



Российская Академия Наук

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

**ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ
БЕЗОПАСНОГО РАЗВИТИЯ
АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**



RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

**NUCLEAR SAFETY
INSTITUTE**

Препринт ИБРАЭ № IBRAE-2014-1

Preprint IBRAE-2014-1

О.И. Мелихов, В.И. Мелихов, Н.А. Ртищев, А.Е. Тарасов

АНАЛИЗ ТЕРМИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЧАСТИЦ КОРИУМА С НАТРИЕМ

Москва
2014

Moscow
2014

Мелихов В.И., Мелихов О.И., Ртищев Н.А., Тарасов А.Е. АНАЛИЗ ТЕРМИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЧАСТИЦ КОРИУМА С НАТРИЕМ. Препринт № ИБРАЭ-2014-01. Москва: Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, 2014. 33 с. — Библиогр.: 39 назв.

Аннотация

Выполнен анализ процессов теплообмена при кипении натрия в большом объёме. Приведена карта режимов кипения натриевого теплоносителя в большом объёме при его контакте с высокотемпературным кориумом. На основе приведённой карты сделан вывод, что при первоначальном контакте кориума с натрием, для типичных условий тяжёлой аварии в реакторах с натриевым теплоносителем, наиболее вероятно будет реализовываться прямой контакт жидкого натрия с поверхностью частиц, либо будет реализовываться режим переходного кипения натрия. Разработана интегральная модель термического взаимодействия кориума с натриевым теплоносителем. Выполнены валидационные расчёты как на зарубежных опытных данных — установка THINA (Германия), так и на стенде ПЛУТОН (Россия).

©ИБРАЭ РАН, 2014

Melikhov V.I., Melikhov O.I., Rtischev N.A., Tarasov A.E. ANALYSIS OF THERMAL INTERACTION BETWEEN THE CORIUM AND SODIUM. Preprint IBRAE-2014-01. Moscow: Nuclear Safety Institute, 2014. 33 p. — Refs.: 39 items.

Abstract

Analysis of heat transfer processes during a sodium pool boiling is performed. Sodium coolant heat transfer map when it contact with a high temperature corium is prepared. Based on the heat transfer sodium map concluded that the direct contact between the corium surface and liquid sodium or transient heat transfer regime will be occurred, in a typical sodium cooled fast reactors severe accidents conditions. Integral model is developed to simulate thermal interaction between the corium and sodium coolant. Validation results are provided on the base of the THINA (Germany) and PLUTON (Russia) facilities experimental data.

©Nuclear Safety Institute, 2014

Анализ термического взаимодействия частиц кориума с натрием

В.И. Мелихов, О.И. Мелихов, Н.А. Ртищев, А.Е. Тарасов

ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ БЕЗОПАСНОГО РАЗВИТИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

115191, Москва, ул. Б. Тульская, 52

тел.: (495) 955-22-69, эл. почта: rtna@ibrae.ac.ru

Содержание

1	Введение.....	3
2	Особенности теплообмена при кипении натрия в большом объеме	5
3	Математическая модель термического взаимодействия частиц кориума с натрием	7
3.1	<i>Модель термического взаимодействия частиц кориума с недогретым до температуры насыщения натрием</i>	<i>8</i>
3.1.1	Вывод уравнения сохранения энергии натрия в зоне взаимодействия.....	8
3.1.2	Уравнение теплопроводности частицы кориума	9
3.1.3	Определение потока тепла от частиц кориума в натрий.....	11
3.1.4	Вывод уравнения для изменения объема (высоты) зоны взаимодействия.....	12
3.1.5	Уравнение движения столба «холодного» натрия.....	13
3.1.6	Описание процессов в газовой полости над столбом «холодного» натрия.....	14
3.2	Модель термического взаимодействия частиц кориума с двухфазным натрием	14
3.2.1	Уравнение сохранения энергии натрия в зоне взаимодействия	15
3.2.2	Уравнение для изменения объема (высоты) зоны взаимодействия	15
3.3	<i>Моделирование теплоотдачи от частиц кориума в натрий и теплообмена между зоной взаимодействия и стенками сосуда из-за конденсации пара</i>	<i>16</i>
3.4	<i>Изменение моделируемых параметров термического взаимодействия при поступлении очередной порции частиц кориума.....</i>	<i>16</i>
4	Валидация математической модели взаимодействия кориума с натрием на опытных данных	17
4.1	<i>Валидация на опытных данных, полученных на установке THINA.....</i>	<i>17</i>
4.1.1	Описание экспериментальной установки THINA.....	17
4.1.2	Описание экспериментов, выполненных на установке THINA.....	18
4.1.3	Методические исследования влияния параметров модели расчётного кода CSI применительно к экспериментам THINA	21
4.1.3.1	Влияние количества порций кориума.....	21
4.1.3.2	Влияние отношения массы натрия к массе кориума в зоне взаимодействия.....	23
4.1.3.3	Влияние способа моделирования первой фазы процесса термического взаимодействия	25
4.1.4	Результаты валидации расчётного кода CSI на экспериментальных данных THINA.....	26
4.2	<i>Валидация на опытных данных, полученных на установке ПЛУТОН.....</i>	<i>30</i>
4.2.1	Описание экспериментальной установки ПЛУТОН и выполненных на ней экспериментов	30
4.2.2	Результаты валидации расчётного кода CSI на экспериментальных данных ПЛУТОН	31
5	Заключение	31
	Список литературы	32

1 Введение

В ходе аварии с плавлением активной зоны в реакторах с натриевым теплоносителем может происходить взаимодействие расплавленных материалов активной зоны с жидким натрием. При определённых условиях протекание этого процесса может сопровождаться значительным ростом давления, что представляет угрозу для безопасности АЭС.

Одной из наиболее вероятных аварий, приводящих к плавлению активной зоны в реакторах с натриевым теплоносителем, является авария с прекращением принудительной циркуляции натрия в контурах при сопутствующем отказе аварийной защиты реактора [1]. Вероятность этой запроектной аварии оценивается на уровне 10^{-7} / реактор·лет.

В ходе этой аварии главные циркуляционные насосы (ГЦН) первого и второго контуров находятся в режиме свободного выбега, длящегося около 120 секунд. В течение этого времени наблюдается устойчивая циркуляция теплоносителя в активной зоне реактора, но расход постепенно снижается до уровня, соответствующего естественной циркуляции. Достаточно быстро начинается кипение натрия в тепловыделяющих сборках (ТВС) реактора. Возникающий затем кризис теплоотдачи вызывает быстрый рост температуры оболочек твэл, что приводит к их разгерметизации и плавлению в центральной по высоте части твэл, где находится максимум энерговыделения. Плавление твэл начинается с плавления их стальных оболочек, температура плавления которых (около 1400 К) существенно меньше температуры плавления диоксида урана (около 3000 К). Расплавленная сталь под действием восходящего потока натрия перемещается в верхнюю область активной зоны. Поскольку в верхней области энерговыделение меньше, чем в центральной, то температура поверхностей твэл и чехлов ТВС здесь меньше, чем температура плавления стали. Поэтому переместившаяся в верхнюю область жидкая сталь застывает, и формируются так называемые блокады, препятствующие циркуляции теплоносителя. В результате прекращения циркуляции теплоносителя через ТВС оставшаяся расплавленная сталь стекает в нижнюю область активной зоны с меньшим энерговыделением, где температура твэл и чехлов ТВС также ниже, чем температура плавления стали. Таким образом, блокады формируются и в нижней области активной зоны.

Удаление стали из активной зоны приводит к значительному росту реактивности и соответственно мощности реактора. Это ускоряет процесс плавления топлива, которое начинает плавиться на несколько секунд позже, чем стальные оболочки твэл. Под действием силы тяжести расплавленное топливо перемещается в нижнюю область активной зоны, что вызывает падение мощности реактора до уровня остаточных энерговыделений (реактор переходит в подкритическое состояние) [1].

Таким образом, расплавленное топливо оказывается в пространстве, закупоренном блокадами из застывшей стали. За счёт более высокой температуры расплавленное топливо проплавляет нижние блокады из стали и вступает в контакт с жидким натрием. В ходе последующего термического взаимодействия расплавленных материалов активной зоны (кориума) с натрием происходит их фрагментация. За счёт увеличения площади теплообмена между горячим кориумом и жидким натрием происходит интенсивное вскипание натрия, что вызывает резкое расширение зоны взаимодействия. Вследствие этого происходит динамическое воздействие на верхние блокады, приводящее к их разрушению и выходу основной массы кориума в верхнюю камеру реактора, заполненную жидким натрием.

Таким образом, в рассмотренной аварии термическое взаимодействие кориума с жидким натрием реализуется как в нижней камере реактора, так и в верхней, однако масштаб взаимодействия в верхней камере реактора существенно больше.

Исследования по термическому взаимодействию кориума с натрием стали развиваться в 60-е годы. В [2] была предложена модель мгновенного перемешивания кориума с натрием и установления их термодинамического равновесия. Оценка коэффициентов конверсии (отношение работы расширения к начальной тепловой энергии кориума) по этой модели даёт очень высокие значения (20 – 30 %) для системы «кориум-натрий». Данная оценка является верхним теоретическим пределом коэффициента конверсии. С использованием этих значений коэффициента конверсии была установлена возможность разрушения контейнента при тяжёлых авариях с термическим взаимодействием кориума с теплоносителем [3].

Для более детального описания процесса термического взаимодействия кориума с теплоносителем и получения более реалистических значений коэффициентов конверсии необходимо учитывать конечные скорости процессов теплопередачи, фрагментации кориума и перемешивания кориума с охладителем. Последующие работы [4-14] были направлены на учёт конечной скорости этих процессов, что привело к снижению рассчитываемого коэффициента конверсии до величин 1-5 %.

К настоящему времени для анализа термического взаимодействия в системе «кориум-натрий» также разработаны несколько расчётных кодов (SIMMER-III [15], INTERACT [1, 16], MC3D[17]), позволяющих на основе методов механики многофазных сред моделировать нестационарные пространственные процессы, происходящие при термическом взаимодействии этих сред.

В данной работе рассмотрены особенности теплообмена кориума с натрием, описана математическая модель термического взаимодействия кориума с натрием, учитывающая конечную скорость фрагментации кориума и процессов теплообмена, выполнена её валидация на экспериментальных данных.

2 Особенности теплообмена при кипении натрия в большом объёме

В [18] была предложена карта режимов кипения натрия (рис.1) на основе обработки экспериментальных данных [19].

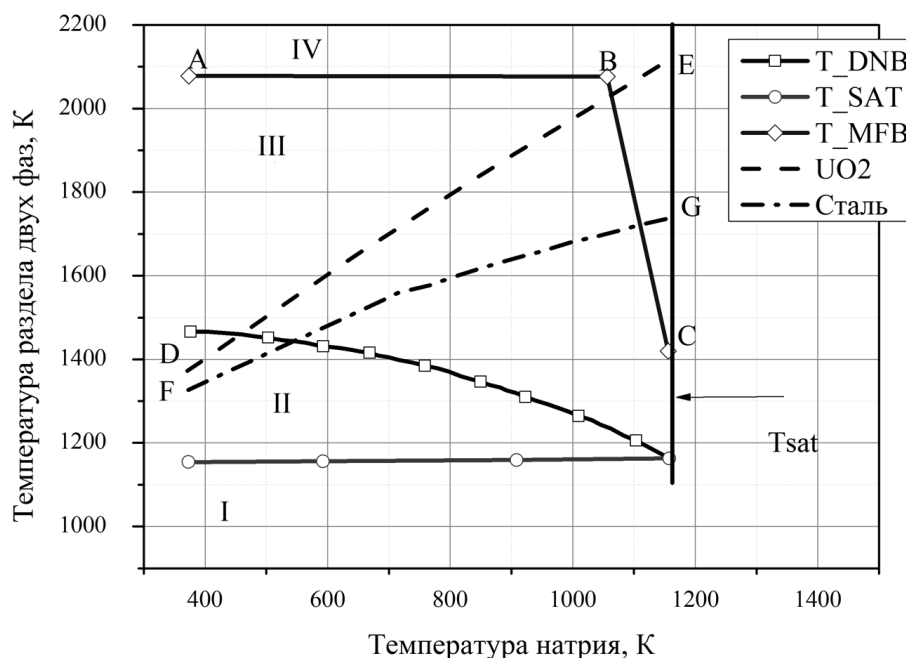


Рисунок 1 – Карта режимов кипения натрия в большом объёме

Постановка эксперимента заключалась в следующем. Горячий шар из тантала, на поверхности которого были установлены несколько термопар, помещался в большой сосуд с недогретым натрием, находящимся при атмосферном давлении. В табл.1 приведены основные параметры проведённых экспериментов.

Таблица 1. Основные параметры экспериментов [19]

Параметр	Значение
Температура натрия, К	473-1148
Давление	атмосферное
Температура шара, К	2167 - 2607
Глубина погружения шара в натрий, см	7,62-11,43
Диаметр шара, см	1,27 - 2,54

Для построения карты режимов кипения натрия в [18] было использовано понятие температура границы раздела двух сред. Эта температура определяется исходя из решения нестационарного уравнения теплопроводности для двух полуограниченных разнонагретых в начальный момент сред [20]:

$$T_i = \frac{T_c(\sqrt{\lambda\rho c_p})_c + T_h(\sqrt{\lambda\rho c_p})_h}{(\sqrt{\lambda\rho c_p})_c + (\sqrt{\lambda\rho c_p})_h} \quad (1)$$

здесь T – температура, λ – теплопроводность, ρ – плотность, c_p – теплоёмкость, индекс c обозначает параметры холодной среды, индекс h – параметры горячей среды, индекс i – границу раздела двух сред. Стоит отметить, что для идеализированного случая двух полубесконечных сред, температура границы раздела двух сред остаётся постоянной в ходе процесса перетока тепла от горячей среды в холодную. Если рассматривать задачу остывания шара (капли), погружённого в холодную среду, то эта температура также остаётся практически постоянной на характерных рассматриваемых временах, что является удобным при определении границ режимов кипения [21].

Для построения карты режимов кипения натрия в [18] температура границы раздела кориум-натрий, интерпретировалась как температура поверхности танталового шара, погружённого в натрий в экспериментах [19]. В результате такой обработки опытных данных была получена карта режимов кипения натрия, представленная на рис.1. Отметим, что приведённая карта режимов кипения натрия характерна для натрия, находящегося приблизительно при атмосферном давлении, а экспериментальные исследования по кипению натрия при высоких давлениях (~1 МПа) авторам не известны.

Если температура границы раздела двух фаз меньше, чем температура насыщения натрия $T_{Na,sat}$, то кипение невозможно и реализуется режим конвективного теплообмена (область I на рис.1). Выше располагается область II, в которой реализуется пузырьковое кипение натрия.

С увеличением температуры границы раздела сред достигается режим переходного кипения (область III). В работе [18] предложен следующий критерий перехода от пузырькового режима кипения к режиму переходного кипения:

$$T_i > 1,326\Delta T_{sub} + 1200K \quad (2)$$

здесь $\Delta T_{sub} = T_{Na,sat} - T_{Na}$, где T_{Na} - температура натрия.

