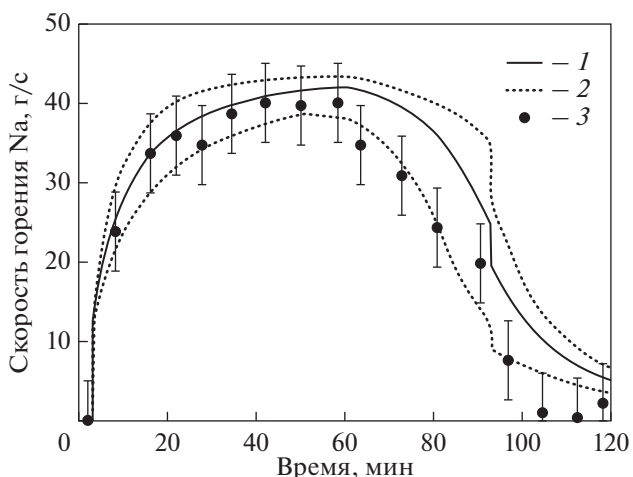


Рис. 6. Суммарная скорость горения натрия в луже и в струе в эксперименте на установке SOLFA. 1 – расчетное среднее; 2 – расчетные минимум и максимум; 3 – эксперимент (с погрешностью измерений)

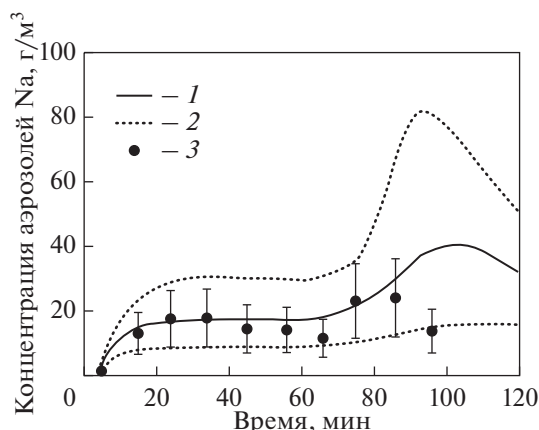


Рис. 7. Концентрация аэрозолей горения натрия в объеме установки в эксперименте на установке SOLFA. 1 — расчетное среднее; 2 — расчетные минимум и максимум; 3 — эксперимент (с погрешностью измерений)

(44 г/с) ниже скорости его поступления, поскольку в струе сгорает примерно четверть поступающего вещества, а в луже натрия еще слишком мало и площадь горения небольшая. В результате увеличения количества натрия в луже скорость его горения повышается вместе с ростом площади поверхности лужи. В промежуток времени от 20 до 60 мин наступает состояние, близкое к стационарному: скорость горения в луже примерно равняется скорости поступления в нее натрия. На 63–93-й минутах происходит снижение скорости вентиляции при продолжении подачи Na. Из-за начинающегося кислородного голодания скорость горения в струе и в луже становится ниже скорости поступления Na. Наконец, после 93-й минуты подача натрия прекращается. Скорость горения начинает падать еще быстрее. При этом на усиливающееся «кислородное голодание» накладываются еще эффект замедления горения в струе и сокращение площади горения лужи вследствие уменьшения в ней массы натрия. Полученные данные показывают, что расчетная модель в целом хорошо воспроизводит результаты эксперимента.

На рис. 7 приведены результаты расчетов концентрации аэрозолей горения натрия в рабочем объеме установки. Видно, что в интервале времени с нормально работающей в эксперименте вентиляцией (примерно до 63-й минуты) концентрация аэрозолей вначале быстро возрастает и затем становится практически стационарной. Это связано с конкуренцией скорости генерации аэрозолей при горении натрия со скоростью их выноса газом вследствие вентиляции воздуха в сосуде, после снижения интенсивности которой концентрация аэрозолей сначала повышается, так как уменьшается их вынос из сосуда, а затем начинает снижаться, поскольку горение натрия в луже прекращается.

Моделирование совместного горения в струе и в луже дает близкую к эксперименту скорость горения натрия. Некоторые различия данных возникают в периоды времени, соответствующие моменту прекращения нормальной работы вентиляции в эксперименте. Без подачи струи натрия воспроизведение при расчетах результатов экспериментов становится более сложным, так как догорание Na в луже происходит в условиях «кислородного голодания». Выявленное отличие расчетных данных от экспериментальных для скорости горения лужи доходит в этом случае до 23%.

Аналогичный результат получен и при моделировании мольной доли кислорода в объеме установки. Расчеты с учетом погрешности экспериментальных данных хорошо соответствуют результатам измерений в промежутки времени, когда вентиляция работает нормально. Погрешность расчетов в сравнении с экспериментальными данными на этом интервале составляет менее 5%. После нарушения нормальной работы вентиляции начинается влияние «кислородного голодания» и расчетные результаты становятся чувствительными к составу оксидов натрия (Na_2O или Na_2O_2) и расходу газа при вентиляции.