Если температура границы раздела двух сред превышает значение предельного перегрева жидкого натрия, то наступает плёночное кипение (область IV) [22, 23]. Для натрия, при давлениях, характерных для натриевых реакторов (1-2 атм), эта температура равна примерно 2100 К [24]. Этому механизму возникновения плёночного кипения соответствует участок А-В границы области IV. С уменьшением недогрева жидкого натрия плёночное кипение наступает при более низких температурах раздела двух фаз, вследствие того, что при этих параметрах начинает реализовываться другой («гидродинамический») механизм возникновения плёночного кипения [25]. Этому механизму соответствует участок В-С границы области плёночного кипения.

На основе экспериментальных данных в работе [19] получено следующее соотношение, описывающее участок В-С:

$$T_i = T_{Na,sat} + 439K + 6,8\Delta T_{sub} \quad (3)$$

С помощью рис.1 можно оценить характер термического взаимодействия в системе «жидкий натрий – высокотемпературный кориум». В качестве высокотемпературного кориума рассмотрим диоксид урана при характерной температуре 3120К и, используя соотношение (1), определим температуру границы раздела фаз при различных температурах жидкого натрия. Полученные значения изображены кривой D-E на рис.1.

Видно, что режим плёночного кипения будет реализовываться лишь при очень небольших недогревах натрия ($\Delta T_{sub} \lesssim 50K$). При больших недогревах натрия будут реализовываться режимы переходного кипения ($50 \lesssim \Delta T_{sub} \lesssim 500K$), либо пузырькового ($\Delta T_{sub} \gtrsim 500K$).

Если в качестве высокотемпературного кориума рассматривать нержавеющую сталь при температуре 1900К, то аналогичным образом можно получить кривую F-G (рис. 1), показывающую особенности теплообмена натрия со сталью. Так же, как и в случае с диоксидом урана, режим плёночного кипения имеет место только при небольших недогревах натрия.

Карта режимов кипения натриевого теплоносителя, представленная на рис 1, позволяет сделать вывод о характере термического взаимодействия расплавленного кориума с натрием. При их первоначальном контакте, для типичных условий тяжёлой аварии в реакторах с натриевым теплоносителем, устойчивое плёночное кипение на каплях кориума не реализуется. Поэтому при термическом взаимодействии кориума с натрием не происходит формирование протяжённой области перемешивания, в отличие от взаимодействия кориума с водяным теплоносителем в ходе тяжёлых аварий на АЭС с ВВЭР/PWR. Наличие устойчивого плёночного кипения на каплях кориума, окружённых водой, исключает прямой контакт между взаимодействующими средами и позволяет каплям кориума перемещаться на значительные расстояния в воде и формировать протяжённую область перемешанной смеси [26], в которой термическое взаимодействие может реализоваться в форме когерентного парового взрыва (распространение волны термической детонации) [27]. В случае термического взаимодействия кориума с натрием область их взаимодействия определяется лишь масштабом их первоначального контакта. Как следствие, в системе «кориум-натрий» условий для когерентного парового взрыва, реализующегося в форме волны термической детонации, и характерного для системы «кориум-вода», не возникает. Тем не менее, происходящее в системе «кориум-

натрий» интенсивное термическое взаимодействие, способно приводить к существенным динамическим нагрузкам на окружающие конструкции.

В данной работе предполагается, что термическое взаимодействие кориума с натрием протекает по следующему механизму. В области взаимодействия кориума с натрием сначала устанавливается прямой контакт между взаимодействующими средами с соответствующей интенсивной теплопередачей, что вызывает существенный рост давления порядка сотен бар в зоне взаимодействия в первые моменты контакта ($t < 10^{-4}$ с), когда натрий находится в жидком состоянии. В работе [28] приводится значение для критического давления натриевого теплоносителя, равное 25,64 МПа. Очевидно, что в таких условиях реализуется прямой контакт между кориумом и жидким натрием. В дальнейшем, с падением давления, возможен переход к режимам переходного кипения, а затем и плёночного. Передача тепла от кориума в натрий вызывает быстрое расширение кипящего натрия в зоне взаимодействия. Расширяющаяся зона взаимодействия приводит в движение прилегающий к ней «холодный» натрий, что приводит к динамическим нагрузкам на окружающие конструкции.

3 Математическая модель термического взаимодействия частиц кориума с натрием

Математическая модель основана на подходах, изложенных в [29 – 32]. Предполагается, что процесс взаимодействия проходит через две последовательные фазы: 1) когда натрий недогрет до температуры насыщения; 2) начинается с момента закипания натрия.

На первой фазе кориум поступает в жидкий натрий, перемешиваясь с ним (см. рис. 2). При этом поступающая масса кориума фрагментирует на мелкие частицы, и происходит интенсивная теплопередача в натрий, которая вызывает последующие динамические процессы. При описании первой фазы процесса в [29, 30] предполагается прямой контакт между кориумом и жидким натрием. Однако, как было показано выше (рис. 1), при первоначальном контакте кориума с жидким натрием наиболее вероятно будет реализовываться режим переходного кипения натрия. Поэтому в настоящей модели на первой фазе предполагается следующая схема теплообмена: после очень быстрой стадии прямого контакта (как показывают оценки - через время порядка $10^{-5} - 10^{-7}$ с), характеризующейся быстрым ростом давления, связанным с малой сжимаемостью жидкого натрия, наступает стадия переходного кипения, длящаяся до момента наступления второй фазы (начало объёмного кипения натрия).

В работах [29, 30] также предполагалось, что вся масса кориума мгновенно поступает в жидкий натрий и фрагментирует. На самом деле, этот процесс - протяжённый по времени. Так, например, в рассмотренном ниже эксперименте THINA [33], кориум подаётся в сосуд с натрием за время порядка 0,2 с. В настоящей модели была реализована возможность учёта конечной скорости подачи кориума в натрий.

Вторая фаза процесса термического взаимодействия начинается с момента, когда средняя температура натрия в зоне взаимодействия достигает температуры насыщения. С этого момента теплопередача характеризуется: 1) ухудшением теплопередачи между кориумом и натрием из-за образования плёнки пара на внешней поверхности фрагментов кориума (плёночное кипение); 2) большой площадью поверхности взаимодействия; 3) конденсацией на холодных конструкциях.

Для описания процессов, имеющих место на первой и второй фазах процесса, формулируются уравнения сохранения массы и энергии для зоны термического взаимодействия, которые дополняются уравнением движения столба «холодного» натрия и уравнениями состояния натрия. Расчёт температуры частиц основан на решении нестационарного уравнения теплопроводности, записанного для сферически симметричного случая, с соответствующими граничными условиями.

Для учёта процессов в газовой полости, математическая модель была дополнена уравнениями сохранения массы и энергии для неконденсирующегося газа и уравнением теплообмена газа со стенками сосуда. В области взаимодействия учитывается процесс конденсации паров натрия на холодных конструкциях.

Процесс подачи кориума в натрий моделируется следующим образом. Предполагается, что кориум подаётся в сосуд последовательными одинаковыми по массе порциями, через задаваемые промежутки времени, причём каждая порция поступает мгновенно и сразу же фрагментирует на частицы одинакового радиуса (для данной порции). С приходом каждой новой порции кориума в зону взаимодействия поступает соответствующая доля натрия. Таким образом, чем больше порций кориума будет использоваться, тем точнее будет моделироваться непрерывная подача.

Для описания процессов термического взаимодействия кориума с натрием в промежутках времени ($t_i \leq t \leq t_{i+1}$) между двумя последовательными i -ой и $(i + 1)$ -ой порциями используются следующие уравнения.

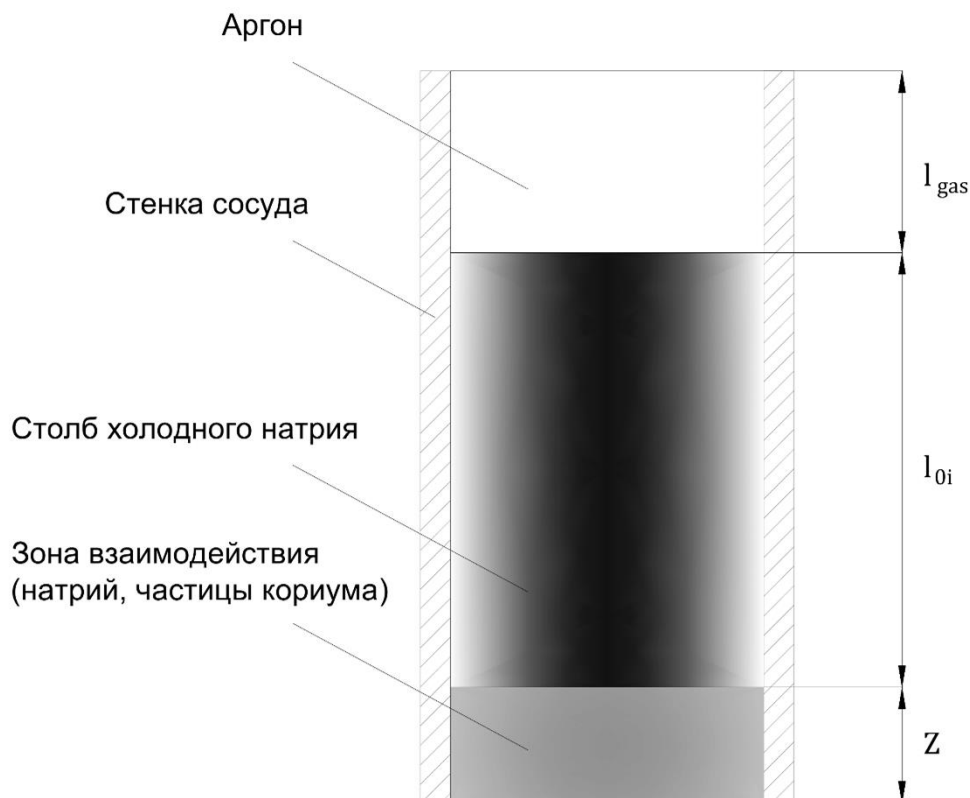


Рисунок 2 – Иллюстрация модели взаимодействия кориума с натрием

3.1 Модель термического взаимодействия частиц кориума с недогретым до температуры насыщения натрием

На первой фазе натрий находится в прямом контакте с кориумом, либо находится в состоянии переходного кипения, однако наличие образующегося пара натрия учитывается лишь при описании теплообмена между частицами кориума и жидким натрием.

3.1.1 Вывод уравнения сохранения энергии натрия в зоне взаимодействия

Для вывода уравнения сохранения энергии жидкого натрия воспользуемся первым законом термодинамики:

$$\frac{dh_{Na}}{dt} = \frac{dq}{dt} + v_{Na} \frac{dP}{dt}, \quad (4)$$

здесь h_l – удельная энтальпия натрия; q – количество тепла, переданное единице массы натрия в зоне взаимодействия от всех поступивших к данному моменту порций кориума; v_l – удельный объём натрия; P – давление в зоне взаимодействия; t – время.

Изменение энтальпии связано с изменением температуры и давления следующим образом:

$$\frac{dh_{Na}}{dt} = c_{pNa} \frac{dT_{Na}}{dt} + \left(\frac{\partial h_{Na}}{\partial P} \right)_T \frac{dP}{dt}, \quad (5)$$

здесь T_{Na} – температура натрия; c_{pNa} – удельная теплоёмкость натрия при постоянном давлении.

Воспользовавшись термодинамическим соотношением [34]

$$\left(\frac{\partial h_{Na}}{\partial P}\right)_T = v_{Na} - T_{Na} \left(\frac{\partial v_{Na}}{\partial T_{Na}}\right)_P, \quad (6)$$

получим окончательное выражение для изменения энтальпии:

$$\frac{dh_{Na}}{dt} = c_{pNa} \frac{dT_{Na}}{dt} + v_{Na} \frac{dP}{dt} - \alpha_{Na} T_{Na} v_{Na} \frac{dP}{dt}, \quad (7)$$

здесь $\alpha_{Na} = \frac{1}{v_{Na}} \left(\frac{\partial v_{Na}}{\partial T}\right)_P$ - температурный коэффициент объёмного расширения.

Подставив выражение (7) в (4), получим

$$\frac{dq}{dt} = c_{pNa} \frac{dT_{Na}}{dt} - \alpha_{Na} T_{Na} v_{Na} \frac{dP}{dt}. \quad (8)$$

Преобразуем уравнение (8) к окончательному виду уравнения сохранения энергии для жидкого натрия, который будет использоваться в дальнейшем:

$$c_{pNa} \frac{dT_{Na}}{dt} = \frac{T_{Na} \alpha_{Na}}{\rho_{Na,i}} \frac{dP}{dt} r_d + \frac{dq}{dt} \quad (9)$$

где параметр $r_d = \rho_{Na,i} / \rho_{Na}$, $\rho_{Na,i}$ - плотность натрия в момент времени t_i .

В уравнении (9) член $\frac{dq}{dt}$ определяется притоком тепла в зону взаимодействия от частиц кориума и оттоком тепла в стенки сосуда. На данной стадии рассматриваемого процесса отток тепла в стенки не существенен по сравнению с притоком тепла от частиц кориума, поэтому им можно пренебречь.

Для определения потока тепла от частиц кориума в натрий требуется определить поле температуры в частицах кориума.

3.1.2 Уравнение теплопроводности частицы кориума

Предполагается, что все частицы i -ой порции кориума имеют сферическую форму с радиусом R_{fi} . Для определения потока тепла, поступающего в зону взаимодействия от частиц кориума i -ой порции, необходимо найти поле температуры в частицах кориума i -ой порции. Суммарный поток от частиц всех порций, поступивших к данному моменту времени, определяется суммированием соответствующих потоков тепла от каждой порции.

Поле температуры определяется решением уравнения теплопроводности в частице:

$$\rho_f c_f \frac{\partial T_{fi}}{\partial t} = \lambda_f \left(\frac{\partial^2 T_{fi}}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T_{fi}}{\partial r} \right), \quad (10)$$

здесь ρ_f , c_f , λ_f - плотность, теплоемкость, коэффициент теплопроводности кориума, которые предполагаются постоянными, r - радиальная координата, $T_{f,i} = T_{f,i}(r, t)$ - температура в частице кориума.

В центре частицы задается условие симметрии:

$$\left. \frac{\partial T_{f,i}}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad (11)$$

В случае прямого контакта кориума с жидким натрием на поверхности частиц задается граничное условие первого рода. Температура поверхности частиц равна температуре окружающего натрия.

$$T_{f,i} \Big|_{r=0} = T_{Na} \quad (12)$$

Условие (12) обеспечивает максимально возможную скорость теплопередачи от частиц кориума в натрий и было выбрано для получения консервативных результатов с точки зрения значений динамических нагрузок при термическом взаимодействии кориума с натрием.

Решение уравнений теплопроводности (10) для частиц кориума различных порций с граничными условиями (11), (12) позволяет определить поток тепла в натрий.

Нами было уже отмечено, что интенсивная теплоотдача от частиц кориума в жидкий натрий при прямом контакте вызывает значительный рост давления в зоне взаимодействия. Однако последующее снижение давления может привести к тому, что на поверхности частиц кориума установится режим переходного кипения.

Для определения коэффициентов теплоотдачи при переходном кипении натрия используется подход, предложенный в [37] – плотность теплового потока определяется путём интерполяции между критической плотностью теплового потока q_{CHF} и плотностью теплового потока, соответствующей точке Лейденфроста q_{min} :

$$q_{ТВ} = q_{CHF} \left(\frac{T_w}{T_{CHF}} \right)^n \quad (13)$$

$$n = \frac{\ln\left(\frac{q_{CHF}}{q_{min}}\right)}{\ln\left(\frac{T_{CHF}}{T_{min}}\right)} \quad (14)$$

здесь T_w - температура поверхности частицы кориума; T_{CHF} – температура поверхности, при которой возникает кризис теплоотдачи; T_{min} - температура поверхности, при которой наступает плёночное кипение натрия (температура Лейденфроста). Вышеприведённые параметры проиллюстрированы на рис. 3.

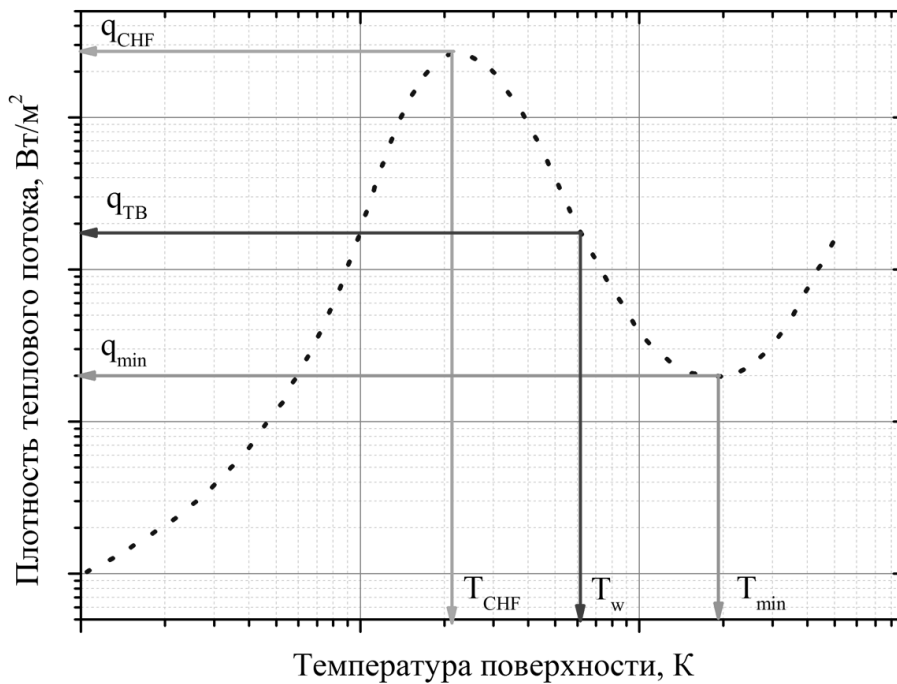


Рисунок 3 – К определению плотности теплового потока при переходном кипении

Для определения плотности критического теплового потока q_{CHF} , а также величин q_{min} и T_{min} используются корреляции [19], которые были получены при экспериментальном исследовании кипения натрия вокруг горячего шара из тантала. В оригинальной работе все формулы приведены в английской системе мер. Нами был выполнен их перевод в систему СИ:

$$q_{CHF} = 4,1 \cdot 10^6 \left[1 + 7,8 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{9}{5} (T_{Na,sat} - T_{Na}) \right] \cdot 3,15 \text{ [Вт/м}^2\text{]}, \quad (15)$$

$$q_{min} = \left[6.3 \cdot 10^4 + 1.9 \cdot 10^3 \cdot \frac{9}{5} (T_{Na,sat} - T_{Na}) \right] \cdot 3,15 \text{ [Вт/м}^2], \quad (16)$$

$$T_{min} = \frac{5}{9} \cdot 790 + 12.2(T_{Na,sat} - T_{Na}) + T_{Na,sat} \text{ [K]}, \quad (17)$$

здесь $T_{Na,sat}$ – температура насыщения натрия, T_{Na} – температура жидкого натрия.

Температура поверхности, при которой возникает кризис теплоотдачи T_{CHF} , находится из определения плотности теплового потока:

$$q_{CHF} = \alpha_{CHF} (T_{CHF} - T_{Na}) \quad (18)$$

где α_{CHF} – коэффициент теплоотдачи для пузырькового кипения металлов в большом объёме, который определяется из [23].

$$\alpha_{CHF} = A q_{CHF}^m \quad (19)$$

$A = 7,32$; $m = 0,7$.

Подставив (19) в (18), получим температуру поверхности, при которой возникает кризис теплоотдачи:

$$T_{CHF} = T_{Na} + \frac{q_{CHF}}{A q_{CHF}^m} \quad (20)$$

Подставив в (13), (14) формулы (15), (16), (17), (20), можно определить $q_{ТВ}$.

В дальнейших расчётах было принято, что режим переходного кипения реализуется при давлении натрия в зоне взаимодействия меньше 5 бар. Методические расчёты показали, что варьирование этого параметра влияет на результаты несущественно.

3.1.3 Определение потока тепла от частиц кориума в натрий

Площадь поверхности частиц i -ой порции определяется из соотношения:

$$F_i = f_i \cdot n_i \quad (21)$$

$f_i = 4\pi R_{f,i}^2$ - площадь поверхности одной частицы i -ой порции

$$n = \frac{V}{v} = \frac{\frac{\Delta M_f}{\rho_f}}{\frac{4}{3}\pi R_{f,i}^3} = \frac{3\Delta M_f}{4\rho_f \pi R_{f,i}^3} - \text{количество частиц в } i\text{-ой порции}$$

Тогда:

$$F_i = 4\pi R_{f,i}^2 \cdot \frac{3\Delta M_f}{4\rho_f \pi R_{f,i}^3} = \frac{3\Delta M_f}{\rho_f R_{f,i}} \quad (22)$$

Поток тепла от частиц i -ой порции кориума в зону взаимодействия определяется из:

$$\frac{dQ_{fi}}{dt} = \alpha_1 (T_{f,i}|_{r=R_{f,i}} - T_l) \frac{3\Delta M_f}{\rho_f R_{f,i}} \quad (23)$$

здесь ΔM_f – масса одной порции частиц кориума (предполагается, что масса всех порций кориума одинаковая).

Суммарный поток тепла, подводимый к единице массы натрия в зоне взаимодействия от всех поступивших к данному моменту порций кориума

$$\begin{aligned} \frac{dq_f}{dt} &= \frac{1}{N \cdot \Delta M_{Na}} \sum_i \frac{dQ_{fi}}{dt} = \frac{1}{N \cdot \Delta M_{Na}} \sum_i \alpha_1 (T_{f,i}|_{r=R_{f,i}} - T_l) \frac{3\Delta M_f}{\rho_f R_{f,i}} \\ &= \frac{\Delta M_f}{\Delta M_{Na}} \frac{\sum_i \alpha_1 (T_{f,i}|_{r=R_{f,i}} - T_l) \frac{3}{\rho_f R_{f,i}}}{N} = M_r \frac{\sum_i \alpha_1 (T_{f,i}|_{r=R_{f,i}} - T_l) \frac{3}{\rho_f R_{f,i}}}{N} \end{aligned} \quad (24)$$

N – общее количество порций кориума, поступивших в натрий к данному моменту времени.

Предполагается, что при поступлении одной порции частиц кориума в зону взаимодействия (ΔM_f), так же при этом в зону взаимодействия поступает соответствующая масса жидкого натрия (ΔM_{Na}), которая изымается от столба «холодного» натрия. Отношение масс кориума и натрия в зоне взаимодействия (M_r) полагается постоянным в ходе рассматриваемого процесса. Отметим, что величина M_r является варьируемым («подгоночным») параметром и её значение определяется наилучшим совпадением расчётных и экспериментальных данных.

3.1.4 Вывод уравнения для изменения объёма (высоты) зоны взаимодействия

Масса зоны взаимодействия в интервале времени между поступлениями двух последовательных порций расплава сохраняется:

$$M_f + M_{Na} + M_g = \text{const} \quad (t_i < t < t_{i+1}) \quad (25)$$

M_f – масса кориума; M_{Na} – масса жидкого натрия; M_g – масса неконденсирующихся газов.

Объём зоны взаимодействия определяется массой и плотностью составляющих её компонент (кориум, натрий и неконденсирующиеся газы).

$$V = \frac{M_f}{\rho_f} + \frac{M_g}{\rho_g} + \frac{M_{Na}}{\rho_{Na}} \quad (26)$$

здесь V – объём зоны взаимодействия; ρ_f – плотность кориума; ρ_g – плотность неконденсирующихся газов; ρ_l – плотность натрия.

В момент времени t_i объём зоны взаимодействия равен

$$V_i = \frac{M_f}{\rho_f} + \frac{M_g}{\rho_{g,i}} + \frac{M_{Na}}{\rho_{Na,i}} \quad (27)$$

V_i – объём зоны взаимодействия в момент времени t_i ; $\rho_{Na,i}$ – плотность натрия в момент времени t_i ; $\rho_{g,i}$ – плотность неконденсирующихся газов в начальный момент времени;

В зоне взаимодействия могут находиться неконденсирующиеся газы. Изменение объёма этих газов происходит изоэнтропически

$$\frac{P}{\rho_g^k} = \frac{P_i}{\rho_{g,i}^k} \quad (28)$$

здесь k – отношение теплоемкости при постоянном давлении к теплоемкости при постоянном объёме; P_i – давление в зоне взаимодействия в момент времени t_i .

Для получения уравнения, описывающего изменение объёма зоны взаимодействия, про дифференцируем соотношения (26), (28) по времени:

$$\frac{dV}{dt} = -\frac{M_g}{\rho_g^2} \frac{d\rho_g}{dt} - \frac{M_{Na}}{\rho_{Na}^2} \frac{d\rho_l}{dt} \quad (29)$$

$$\frac{1}{\rho_g^2} \frac{d\rho_g}{dt} = \frac{1}{k P_i} \left(\frac{P_i}{P}\right)^{\frac{k+1}{k}} \frac{dP}{dt} \frac{1}{\rho_{g,i}} \quad (30)$$

Используя уравнение состояния $\rho_{Na} = \rho_{Na}(P, T_{Na})$, найдём второй член правой части уравнения (29)

$$-\frac{M_{Na}}{\rho_{Na}^2} \frac{d\rho_{Na}}{dt} = \frac{M_{Na}}{\rho_{Na}} \left(\alpha_{Na} \frac{dT_{Na}}{dt} - \beta_{Na} \frac{dP}{dt} \right) \quad (31)$$

здесь $\beta_{Na} = -\frac{1}{v_{Na}} \left(\frac{\partial v_{Na}}{\partial P} \right)_T$ – коэффициент изотермической сжимаемости.

В предположении, что зона взаимодействия занимает всё проходное сечение рассматриваемого сосуда, а сама площадь проходного сечения в рассматриваемой задаче постоянная, изменение объёма зоны взаимодействия (V) линейно связано с изменением её высоты (Z). Из уравнений (26), (27), (29), (30), (31) получим уравнение для изменения высоты зоны взаимодействия:

$$\frac{dZ}{dt} = \frac{r_{v,i} \beta_{Na} r_d Z_i}{1 + r_{v,i} + r_{v,i} \phi_i} \left(\gamma \frac{dT_{Na}}{dt} - \frac{dP}{dt} \right) - \frac{\phi_i Z_i}{k P_i} \left(\frac{P_i}{P} \right)^{\frac{k+1}{k}} \frac{dP}{dt} \frac{r_{v,i}}{1 + r_{v,i} + r_{v,i} \phi_i} \quad (32)$$

здесь $\gamma = \frac{\alpha_{Na}}{\beta_{Na}}$ – отношение температурного коэффициента объёмного расширения к коэффициенту изотермической сжимаемости; $\phi_i = \left(\frac{\rho_{Na,i}}{\rho_{g,i}} \right) \left(\frac{M_g}{M_{Na}} \right)$ – отношение объёмов неконденсирующегося газа и натрия; $r_{v,i} = \left(\frac{P_f}{\rho_{Na,i}} \right) / M_r$ – отношение объёмов натрия и частиц кориума в зоне взаимодействия; Z_i – высота зоны взаимодействия; индекс i означает, что параметр соответствует моменту времени t_i .

Для определённого ранее параметра r_d (см. формулу (9)), входящего в уравнение (32), из (26)-(28) можно получить следующее соотношение:

$$r_d = \frac{Z}{Z_i} \frac{1 + r_{v,i} + r_{v,i} \phi_i}{r_{v,i}} - \frac{1 + r_{v,i} \phi_i (P_i/P)^{1/k}}{r_{v,i}} \quad (33)$$

3.1.5 Уравнение движения столба «холодного» натрия

Рассмотрим динамику движения столба жидкости, расположенного над зоной взаимодействия. Вследствие роста давления в зоне взаимодействия этот столб приходит в движение, которое в свою очередь, влияет на изменение давления в зоне взаимодействия.

В начальный момент времени рассматриваемого процесса происходит подача горячего кориума в зону взаимодействия, в которой находится только жидкий натрий. За счёт теплопередачи от частиц кориума в жидкий натрий в зоне взаимодействия, он начинает расширяться, тем самым увеличивается зона взаимодействия. Однако, столб «холодного» натрия, находящийся над ней, благодаря своей инерции ограничивает этот процесс, в результате чего начинает быстро расти давление в зоне взаимодействия, поскольку натрий находится в жидком состоянии, и его сжимаемость мала. Благодаря возрастающему давлению в зоне взаимодействия столб холодного натрия приходит в движение. Чтобы корректно описать расширение зоны взаимодействия на начальной стадии, необходимо учесть волновые процессы в столбе «холодного» натрия, которые влияют на положение его границы с зоной взаимодействия. Это обусловлено тем, что находящийся в зоне взаимодействия жидкий натрий, имеет малую сжимаемость, и приток тепла от частиц кориума может вызвать существенный рост давления в натрии, на темпы которого влияет также процесс расширения. Поэтому на данной стадии процесса необходимо рассчитывать границу зоны взаимодействия и столба «холодного» натрия с учётом его сжимаемости.

Для описания волновых процессов в столбе «холодного» натрия воспользуемся акустическим приближением гидродинамических уравнений [35]. Для потенциала скорости натрия U имеем следующее уравнение гиперболического типа:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = c_0^2 \frac{\partial^2 U}{\partial x^2}, \quad (34)$$

где $v = -\frac{\partial U}{\partial x}$ – скорость «холодного» натрия; x – продольная координата, отсчитываемая от нижней границы столба натрия; c_0 – скорость звука в «холодном» натрии.

В начальный момент времени скорость «холодного» натрия равна нулю. На нижней границе столба «холодного» натрия ($x=0$) давление равно давлению в зоне взаимодействия, которое меняется со временем $P(t)$. На верхней границе столба «холодного» натрия ($x = L_0$) давление равно внешнему давлению P_{ext} , которое практически не меняется за времена, когда вклад волновых процессов существенен. В соответствии с этим, граничные условия для потенциала имеют следующий вид:

$$\begin{cases} U(x, 0) = 0, \\ U(0, t) = \mu(t), \\ U(L_0, t) = 0, \end{cases} \quad (35)$$

где $\mu(t) = \frac{1}{\rho_{Na,0}} \int_0^t (P - P_{ext}) dt$; ρ_{10} - плотность «холодного» натрия.