Расчетная концентрация аэрозолей в промежутки времени, соответствующий нормальной работе, определяется их генерацией при горении и уносом вентиляцией. Процесс осаждения аэрозолей на стенки вносит менее заметный вклад. Однако после прекращения нормальной работы вентиляции осаждение становится единственным механизмом, определяющим уменьшение концентрации аэрозолей в объеме установки.

Таким образом, полученные результаты валидационных расчетов дают возможность обосновать применение кода ЕВКЛИД/V2 для моделирования процессов теплообмена и массопереноса примесей при горении натрия, а также образование продуктов сгорания натрия и аэрозольные явления с ними в помещениях АЭС с РУ БН.

ВЫВОДЫ

1. Валидацию моделей интегрального кода ЕВКЛИД/V2 в части моделей горения натрия можно выполнить с использованием существующих экспериментальных данных.
2. Показано, что интегральный код ЕВКЛИД/V2 позволяет проводить моделирование задач с горением натрия в струе и луже, образованием и переносом аэрозолей продуктов горения натрия в помещениях АЭС, включая их взаимодействие с аэрозолями продуктов деления и осаждение на поверхности стен и пола в аварийном помещении.
3. Проведенная оценка погрешностей расчета отдельных параметров дает возможность сделать

вывод об удовлетворительной точности воспроизведения кодом ЕВКЛИД/V2 процессов, связанных с тепло- и массопереносом при горении натрия, включая его совместное горение в струе и луже, образование и перенос аэрозолей продуктов сгорания Na.

4. Желательно провести эксперименты по взаимодействию аэрозолей горения натрия с парами и аэрозолями продуктов деления в помещении, включая взаимодействие с соединениями йода и цезия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Мосунова Н.А.** Интегральный код ЕВКЛИД/V1 для обоснования безопасности реакторных установок на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем. Часть 1: Базовые модели // Теплоэнергетика. 2018. № 5. С. 69–84. <https://doi.org/10.1134/S0040363618050065>
2. **Алипченков В.М., Болдырев А.В., Вепрев Д.П.** Интегральный код ЕВКЛИД/V1 для обоснования безопасности реакторных установок на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем. Часть 2: Верификация // Теплоэнергетика. 2018. № 9. С. 54–64. <https://doi.org/10.1134/S0040363619050035>
3. **Верификация** кода ЕВКЛИД/V2 на основе экспериментов с разрушением элементов активной зоны реактора с жидкометаллическим теплоносителем / А.А. Бутов, В.С. Жданов, И.А. Климонов, И.Г. Кудашов, А.Э. Кутлиметов, П.Д. Лобанов, Н.А. Мосунова, А.А. Сорокин, В.Ф. Стрижов, Э.В. Усов, В.И. Чухно // Теплоэнергетика. 2019. № 5. С. 16–24. <https://doi.org/10.1134/S0040363618090011>
4. **Моделирование** образования и переноса продуктов деления в первом контуре быстрого реактора в модуле AEROSOL/LM / М.Ф. Филиппов, П.В. Колобаева, Н.А. Мосунова, А.А. Сорокин // Атомная энергия. 2018. Т. 124. Вып. 3. С. 223–227.
5. **Франк-Каменецкий Д.А.** Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М.: Наука, 1987.
6. **Eckert E.R.G., Drake R.M.** Analysis of heat and mass transfer. N.Y.: McGraw-Hill, 1972. <https://doi.org/10.1002/aic.690180342>
7. **Sodium** columnar fire test and code development at PNC / S. Ohno, N. Uchiyama, K. Kawata, O. Miyake // IAEA/IWGFR Technical Committee Meeting on Evaluation of Radioactive Materials Release and Sodium Fires in Fast Reactors, IWGFR/92. Oarai, Ibaraki, Japan, 11–14 Nov. 1996. P. 385–396.
8. **О скорости** совместного горения струи и лужи жидкого натрия / А.И. Бондаренко, М.М. Савин, О.В. Супотницкая, Л.М. Янцева // ВАНТ. Сер. Ядерно-реакторные константы. 2019. № 1. С. 224–229. [ГНЦ-ФЭИ, Обнинск.]
9. **Rigollet-Pichon L., Malet J.C.** The modelling of sodium jet fires in a global computer code – FEUMIX 3 // IAEA/IWGFR Technical Committee Meeting on Evaluation of Radioactive Materials Release and Sodium Fires in Fast Reactors, IWGFR/92. Oarai, Ibaraki, Japan, 11–14 Nov. 1996. P. 357–368.
10. **Lebel L., Girault N.** New developments in modeling sodium spray fires with ASTEC-Na // Ann. Nucl. Energy. 2018. V. 119. P. 23–35. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2018.04.024>
11. **SOFIRE-II** User Report / P. Beiriger, J. Hopfenfeld, M. Silberberg, R.P. Johnson, L. Baurmash, R.L. Koontz // AI-AEC-13055. Atomic International Division. Canoga Park, California, 1973. <https://doi.org/10.2172/4490831>
12. **Сорокин А.А.** Моделирование коагуляции аэрозолей продуктов деления // Атомная энергия. 2015. Т. 118. Вып. 4. С. 228–232.
13. **Сорокин А.А.** Моделирование динамики аэрозолей продуктов деления в первом контуре // Атомная энергия. 2015. Т. 118. Вып. 3. С. 172–176.
14. **РБ-166-20.** Руководство по безопасности при использовании атомной энергии “Рекомендации по оценке погрешностей и неопределенностей результатов расчетных анализов безопасности атомных станций”. Разработаны ФБУ НТЦ ЯРБ с учетом замечаний и предложений АО ОКБ “Гидропресс”, АО “ОКБМ Африкантов”, АО НИКИЭТ, НИЦ “Курчатовский институт”, АО “Атомпро-ект”, АО ВНИИАЭС, ИБРАЭ РАН, ФГУП “НИТИ им. А.П. Александрова”, НИЯУ МИФИ.
15. **CONTAIN LMR/1BMod. 1.** A computer code for containment analysis of accidents in liquid-metal-cooled nuclear reactors / K.K. Murata, D.E. Carroll, K.D. Bergeron, G.D. Valdez. Sandia National Laboratories Report SAND-91-1490. 1993.
16. **Louie D.L.Y., Humphries L.L., Denman M.R.** Implementation status of CONTAIN-LMR sodium chemistry models into MELCOR 2.1 // Proc. of the Intern. Conf. on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Next Generation Nuclear Systems for Sustainable Development. Yekaterinburg, Russia, 2017.
17. **Hilliard R.K., McCormack J.D., Postma A.K.** Aerosol behavior during sodium pool fires in a large vessel – CSTF tests AB1 and AB2: Report No. HEDL-TME 79-28 UC-79. Hanford Engineering Development Laboratory, 1979. <https://doi.org/10.2172/6111007>
18. **Анализ** неопределенностей в задаче расчета взаимодействия расплава с материалом конструкций реактора типа ВВЭР / Е.В. Моисеенко, В.И. Тарасов, В.Ф. Стрижов, А.С. Филиппов // Изв. РАН. Энергетика. 2010. Т. 6. С. 105–117.
19. **JAEA** Sodium Fire Test at Broad Ranges of Temperature and Oxygen Concentrations (IV) – Low Temperature Sodium Spray Tests. JAEA Review 046, 2011.