Решение уравнения (34) имеет следующий вид:

$$U(x, t) = \sum_{k=0}^{\infty} \bar{\mu} \left(t - k \cdot t_{ac} - \frac{x}{c_0} \right) - \sum_{k=1}^{\infty} \bar{\mu} \left(t - k \cdot t_{ac} + \frac{x}{c_0} \right) \quad (36)$$

где $\bar{\mu} \left(t - k \cdot t_{ac} + \frac{x}{c_0} \right) = \mu \left(t - k \cdot t_{ac} + \frac{x}{c_0} \right)$, при $t - k \cdot t_{ac} + \frac{x}{c_0} > 0$.

$$\bar{\mu}(\Theta) = \begin{cases} \mu(\Theta), & \text{при } \Theta > 0 \\ 0, & \text{при } \Theta < 0 \end{cases} \quad (37)$$

Скорость движения нижней границы столба «холодного» натрия определяется следующим образом:

$$v = - \left. \frac{\partial U}{\partial x} \right|_{x=0} = \frac{1}{c_0} \left\{ \frac{1}{\rho_{Na,0}} (P(t) - P_{ext}) + 2 \cdot \sum_{k=1}^n \frac{1}{\rho_{Na,0}} (P(t - k \cdot t_{ac}) - P_{ext}) \right\} \quad (38)$$

где $t_{ac} = 2L_0/c_0$ - акустическое время; n - целая часть величины t/t_{ac} .

Будем учитывать волновые процессы в столбе «холодного» натрия только при $t < t_{ac}$. В этом случае, уравнение для изменения высоты зоны взаимодействия примет следующий вид:

$$\frac{dZ}{dt} = \frac{P(t) - P_{ext}}{c_0 \rho_{Na,0}} \quad (39)$$

На последующей стадии ($t \geq t_{ac}$) волновые процессы не учитываются, и движение столба «холодного» натрия описывается следующим уравнением:

$$\frac{d^2 Z}{dt^2} = \frac{P - P_{ext}}{\rho_{Na,0} L_0} - g - \frac{\xi}{L_0} \left(\frac{dZ}{dt} \right)^2 \quad (40)$$

3.1.6 Описание процессов в газовой полости над столбом «холодного» натрия

Над столбом натрия находится полость, заполненная неконденсирующимся газом (рис. 2). Практически во всех экспериментах, в качестве газа используется аргон.

Температура аргона определяется из закона сохранения энергии, в котором учитывается теплообмен со стенками сосуда и работа, связанная с изменением объема газовой полости:

$$M_{Ar} c_{vAr} \frac{dT_{Ar}}{dt} = \alpha_{Ar} S (T_W - T_{Ar}) - P_{ext} \frac{dV_{Ar}}{dt} \quad (41)$$

здесь M_{Ar} - масса аргона; c_{vAr} - теплоёмкость аргона при постоянном объёме; T_{Ar} - температура аргона; α_{Ar} - коэффициент теплоотдачи от аргона к окружающим стенкам; T_W - температура поверхности стенок; S - площадь поверхности стенок; V_{Ar} - объём аргона.

Давление газа определяется из уравнения состояния для идеального газа:

$$\frac{P_{ext} V_{Ar}}{T_{Ar}} = const \quad (42)$$

Следует отметить, что объём газа и площадь поверхности теплообмена газа со стенками сосуда меняются во времени в соответствии с продвижением столба «холодного» натрия.

Таким образом, система уравнений (9), (10), (32), (39), (40) образует математическую модель, описывающую термическое взаимодействие частиц кориума с недогретым до температуры насыщения натрием.

3.2 Модель термического взаимодействия частиц кориума с двухфазным натрием

После того как натрий в зоне взаимодействия нагреется до температуры насыщения, он переходит в двухфазное состояние – жидкость и пар. Для описания процессов термического взаимодействия кориума

с двухфазным натрием требуется новая формулировка уравнений для энергии и объёма зоны взаимодействия. Уравнения движения столба холодного натрия (39), (40) не зависят от того находится ли натрий в двухфазном или однофазном состоянии в зоне взаимодействия. Уравнение теплопроводности (10) для частиц кориума также универсально относительно состояния среды, с которой контактирует частицы кориума (жидкий или двухфазный натрий).

3.2.1 Уравнение сохранения энергии натрия в зоне взаимодействия

В двухфазном случае энтальпия натрия определяется энтальпиями фаз на линии насыщения:

$$h_{Na} = xh''_{Na} + (1 - x)h'_{Na} \quad (43)$$

где x - массовое паросодержание.

Подставляя выражение для h_{Na} в уравнение сохранения энергии

$$\frac{dh_{Na}}{dt} = \frac{dq}{dt} + v_{Na} \frac{dP}{dt}, \quad (44)$$

получим следующую формулировку для уравнения энергии в двухфазном случае:

$$\left(x \frac{dh''_{Na}}{dT_{Na}} + (1 - x) \frac{dh'_{Na}}{dT_{Na}} - v_{Na} \frac{dP}{dT_{Na}} \right) \frac{dT_{Na}}{dt} + (h''_{Na} - h'_{Na}) \frac{dx}{dt} = \frac{dq}{dt}. \quad (45)$$

Так же как и для первой фазы процесса, приток тепла в зону взаимодействия $\frac{dq}{dt}$ определяется за счёт поступления тепла от частиц кориума и отвода тепла в стенки из-за конденсации паров натрия. Таким образом, поток тепла в зону взаимодействия будет определяться следующим образом:

$$\frac{dq}{dt} = \frac{dq_f}{dt} - \frac{dq_{cond}}{dt} \quad (46)$$

Температура стенок канала во время второй фазы может быть меньше температуры насыщения теплоносителя. Ввиду этого необходимо учитывать конденсацию пара на стенках канала. Для коэффициента теплоотдачи при конденсации используется следующее соотношение [36]:

$$\alpha_{cond} = \left(\frac{M_c}{2\pi R} \right)^{0.5} \frac{\rho_g L^2}{T_{Na}^{1.5}} \quad (47)$$

здесь M_c – молярная масса натрия; L – скрытая теплота парообразования; R – универсальная газовая постоянная.

Количество теплоты, затраченной на конденсацию пара натрия на стенках сосуда определяется следующим образом:

$$q_{cond} = \alpha_{cond} \cdot Z \cdot \pi \cdot D \cdot \varphi \cdot (T_w - T_{Na}) \quad (48)$$

3.2.2 Уравнение для изменения объёма (высоты) зоны взаимодействия

Объём зоны взаимодействия будет определяться из соотношения

$$V = \frac{M_f}{\rho_f} + \frac{M_{Na}}{\rho_{Na}} \quad (49)$$

здесь M_{Na} , ρ_{Na} – соответственно масса и плотность двухфазного натрия в зоне взаимодействия.

Продифференцировав уравнение по времени, в предположении, что плотность кориума постоянна, получим:

$$\frac{dV}{dt} = - \frac{M_{Na}}{\rho_{Na}^2} \frac{d\rho_c}{dt} \quad (50)$$

В двухфазном случае удельный объём натрия складывается из объёмов жидкости и пара:

$$v_{Na} = xv''_{Na} + (1 - x)v'_{Na} \quad (51)$$

здесь v'_{Na} , v''_{Na} - удельные объемы жидкости и пара на линии насыщения.

Объем натрия в зоне взаимодействия равен:

$$V_{Na} = M_{Na} v_{Na} = M_{Na} (x v''_{Na} + (1-x) v'_{Na}) \quad (52)$$

Перейдем к плотностям фаз на линии насыщения:

$$V_{Na} = M_{Na} \left[\frac{x}{\rho''_{Na}} + \frac{1-x}{\rho'_{Na}} \right] \quad (53)$$

здесь ρ'_{Na} , ρ''_{Na} - плотности жидкой и паровой фаз на линии насыщения.

Изменение объема зоны взаимодействия определяется изменением объема находящегося в ней теплоносителя:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{dV_{Na}}{dt} \quad (54)$$

В итоге получим:

$$\frac{dV}{dt} = M_{Na} \left(-\frac{x}{\rho''_{Na}} \frac{d\rho''_{Na}}{dT_{Na}} - \frac{(1-x)}{\rho'_{Na}} \frac{d\rho'_{Na}}{dT_c} \right) \frac{dT}{dt} + M_{Na} \left(\frac{1}{\rho''_{Na}} - \frac{1}{\rho'_{Na}} \right) \frac{dx}{dt} \quad (55)$$

3.3 Моделирование теплоотдачи от частиц кориума в натрий и теплообмена между зоной взаимодействия и стенками сосуда из-за конденсации пара

Во время кипения натрия, частицы кориума окружены паровой плёнкой. Относительная толщина плёнки $y = \delta/R_f$ (δ - толщина плёнки пара, R_f - радиус частицы кориума) рассчитывается на основе модели, предложенной в [7]:

$$y^3 = 1.5 \frac{\mu_c}{g R_f \rho''_{Na}} \frac{1}{M_r} \frac{dx}{dt} \quad (56)$$

здесь μ_c - динамическая вязкость плёнки пара натрия.

Тепловой поток Q_f , проходящий через паровую плёнку, определяется следующим выражением [37]:

$$Q_f = q_f \cdot F = -\lambda_f \frac{dT}{dr} 4\pi R_f^2 = -\frac{(T_f|_{r=R_f} - T_{Na})}{\frac{R_f^2}{\lambda_v} \left(\frac{1}{R_f} - \frac{1}{R_f + \delta} \right)} 4\pi R_f^2 = \frac{4\pi \lambda_v (T_f|_{r=R_f} - T_{Na})}{\frac{1}{R_f} - \frac{1}{R_f + \delta}} \quad (57)$$

λ_v - теплопроводность пара натрия; λ_f - теплопроводность частицы кориума; q_f - плотность теплового потока; F - площадь поверхности частицы кориума.

3.4 Изменение моделируемых параметров термического взаимодействия при поступлении очередной порции частиц кориума

В модели реализован следующий алгоритм пересчёта параметров процесса термического взаимодействия при подаче в зону взаимодействия очередной порции частиц кориума в момент времени t_i :

- Масса натрия в зоне взаимодействия изменяется на величину ΔM_c ;
- Масса столба холодного натрия уменьшается на величину ΔM_c , соответственно уменьшается высота столба «холодного» натрия L_i ;
- Высота зоны взаимодействия увеличивается на высоту, занимаемую пришедшим натрием и порцией кориума: $Z_i = Z + \frac{\Delta M_c}{\rho_l F} + \frac{\Delta M_f}{\rho_f F}$.

В модели используется предположение, что натрий, поступающий из «холодного» столба имеет температуру, равную температуре в зоне взаимодействия в текущий момент времени.

4 Валидация математической модели взаимодействия кориума с натрием на опытных данных

Описанная выше модель термического взаимодействия кориума с натрием была реализована в виде расчётного кода CSI и валидирована на опытных данных, полученных на экспериментальных установках THINA [33] и ПЛУТОН [34].

4.1 Валидация на опытных данных, полученных на установке THINA

4.1.1 Описание экспериментальной установки THINA

Установка THINA [33] была сооружена в германском ядерном центре в Карлсруэ для исследования термического взаимодействия кориума с натрием. Установка состоит из двух основных частей: экспериментального сосуда (рис. 4) и системы для приготовления и подачи кориума (рис. 5).

Около половины экспериментального сосуда заполнено жидким натрием; над поверхностью натрия находится газ для компенсации объёмных расширений. Внутренняя стальная облицовка предназначена для защиты экспериментального сосуда от воздействий со стороны кориума. Величина диаметра сосуда (0.3 м) выбрана из расчёта возможности использования рентгеновской диагностики исследуемых процессов.

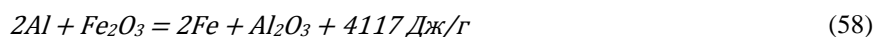
Для измерения параметров эксперимента используется следующая измерительная аппаратура:

- датчики давления, расположенные в натрии и в газе;
- около 100 датчиков температуры и паросодержания;
- 4 установки рентгеновского излучения, обеспечивающих как высокоскоростную съёмку, так и формирование аналоговых сигналов от фотодиодов для получения картины объёмного паросодержания;
- индикатор уровня.

Изменения давления во времени измеряются с помощью пьезо-электрических датчиков, размещённых на высотах 100, 500, 1000 и 4000 мм. Датчики P61-P63 измеряют давления в натрии, датчик P64 измеряет значения давления в газовой полости. Датчик давления P03 измеряет давление в трубе газовой системы.

Установка рентгеновского излучения даёт информацию о перемещении кориума в экспериментальном сосуде и образовании зоны термического взаимодействия в ходе эксперимента. Установка состоит из рентгеновской трубки, преобразователя/усилителя сигнала, высокоскоростной камеры с частотой съёмки 500 кадров в секунду и массива фотодиодов (10 x 10).

Система подачи кориума рассчитана на 5 кг кориума. Кориум подготавливается в тигле с помощью экзотермической реакции алюминий/оксид железа, согласно уравнению:



Тигель подключается к экспериментальному сосуду с помощью трубы, оборудованной двумя задвижками, с помощью которых осуществляется контроль подачи кориума. Изначально труба закрыта с обеих сторон с помощью тонких стальных листов.

Продукты реакции, алюминий и железо, обычно разделяются в ходе и после реакции ввиду разности их плотностей. Этот эффект был учтён в конструкции тиглей, один из которых позволяет подавать кориум, состоящий главным образом из алюминия, а второй – в большей части из железа. В случае подачи алюминия, полость в нижней части тигля собирает «тяжёлое» железо и, таким образом, препятствует его выходу (рис. 5).

4.1.2 Описание экспериментов, выполненных на установке THINA

Основные параметры экспериментов представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Основные параметры экспериментов THINA

	TH561	TH562	TH564	TH567
Температура кориума, К	2780	3100	3100	3100
Время подачи кориума, с	0,190	0,173	0,156	0,143
Масса кориума, кг	5,5	4,1	5,5	4,9
Масса Al_2O_3	4,0	3,1	1,3	1,1
Масса Fe	1,5	1,0	4,2	3,8
Масса натрия, кг	155	155	155	140
Температура натрия, К	783-808	773-785	763-795	813-823
Уровень натрия, м	2,67	2,67	2,70	2,42
Давление аргона, бар	1,10	1,10	1,10	1,07

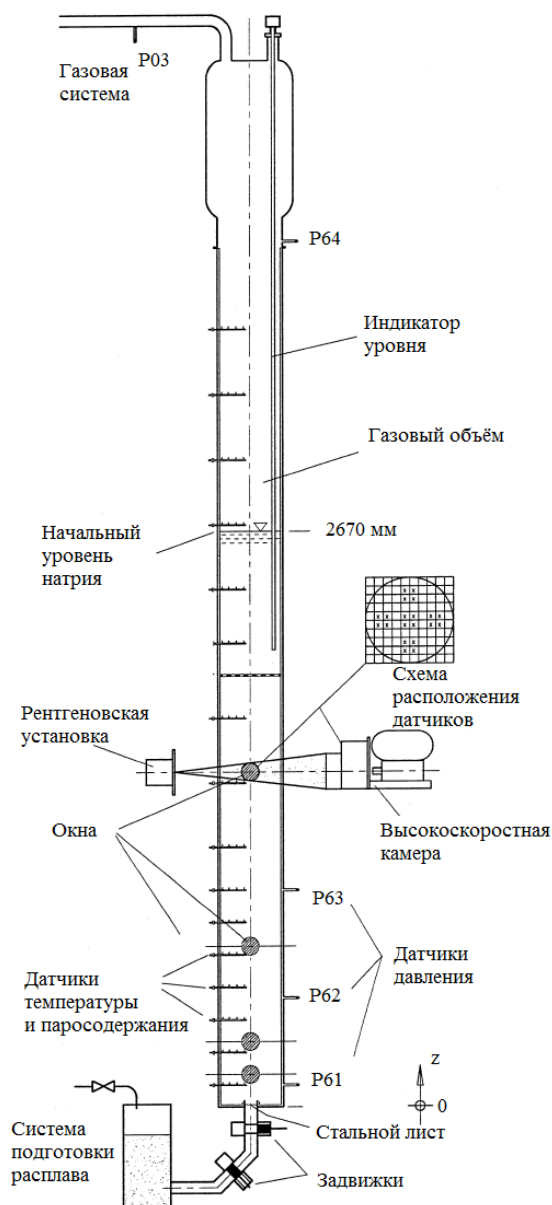


Рисунок 4 - Экспериментальный сосуд THINA

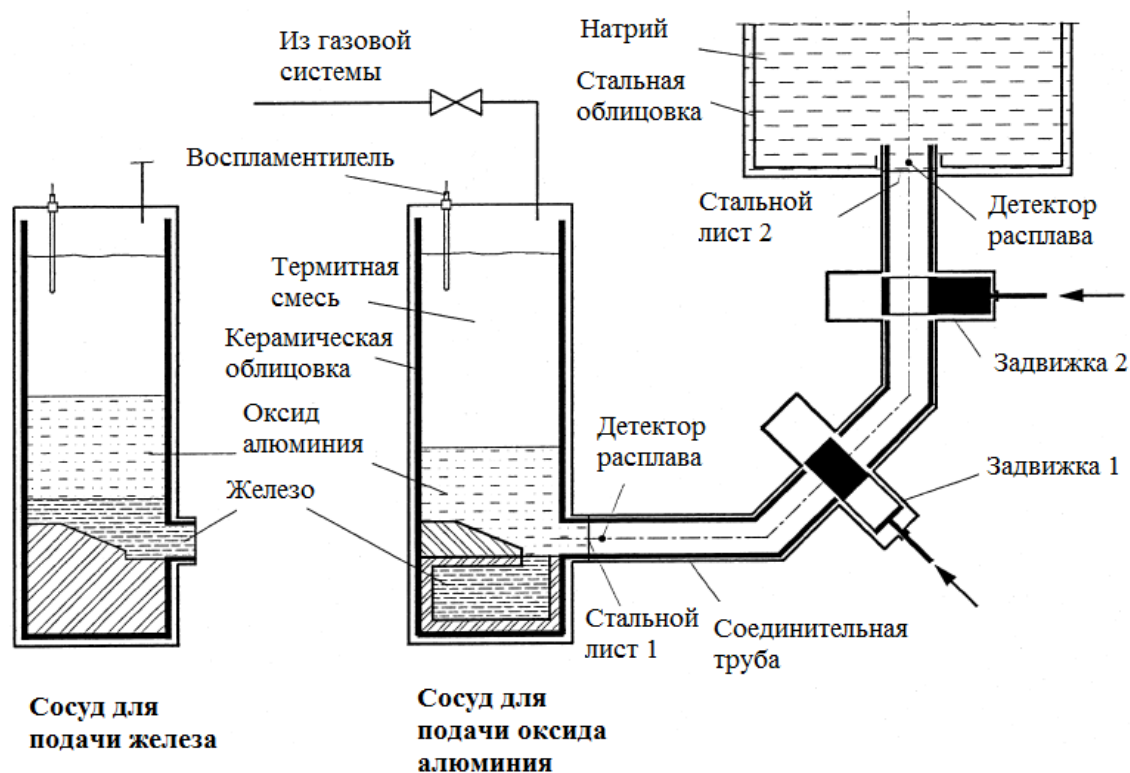


Рисунок 5 - Система подготовки кориума в экспериментах THINA

Сразу после разрыва второй стальной пластины происходит взаимодействие кориума с натрием и его резкое вскипание. В нижней части бассейна с натрием начинает формироваться зона термического взаимодействия кориума с натрием (многофазная область, состоящая из фрагментов кориума, пара натрия и жидкого натрия). В эксперименте область термического взаимодействия определяется как зона, вокруг которой находится только жидкость.

Взаимодействие происходит как в аксиальном направлении, так и в радиальном. В области термического взаимодействия происходит интенсивное парообразование, за счёт чего происходит увеличения её объёма и выталкивание вверх «холодного» столба натрия, находящегося выше. Процесс расширения зоны взаимодействия очень динамичный и длится около 0,3 с. Максимальное расширение зоны взаимодействия наблюдается на отметке около 2,0 м. Последующий период, в котором вытесненный натрий возвращается и происходит конденсация пара (коллапс пара), длится 0,3 – 0,4 с. Последнее событие характеризуется пиком давления.

Оба периода (расширение и коллапс зоны взаимодействия) определяются балансом парообразования и конденсации, а также инерцией движущегося над областью взаимодействия столба жидкого натрия. Парообразование – доминирующий процесс в ходе подачи кориума. После чего доминирующими становятся конденсация и сила гравитации, вызывая замедление движущегося вверх столба жидкого натрия, после чего он начинает двигаться вниз.

Экспериментальная временная зависимость давления натрия и давления в газовой полости, а также границы области зоны термического взаимодействия для эксперимента TH562 приведены на рис. 6.

Распределение частиц кориума по размерам для всех экспериментов (Табл. 2) приведено на рис. 7.

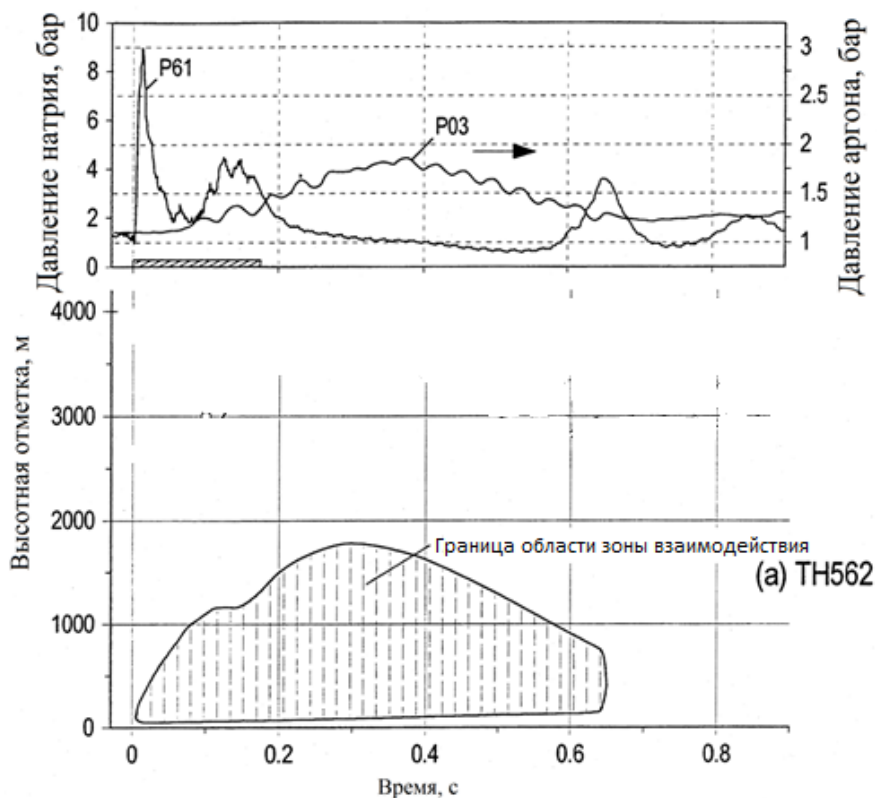


Рисунок 6 - Результаты эксперимента TH562

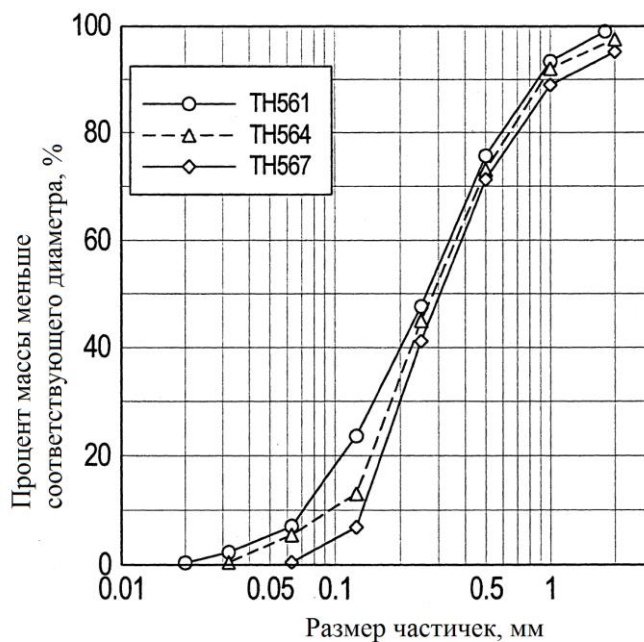


Рисунок 7 - Распределение частиц по размерам после экспериментов THINA

После анализа экспериментов авторы [33] сделали вывод, что ни в одном из проведённых экспериментов не было реализовано плёночное кипение на каплях кориума, однако на них наблюдался режим переходного кипения, характеризующийся всплесками давления в зоне взаимодействия (рис. 6).

4.1.3 Методические исследования влияния параметров модели расчётного кода CSI применительно к экспериментам THINA

4.1.3.1 Влияние количества порций кориума

Одним из настраиваемых параметров математической модели – количество порций, с помощью которых моделируется подача расплава во времени. В условиях, типичных для экспериментов THINA, были выполнены параметрические расчёты, в которых варьировался этот параметр. Результаты расчётов приведены ниже.

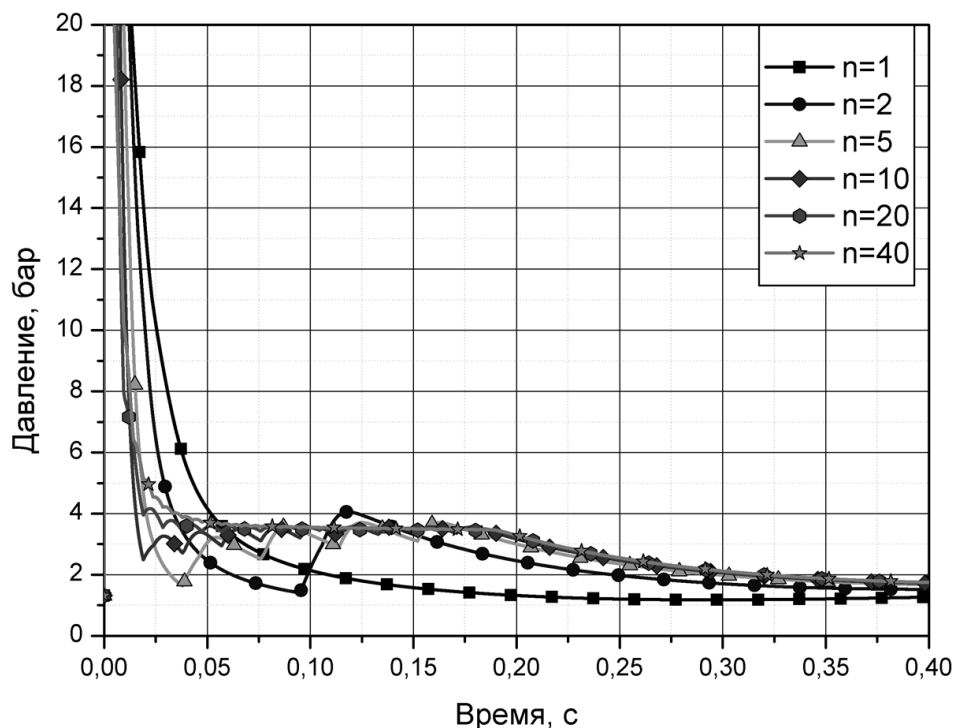


Рисунок 8 – Давление в зоне взаимодействия для различного количества порций кориума

На рис. 8 приведена временная зависимость давления в зоне взаимодействия только с момента времени 0.001 с, поскольку при меньших временах развиваются очень высокие давления в связи со слабой сжимаемостью жидкого натрия, порядок которых существенно превосходит принятый масштаб шкалы соответствующей более поздней стадии процесса термического взаимодействия. Именно на этой стадии процесса параметры термического взаимодействия определяют динамические нагрузки на конструкции.

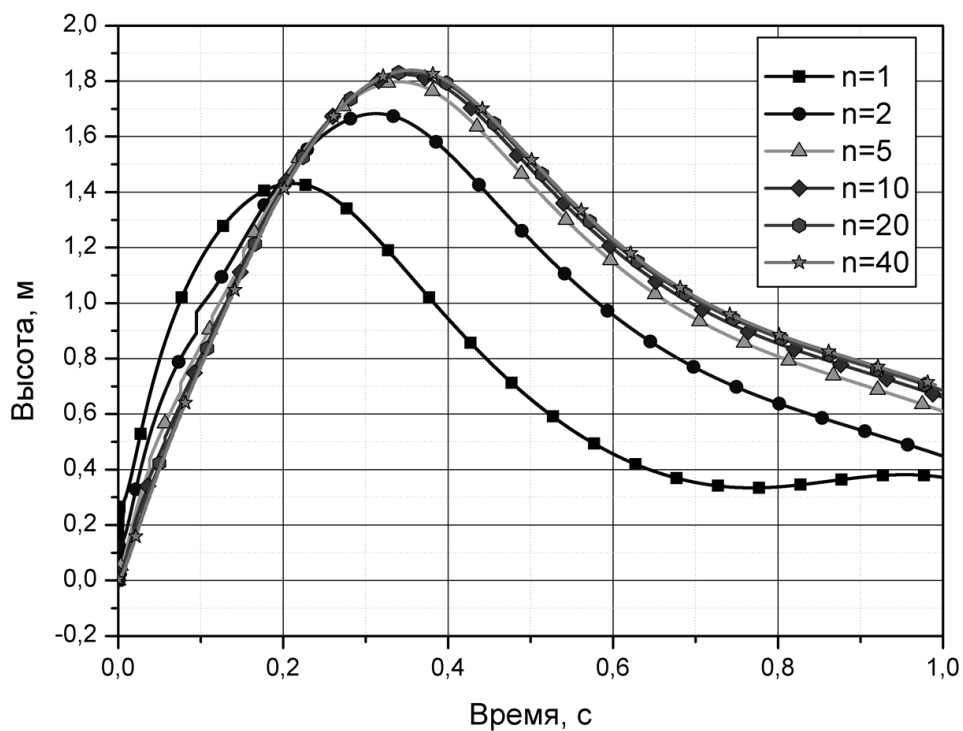


Рисунок 9 – Высота зоны взаимодействия для различных количеств порций корюма

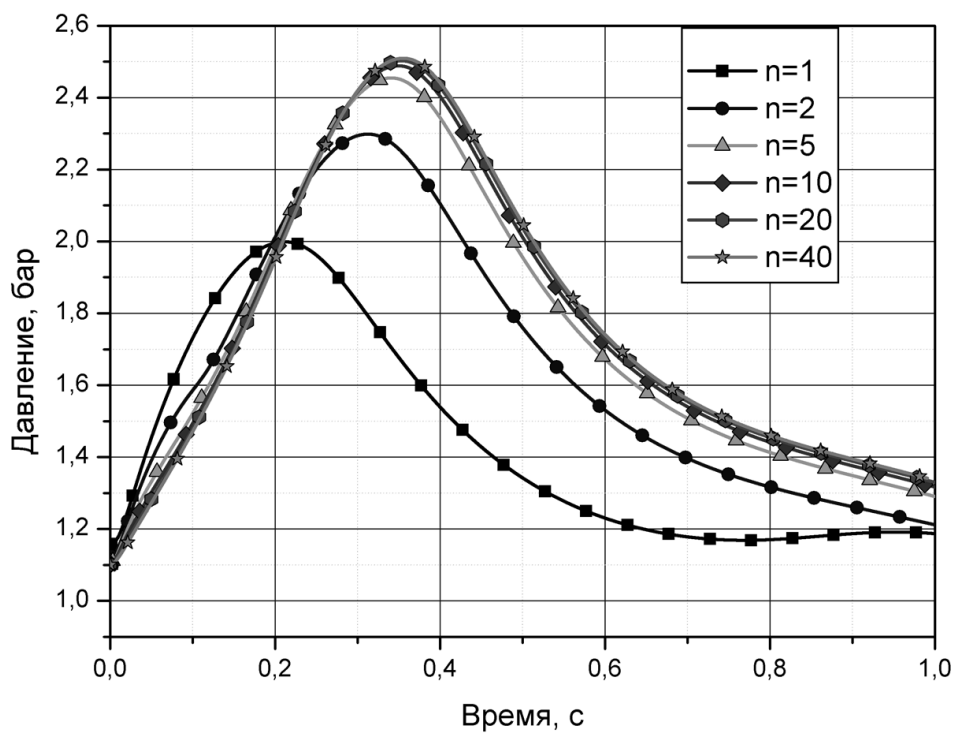


Рисунок 10 – Давление газовой полости для различных количеств порций корюма

Результаты расчётов показывают, что начиная с двадцати порций расплава численные результаты слабо зависят от этого параметра. Поэтому в последующих расчётах использовалось количество порция, равное двадцати.