Description of Models of Sodium Combustion on Premises of an NPP with a Fast Reactor Unit using the EUCLID/V2 Integrated Code and the Results of Their Validation

O. V. Tarasov^{a, *}, D. A. Nazarov^a, D. S. Sinitsyn^a, N. A. Mosunova^a, and A. A. Sorokin^{a, b, **}

^a Nuclear Safety Institute, Russian Academy of Sciences (IBRAE RAN), Moscow, 115191 Russia

^b Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences, Moscow, 125412 Russia

*e-mail: olegtarasov79@gmail.com

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

Abstract—Results are presented on the validation of the second version (V2) of the EUCLID integrated code with extended capabilities in comparison with its first version. The additional models incorporated in the code include, in particular, combustion of sodium and formation and transport of sodium combustion aerosols and fission products in the premises of a nuclear power plant during severe accidents in a fast neutron reactor. This paper describes the results of the code validation to substantiate its applicability in calculating accidents with depressurization of a coolant loop in a sodium cooled fast neutron reactor, including sodium combustion and the transport of aerosols formed from the sodium combustion products. Information is given on the models introduced in the code and the experimental data employed for the code validation. It has been demonstrated that the available experimental data are sufficient to validate the code as applicable to the above-listed phenomena. The results are outlined of the model validation against the experiments carried out in the SOLFA and CSTF experimental facilities with the combustion of a sodium puddle under different conditions: with an excess of oxygen or oxygen starvation, without or with sodium supply from a free-falling jet, without a steam source (simulation of evaporation from concrete) and with a steam source, and in a closed or ventilated room. The procedure for the analysis of uncertainty and sensitivity developed at IBRAE (Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences) was used to substantiate the main calculated parameters, such as the temperature of sodium puddle, the rate of its combustion, and the concentration of combustion aerosols. It has been demonstrated that the deviation of these values from the experiments can be explained by the uncertainty in the input data. The applicability of the EUCLID/V2 code for modeling sodium combustion and further aerosol phenomena occurring with the sodium combustion products in the rooms of a nuclear power plant with a fast reactor has been substantiated.

Keywords: validation, fast reactor, sodium coolant, EUCLID/V2, HYDRA-IBRAE/LM, AEROSOL/LM, simulation, integrated code, aerosol