Эти же расчёты показали, что длительность первой фазы взаимодействия кориума с натрием, когда сжимаемость натрия существенна, примерно равна акустическому времени. Поэтому в расчётах ниже учёт сжимаемости производился при $t < t_{ас}$. При $t \geq t_{ас}$ использовалось инерционное приближение.

4.1.3.2 Влияние отношения массы натрия к массе кориума в зоне взаимодействия

Одним из основных неопределённых параметров математической модели является отношение массы натрия к массе кориума в зоне взаимодействия - $scr = 1/M_r$. Были проведены расчёты процесса термического взаимодействия с различными значениями этого параметра: 0,3, 0,8, 1,5, 3,0. На рис. 11-13 приведены рассчитанные параметры процесса термического взаимодействия. В проведённых расчётах первая фаза процесса моделировалась в следующем предположении: сначала устанавливается прямой контакт между кориумом и натрием, затем по мере снижения давления в зоне взаимодействия до значения 5 бар реализуется режим переходного кипения. В момент времени, когда температура натрия в зоне взаимодействия достигла температуры насыщения – на частицах кориума устанавливается режим плёночного кипения.

Из рис. 11 видно, что при отношении массы натрия к массе кориума равной 3,0, на второй фазе процесса наблюдается рост давления в зоне взаимодействия. Это объясняется тем, что начало второй фазы связано с объёмным вскипанием натрия в зоне взаимодействия и процессом конденсации пара натрия на стенках сосуда (см. раздел 3.2), теплоотдача при которой зависит от температуры натрия. Чем выше температура пара натрия, тем интенсивнее происходит процесс конденсации, тем большее количества тепла отводится из зоны взаимодействия. Динамика процесса термического взаимодействия кориума натрия в разработанной математической модели определяется двумя факторами: притоком тепла в зону взаимодействия от частиц кориума и процессами конденсации пара на стенках сосуда. При отношении массы натрия к массе кориума взаимодействия равной 0,3, 0,8, 1,5 – процесс конденсации пара является доминирующим в момент времени равный 0,05 с, за счёт чего не наблюдается роста давления в начальный момент вскипания натрия. В то время как при отношении масс натрия и кориума равной 3,0 – процессы конденсации в данный момент времени не являются определяющими и в этом случае наблюдается ярко выраженный пик давления в зоне взаимодействия порядка 8 бар.

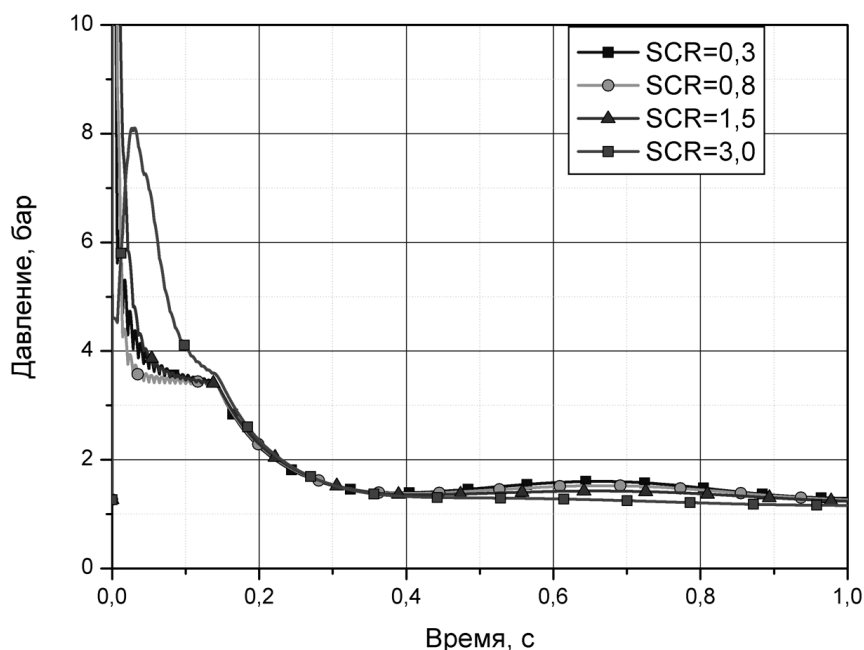


Рисунок 11 – Давление натрия в зоне взаимодействия для различного отношения массы натрия и кориума в зоне взаимодействия

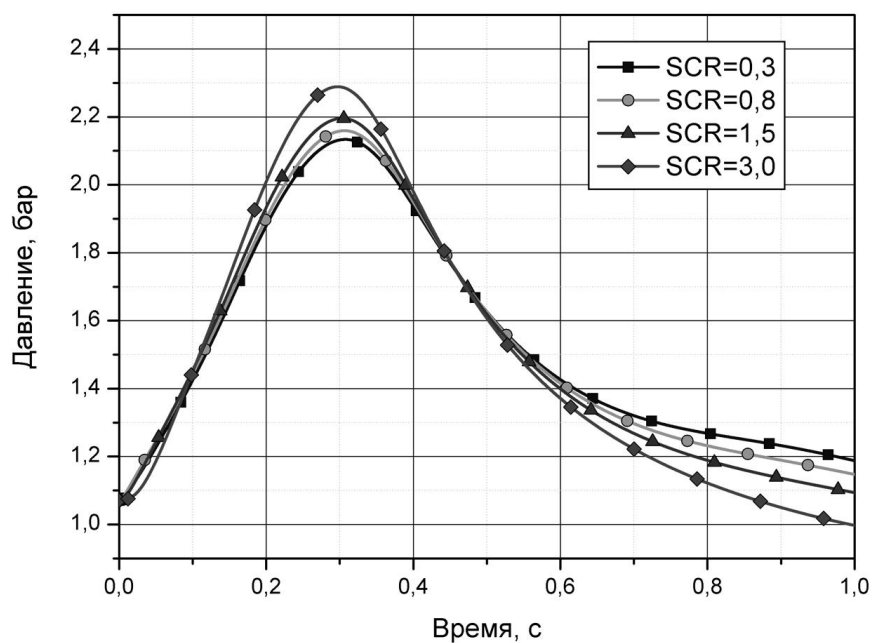


Рисунок 12 – Давление в газовой полости для различного отношения массы натрия и кориума в зоне взаимодействия

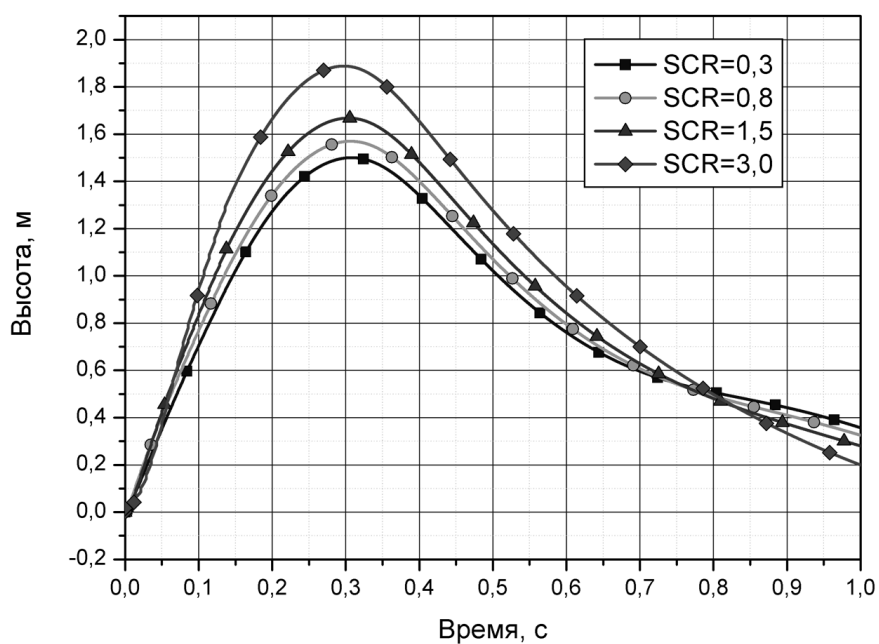


Рисунок 13 – Высота зоны взаимодействия для различного отношения массы натрия и кориума в зоне взаимодействия

4.1.3.3 Влияние способа моделирования первой фазы процесса термического взаимодействия

Также были исследовано влияние способа моделирования первой фазы процесса на основные параметры термического взаимодействия кориума с натрием. Были использованы следующие предположения: 1) во время первой фазы происходит прямой контакт между частицами кориума и натрием; 2) на первой фазе теплоотдача от кориума в натрий реализуется за счёт режима переходного кипения натрия; 3) в момент времени, когда давление в зоне взаимодействия снизилось меньше 5 бар – происходит переход от режима прямого контакта между частицами кориума и натрием к режиму переходного кипения.

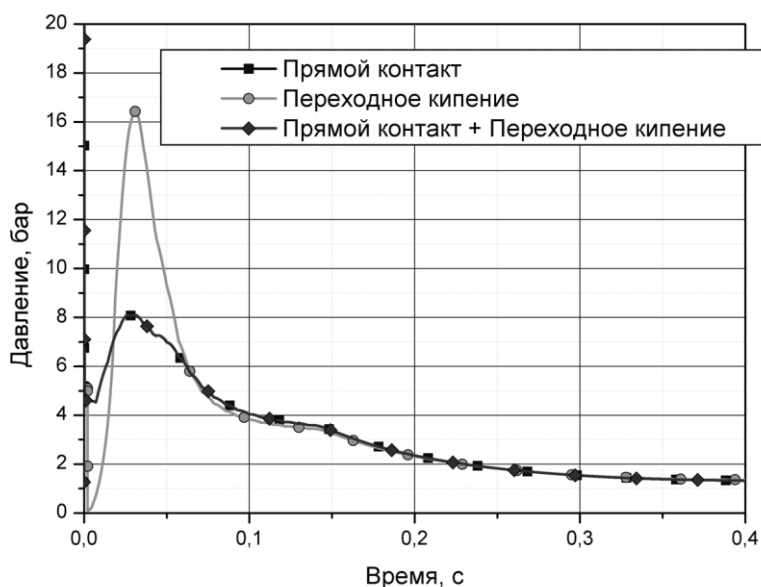


Рисунок 14 – Давление в зоне взаимодействия для различного способа моделирования первой фазы

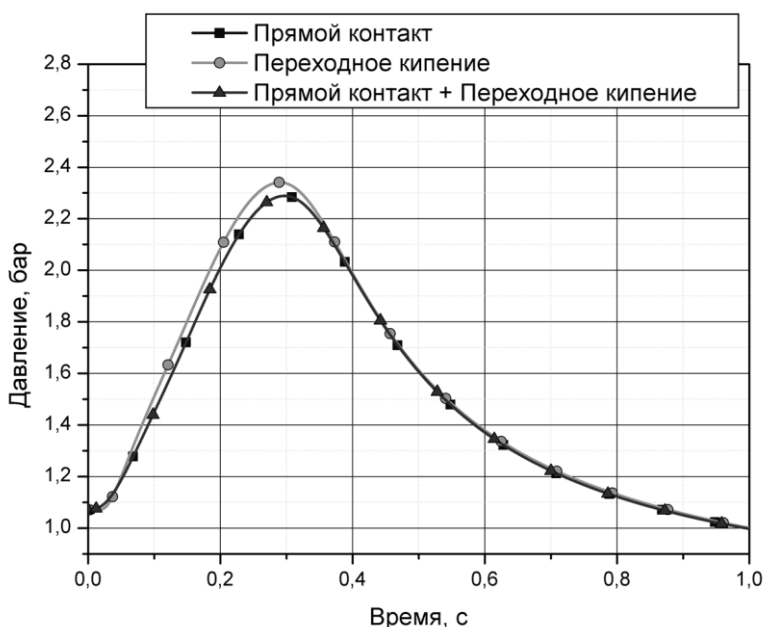


Рисунок 15 – Давление в газовой полости для различного способа моделирования первой фазы

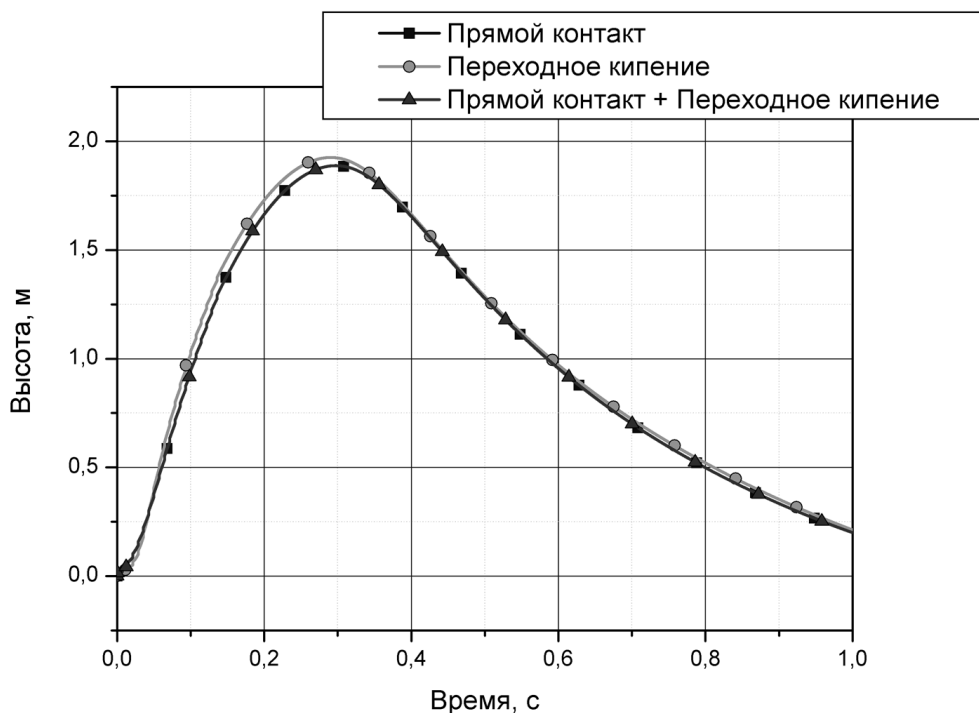


Рисунок 16 – Высота зоны взаимодействия для различного способа моделирования первой фазы

Из рис. 14-16 видно, что наличие режима переходного кипения на первой фазе влияет на последующую динамику процесса расширения зоны взаимодействия. Видно, что при прочих равных параметрах взаимодействия, столб натрия поднимается на большую высоту в том случае, если на первой фазе реализуется только режим переходного кипения. Это объясняется тем, что режим переходного кипения на первой фазе не даёт существенно охладиться уже поступившим порциям кориума, тем самым аккумулируя энергию для второй фазы.

4.1.4 Результаты валидации расчётного кода CSI на экспериментальных данных THINA

Для валидации разработанного кода CSI была выполнено сравнение расчётных и экспериментальных данных, полученных на установке THINA. Описание экспериментальной установки и параметры экспериментов приведены в разделах (4.1 – 4.2). Ниже приводится сравнение расчётных и экспериментальных данных для серий экспериментов TH564 и TH567, поскольку, как утверждают авторы экспериментов [33], в опытах TH561, TH562 использовались средства измерения, которые не позволили точно описать динамику процессов термического взаимодействия.

Наилучшие результаты расчёта были получены при следующих параметрах моделей кода CSI:

- количество порций расплава – 20;
- отношение массы натрия к массе кориума в зоне взаимодействия $scr = 1$;
- режим теплообмена на первой фазе – прямой контакт с последующим переходом к режиму переходного кипения.

На рис. 17, 20 приведены временные зависимости давления натрия в зоне взаимодействия, рассчитанные по коду CSI в сравнении с экспериментальными данными. Код CSI позволяет оценить пик давления в зоне взаимодействия в момент поступления кориума в зону взаимодействия. Наблюдается различия в моментах времени роста давления, что связано с выбранным подходом для моделирования процессов конденсации пара натрия в зоне взаимодействия, а также интегральным подходом к моделированию процесса термического взаимодействия в зоне взаимодействия. Результаты расчётов по высоте фронта зоны взаимодействия (рис. 19, 22), а также по давлению в газовой полости (рис. 18, 21), как качественно, так и количественно согласуются с экспериментальными данными.

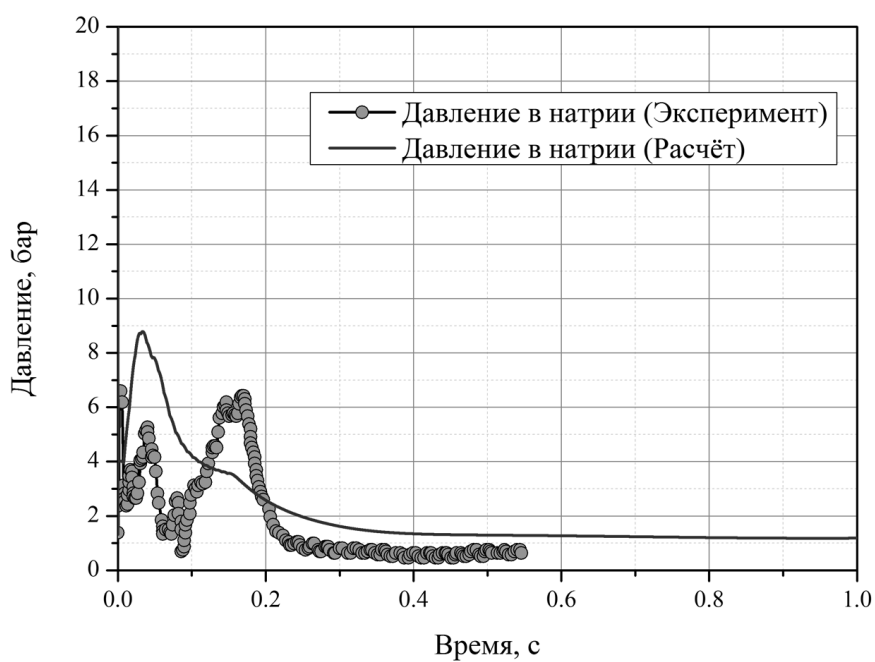


Рисунок 17 – Расчётная и экспериментальная временная зависимость давления натрия в зоне взаимодействия для эксперимента TH564

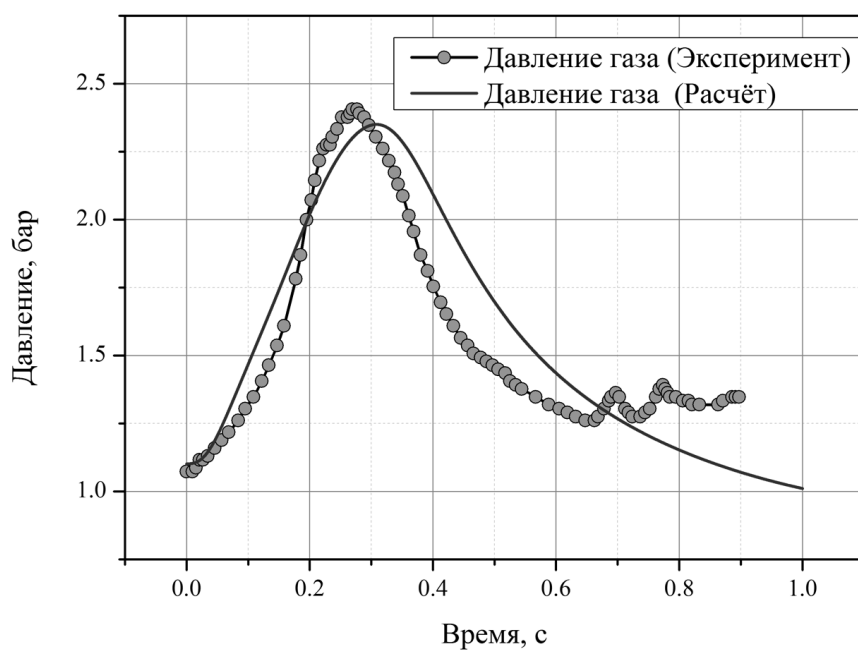


Рисунок 18 – Расчётная и экспериментальная временная зависимость давления в газовой полости для эксперимента TH564

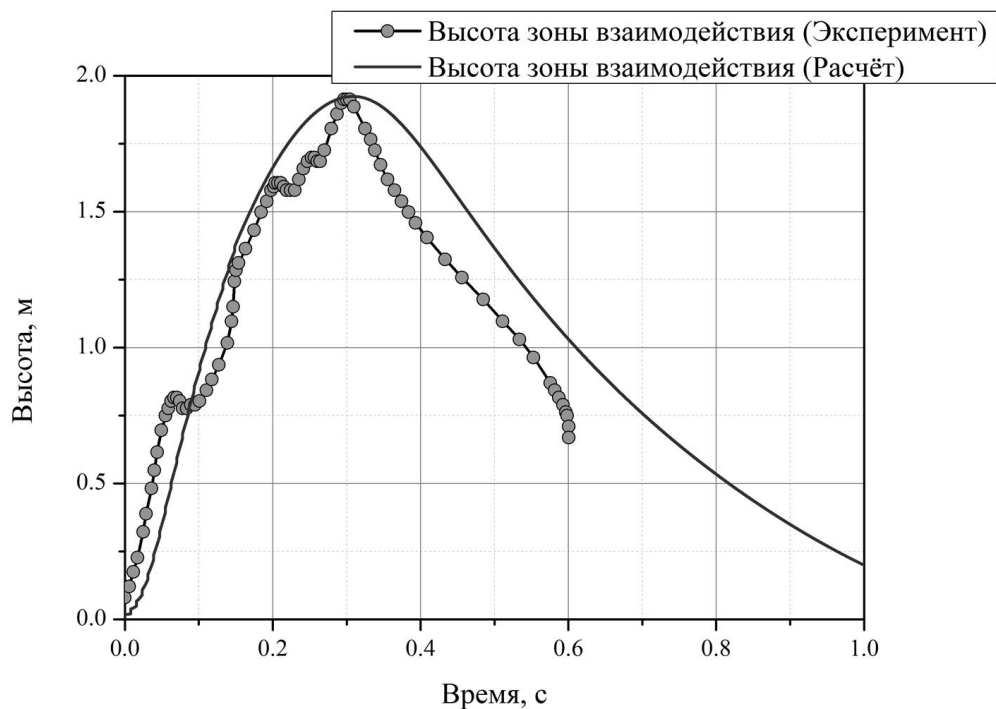


Рисунок 19 – Расчётная и экспериментальная временная зависимость высоты фронта зоны взаимодействия для эксперимента TH564

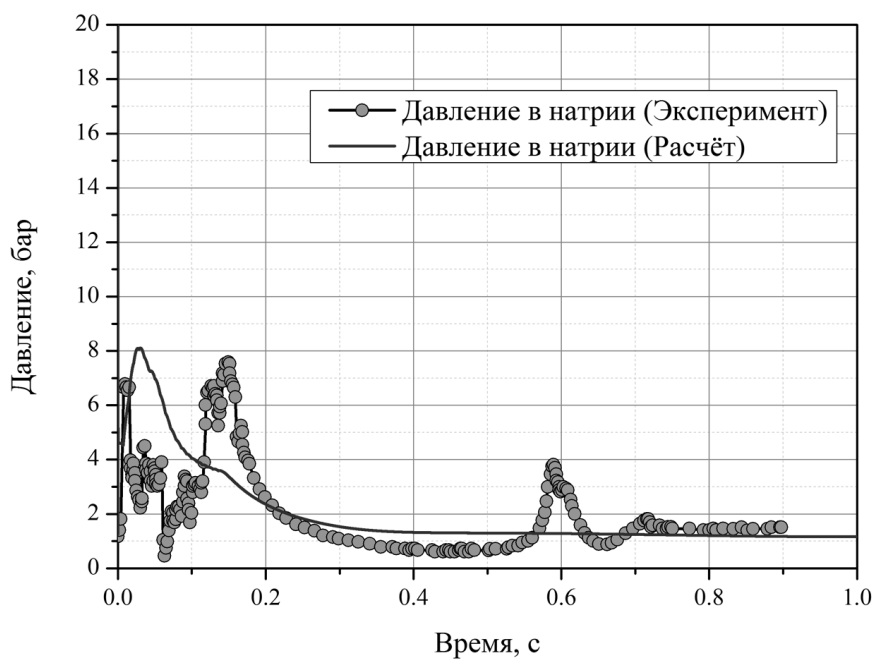


Рисунок 20 – Расчётная и экспериментальная временная зависимость давления натрия в зоне взаимодействия для эксперимента TH567

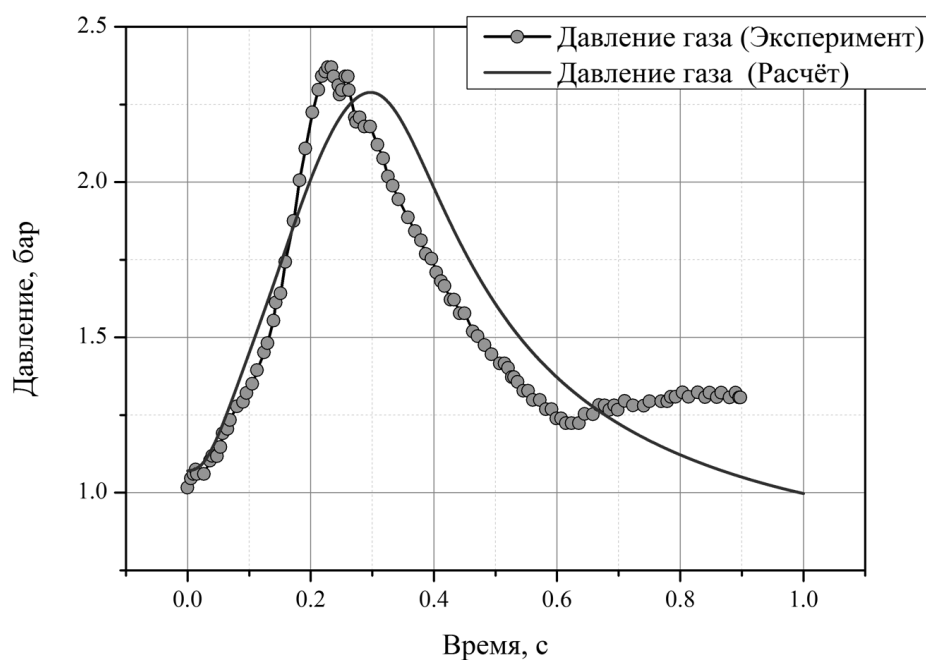


Рисунок 21 – Расчётная и экспериментальная временная зависимость давления в газовой полости для эксперимента TH567

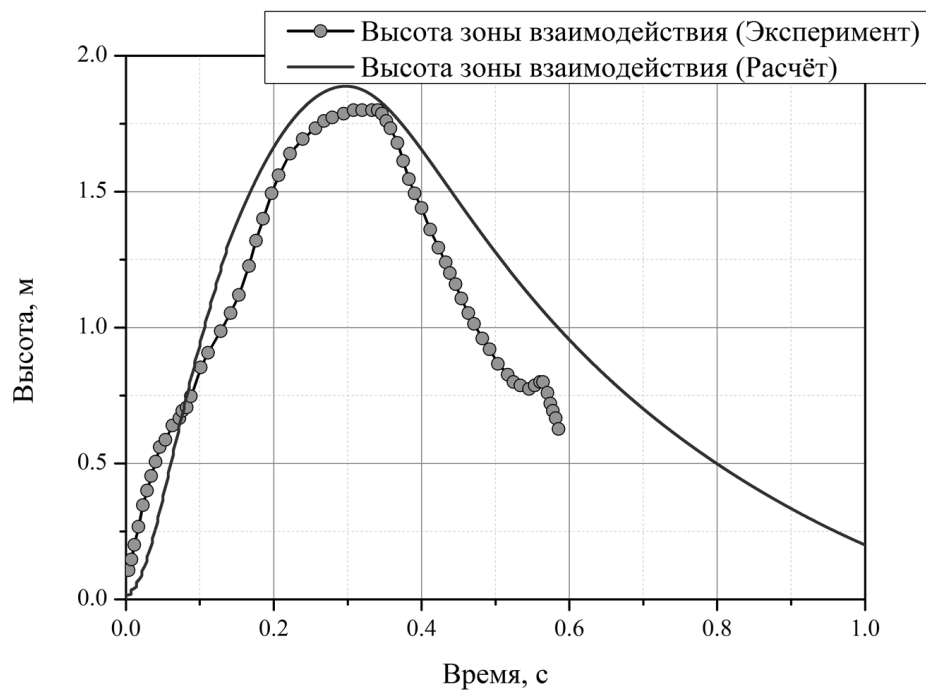


Рисунок 22 – Расчётная и экспериментальная временная зависимость высоты фронта зоны взаимодействия для эксперимента TH567

4.2 Валидация на опытных данных, полученных на установке ПЛУТОН

4.2.1 Описание экспериментальной установки ПЛУТОН и выполненных на ней экспериментов

Исследования термического взаимодействия в системе кориум - натрий были выполнены на экспериментальной установке ПЛУТОН в ГНЦ РФ ФЭИ (г. Обнинск) (рис. 23). Стенд предназначен для экспериментального определения коэффициентов конверсии термического взаимодействия и перемещения материалов при термическом взаимодействии имитаторов кориума с натрием. В качестве имитаторов кориума использовались расплавы продуктов горения термитных смесей ($ZrO_2 + Fe$) стехиометрического состава с начальной температурой около 3100 К.

В экспериментах варьировались температура натрия и отношение массы кориума к массе теплоносителя.

Кинематические характеристики перемещения столба натрия в осевом направлении камеры взаимодействия и вызываемые этим перемещением динамические нагрузки (на фиксированном расстоянии от зеркала теплоносителя) определялись на основе измерений остаточных деформаций изгиба калиброванных пластинчатых элементов.

Параметры экспериментов на установке ПЛУТОН представлены в табл. 3.

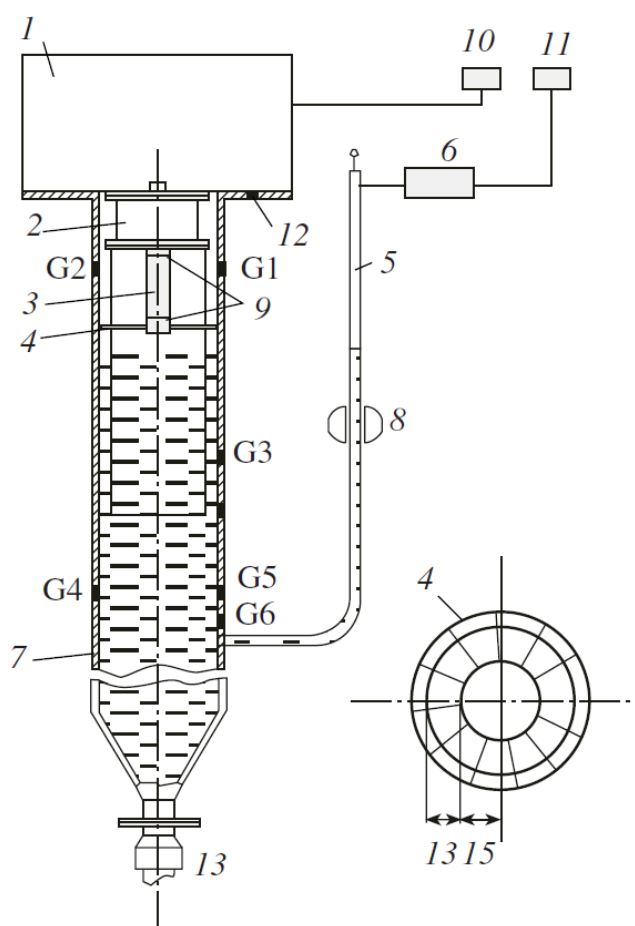


Рисунок 23 - Экспериментальная установка ПЛУТОН

1 — форкамера; 2 — термитная камера; 3 — патрубок слива кориума термитной смеси; 4 — сборка пластинчатых элементов (медь, толщина 0,5 мм); 5 — измерительный байпас; 6 — газовая камера измерительного байпаса; 7 — камера взаимодействия; 8 — магнитный расходомер; 9 — проволочные датчики; 10 — датчик «Сапфир-2440»; 11 — датчик «Сапфир-2434»; 12 — вибродатчик (акселерометр); 13 — фильтр; G1...G6 — датчики ДПС-007

Таблица 3 – Параметры экспериментов на установке ПЛУТОН

Параметр	Эксперимент	
	Н2	Н4
Исходная температура натрия, К	500	918
Масса термитного заряда, кг	0,07	0,07
Тепловая энергия термитного заряда, кДж	154	154
Исходный объем газовой полости измерительного байпаса, см ³	2252	2252
Начальное давление аргона, МПа	0,101	0,116

4.2.2 Результаты валидации расчётного кода CSI на экспериментальных данных ПЛУТОН

Для расчётов кодом CSI использовались параметры натрия и расплава, приведённые в табл. 3, медианный диаметр частиц расплава определялся по данным, приведённым в [34].

Для расчётов данного эксперимента кодом CSI использовались те же параметры моделей кода, что и для экспериментов THINA:

- количество порций расплава – 20;
- отношение массы натрия к массе кориума в зоне взаимодействия $scr = 1$;
- режим теплообмена на первой фазе – прямой контакт с последующим переходом к режиму переходного кипения.

Было выполнено сравнение коэффициентов конверсии, полученных в экспериментах и в расчётах. Вычисление коэффициента конверсии проводилось по формуле (59).

$$\eta = \frac{W_{п.м.} + W_{с.г.}}{Q_T} \quad (59)$$

здесь $W_{п.м.}$ – кинетическая энергия перемещения материалов; $W_{с.г.}$ – работа сжатия газа в газовой полости установки; Q_T – тепловая энергия расплава.

Результаты сравнения и результатов расчёта и экспериментальных значений коэффициентов конверсии приведено в табл. 4.

Таблица 4 – Сравнение коэффициентов конверсии

Эксперимент	Экспериментальное значение	Расчётное значение
Н2	0,125	0,15
Н4	0,41	0,43

Расчёт по коду CSI даёт близкие к экспериментальным, но слегка завышенные значения коэффициентов конверсии, что свидетельствует о консервативности используемого подхода к моделированию процесса термического взаимодействия кориума с натрием.

5 Заключение

Выполнен анализ процессов теплообмена при кипении натрия в большом объёме. Приведена карта режимов кипения натриевого теплоносителя в большом объёме при его контакте с высокотемпературным кориумом. На основе приведённой карты сделан вывод, что при первоначальном контакте кориума с натрием, для типичных условий тяжёлой аварии в реакторах с натриевым теплоносителем, устойчивое плёночное кипение на каплях кориума не реализуется. Поэтому при термическом взаимодействии кориума

с натрием не происходит формирование протяжённой области перемешивания (как в случае взаимодействия кориума с водой), а зона их взаимодействия определяется масштабом первоначального контакта. Передача тепла от кориума в натрий вызывает быстрое расширение кипящего натрия в зоне взаимодействия. Расширяющаяся зона взаимодействия приводит в движение прилегающий к ней «холодный» натрий, что приводит к динамическим нагрузкам на окружающие конструкции.

Разработана интегральная модель термического взаимодействия кориума с натриевым теплоносителем. В модели реализована постепенная подача кориума в натрий. При этом процесс термического взаимодействия происходит через две последовательные фазы. На первой фазе сначала происходит прямой контакт натрия с частицами кориума, затем реализуется режим переходного кипения. Как только натрий достигает температуры насыщения - наступает вторая фаза процесса, характеризующаяся возникновением плёночного кипения натрия на частицах кориума и резким расширением зоны взаимодействия, приводящим к возникновению динамических нагрузок на окружающие конструкции.

Выполнены валидационные расчёты как на зарубежных опытных данных - установка THINA (Германия), так и на стенде ПЛУТОН (Россия). Результаты валидационных расчётов показали хорошее согласие расчётных и экспериментальных данных по давлению натрия в зоне взаимодействия, а также в газовой полости экспериментального сосуда и координате фронта паровой области. Для опытных данных стенда ПЛУТОН доступны только значения полученных коэффициентов конверсии. По этим данным также наблюдается согласие расчётных и экспериментальных данных.

Работа выполнена по государственному заданию №13.1544.2014/К Министерства образования и науки РФ, а также при поддержке РФФИ (проект № 14-08-00393 А).

Список литературы

1. Кузнецов И.А., Поплавский В.М. Безопасность АЭС с реакторами на быстрых нейтронах. / Под общей редакцией члена-корреспондента АН РФ В.И. Рачкова. - М. ИздАт, 2012. - 632 с.
2. Hicks E.P., Menzies D.C. Theoretical Studies on Fast Reactor Maximum Accident. Argonne National Laboratory Rept. ANL-7120, 1965, p.654-670.
3. Reactor Safety Study: An Assessment of Accident Risks in U.S. Commercial Nuclear Power Plants. NUREG-75/014. WASH-1400.
4. Cho D.H., Wright R.W. A Rate-Limited Model of Molten Fuel-Coolant Interactions // Trans. Amer. Nucl. Soc. Vol.13. 1970. p.659-662.
5. Wright R.W., Cho D.H. Acoustic and Inertial Constraints in Molten Fuel-Coolant Interactions. // Trans. Amer. Nucl. Soc. Vol.13. 1970. p.658-659.
6. Safety Evaluation Report Related to Operation of Fast Flux Test Facility. Supplement No. 1. NUREG-0358. 1979, 160 p.
7. Caldarola L. A Theoretical Model for the Molten Fuel-Sodium Interaction in a Nuclear Fast Reactor // Nuclear Engineering and Design, Vol. 22, 1972, p.175-211.
8. Caldarola L. A Theoretical Model with Variable Masses for the Molten Fuel-Sodium Thermal Interaction in a Nuclear Fast Reactor. // Nuclear Engineering and Design, Vol.34, 1975, p.181-201.
9. Zyszkowski W. Thermal Explosion Hazards in (Fast) Nuclear Reactors. // Atomic Energy Review, Vol.16, №1, 1978 p.3-87.
10. Cho D.H., Ivins R.O., Wright R.W. Pressure Generation by Molten Fuel Coolant Interactions under LMFBR Accident Conditions. Rep. CONF-710302 7, 1971, p.25.
11. Jakeman D. A Review of the Meetings of the Working Group on the Comparison of Computational Models // PNC N251, 76-12 2, 1976, p.734-750.
12. Lenz W.F. Jr. Mixing Requirements for the Limiting Fuel-Coolant Interactions in Liquid Metal Fast Breeder Reactors. Rep. C00-2781-8TR, 1976, p.1-167.
13. Potter R, Jakeman D., A Review of the CREST Comparison of Sodium Fuel Interaction Computations Covering Seven Methods. Rep. EUR 5309e, 1973, p.477-488.
14. Букша Ю.К., Багдасаров Ю.Е., Кузнецов И.А. Исследование взаимодействия расплавленного топлива с натрием в активной зоне быстрого реактора // Атомная энергия. Т.41, Вып.1, 1976, с.9-14.
15. Morita K., Kondo Sa., Tobita Y., Brear D.J. SIMMER III Applications to Fuel-Coolant Interactions // Nuclear Engineering and Design, Vol 189, 1999, p.337-357.
16. Волков А.В. Обоснование безопасности быстрого реактора с натриевым теплоносителем при аварийных процессах, связанных с повреждением или разрушением активной зоны. // Диссертация

- на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.– Обнинск.: ГНЦ РФ ФЭИ. 2009. 187 С.
17. Ursic M. First Analysis of FCI Issue in Sodium Cooled Fast Reactors. SERENA Project Seminar 2012, Cadarache, France.
 18. Schins P., Magallon D., Giuliani S., Gunnerson F.S. Pouring of Molten UO₂, UC and Al₂O₃ in Sodium: Interactions and Debris; Theoretical Analysis. European Applied Research Reports. Nuclear Science and Technology Section. Vol.7, №4, 1986.
 19. Farahat M.M.K., Eggen Donald T. Pool Boiling in Subcooled Sodium at Atmospheric Pressure // Nuclear Science and Engineering, Vol. 53, 1974, p.240-253.
 20. Кириллов П.Л., Богословская Г.П. Теплообмен в ядерных энергетических установках. Учебное пособие для вузов; 2-е изд., перераб. – М.: ИздАт, 2008. – 256 с.
 21. Ртищев Н.А. Определение динамических нагрузок при термическом взаимодействии кориума с теплоносителем в ходе тяжёлых аварий на АЭС. // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук.– Москва: НИУ «МЭИ». 2013. 227 С.
 22. Метастабильная жидкость. Скрипов В.П., монография, Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1972.
 23. Справочник по теплогидравлическим расчётам по ядерной энергетике. Том 1. Теплогидравлические процессы в ЯЭУ / Под общей редакцией доктора технических наук, профессора П.Л. Кириллова / Кириллов П.Л., Бобков В.П., Жуков А.А., Юрьев Ю.С. – М.: ИздАт, 2010. – 776 с.
 24. Bober M., Singer J. Experimental Determination of the Spontaneous Nucleation Temperature of Sodium // International Journal of Thermophysics, Vol. 16, №1, 1995, p.289-297.
 25. Петухов Б.С., Генин Л.Г., Ковалев С.А., Соловьев С.Л. Теплообмен в ядерных энергетических установках: учебное пособие для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство МЭИ, 2003. – 548 с.
 26. Theofanous T.G. (1993) The Study of Steam Explosions in Nuclear Systems. - Int. Seminar on Physics of Vapor Explosion, 25-29 Oct. 1993, Tomakomai, p.5-26.
 27. Степанов Е.В. Физические аспекты явления парового взрыва // Препринт ИАЭ-5450, Москва, 1991, 96 с.
 28. Fink J.K., Leibowitz L. Thermodynamic and Transport Properties of Sodium Liquid and Vapor. ANL/RE-95/2. 1995, 217 P.
 29. Caldarola L. A Theoretical Model for the Molten Fuel-Sodium Interaction in a Nuclear Fast Reactor // Nuclear Engineering and Design, Vol. 22, 1972, p.175-211.
 30. Caldarola L. A Theoretical Model with Variable Masses for the Molten Fuel-Sodium Thermal Interaction in a Nuclear Fast Reactor. // Nuclear Engineering and Design, Vol.34, 1975, p.181-201.
 31. Witte L.G., Cox J.E. Thermal explosion hazard // Advances in Nuclear Science and Technology, Vol. 7, 1973, p.329-364.
 32. Букша Ю.К., Багдасаров Ю.Е., Кузнецов И.А. Исследование взаимодействия расплавленного топлива с натрием в активной зоне быстрого реактора // Атомная энергия. Т.41, Вып.1, 1976, с.9-14.
 33. Kaiser A., Huber F., Wilhelm D. Experiments on the Behaviour of a Hot Melt Injected into Sodium. Experimental Thermal and Fluid Science // Vol.18, 1998, p.48-69.
 34. Загорюлько Ю.И., Жмурин В.Г., Волов А.Н., Ковалев Ю.П. Экспериментальные исследования термического взаимодействия кориума с теплоносителями. // Теплоэнергетика, №3, 2008. С.48-56.
 35. Техническая термодинамика: учебник для вузов / В.А. Кириллин, В.В. Сычев, А.Е. Шейндлин. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 496 с.: ил.
 36. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. 3-е издание. – М.: НАУКА, Главная редакция физико-математической литературы. 1966. – 724 с.
 37. Nabavian K., Bromley L.A. Condensation coefficient of water // Chemical Engineering Science, Vol. 2 1971, p. 200-211.
 38. TRACE V5.0. Theory Manual. Field Equations, Solutions Methods and Physical Models. U.S. Nuclear Regulation Commission, 2007, Washington, 696 P.
 39. Теплообмен в ядерных энергетических установках: Учебное пособие для вузов. - 3-е изд., перераб. и доп. /Б.С. Петухов, Л.Г. Генин, С.А. Ковалев, С.Л. Соловьев. - М.: Издательство МЭИ, 2003. - 548 с., ил.