

УДК 536.24

## РАЗРАБОТКА И ВАЛИДАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ТЕРМИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАСПЛАВА С НАТРИЕВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

**Мелихов В.И., Мелихов О.И., Парфенов Ю.В., Ртищев Н.А., Тарасов А.Е.**

*Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт»,  
Москва, e-mail: vladimir.melikhov@erec.ru*

Статья посвящена разработке модели для оценки параметров термического взаимодействия расплава с жидким натрием и её валидации на экспериментальных данных FARO [8] и THINA [10]. В ходе тяжёлой аварии в жидкометаллических реакторах возможен прямой контакт расплавленного топлива с жидким натрием, приводящий к их термическому взаимодействию. При определённых условиях это взаимодействие может происходить взрывным образом и представлять опасность для целостности корпуса реактора. В статье изложено краткое описание модели термического взаимодействия расплава с натрием, основанной на законах сохранения массы, импульса и энергии. Данная модель была валидирована для двух типов взаимодействия: при подаче расплава в нижнюю часть экспериментального сосуда (THINA) и в верхнюю (FARO). Было получено приемлемое соответствие расчётных и экспериментальных результатов для давления в зоне взаимодействия и коэффициентов конверсии.

**Ключевые слова:** термическое взаимодействие, расплав, натриевый теплоноситель, математическая модель, валидация

## DEVELOPMENT AND VALIDATION OF MODEL FOR ASSESSMENT OF CORIUM – SODIUM COOLANT THERMAL INTERACTION PARAMETERS

**Melikhov V.I., Melikhov O.I., Parfenov Y.V., Rtishchev N.A., Tarasov A.E.**

*National Research University «Moscow Power Engineering Institute»,  
Moscow, e-mail: vladimir.melikhov@erec.ru*

The paper is devoted to development of the model for assessment of melt-liquid sodium thermal interaction parameters and to its validation on experimental data FARO [8] and THINA [10]. During the liquid metal fast breeder reactor severe accident, direct contact of liquid sodium with melt is possible. As a result – their thermal interaction occurs. Under certain conditions, this interaction has explosive character, and may be dangerous for reactor integrity. Brief description of melt-sodium coolant thermal interaction model, based on mass, momentum and energy conservation laws, is presented in the paper. This model has been validated for two types of interaction: melt injection from below into sodium pool (THINA), and from above (FARO). It has been acceptable agreement of calculations results with experimental ones: interaction zone pressure, and energy conversion ratios.

**Keywords:** thermal interaction, melt, sodium coolant, mathematical model, validation

Термическое взаимодействие высоко-температурного расплавленного топлива с охладителем может иметь место в реакторах с натриевым теплоносителем при реактивных авариях с быстрым ростом мощности и при авариях с нарушением охлаждения активной зоны (аварии типа ULOF). Происходящее при этом взаимодействии высвобождение большого количества механической энергии представляет собой угрозу для безопасности АЭС и в связи с этим данное явление является предметом многочисленных исследований [5, 6, 12]. В настоящей работе предложена математическая модель, позволяющая оценивать параметры термического взаимодействия расплава с жидким натрием. Эта модель была валидирована на опытных данных, полученных на установке THINA (Германия), где расплав подавался в нижнюю часть экспериментального сосуда с натрием, и на установке FARO (Италия), где расплав подавался сверху (рис. 1). Было получено хорошее совпадение расчётных и экспериментальных данных как по давлению в зоне

взаимодействия, так и по коэффициентам конверсии.

**Цель работы:** разработка и валидация модели термического взаимодействия расплава с натриевым теплоносителем.

### Материал и методы исследования

Основные предположения при разработке математической модели заключаются в следующем. Процесс взаимодействия расплава с натрием разделяется на две временные фазы. На первой фазе расплав материалов активной зоны мгновенно превращается в мелкие частицы и вступает в непосредственный контакт с жидким натрием. Процесс теплопередачи характеризуется:

- 1) интенсивным тепловым взаимодействием между расплавом и охладителем за счёт прямого контакта между ними;
- 2) большой площадью поверхности взаимодействия, обусловленной малым размером частиц.

По мере охлаждения частиц расплава скорость теплопередачи в жидкий натрий снижается. Расчёт температуры частиц основан на решении нестационарного уравнения теплопроводности, записанного для сферически симметричного случая, с граничным условием третьего рода.

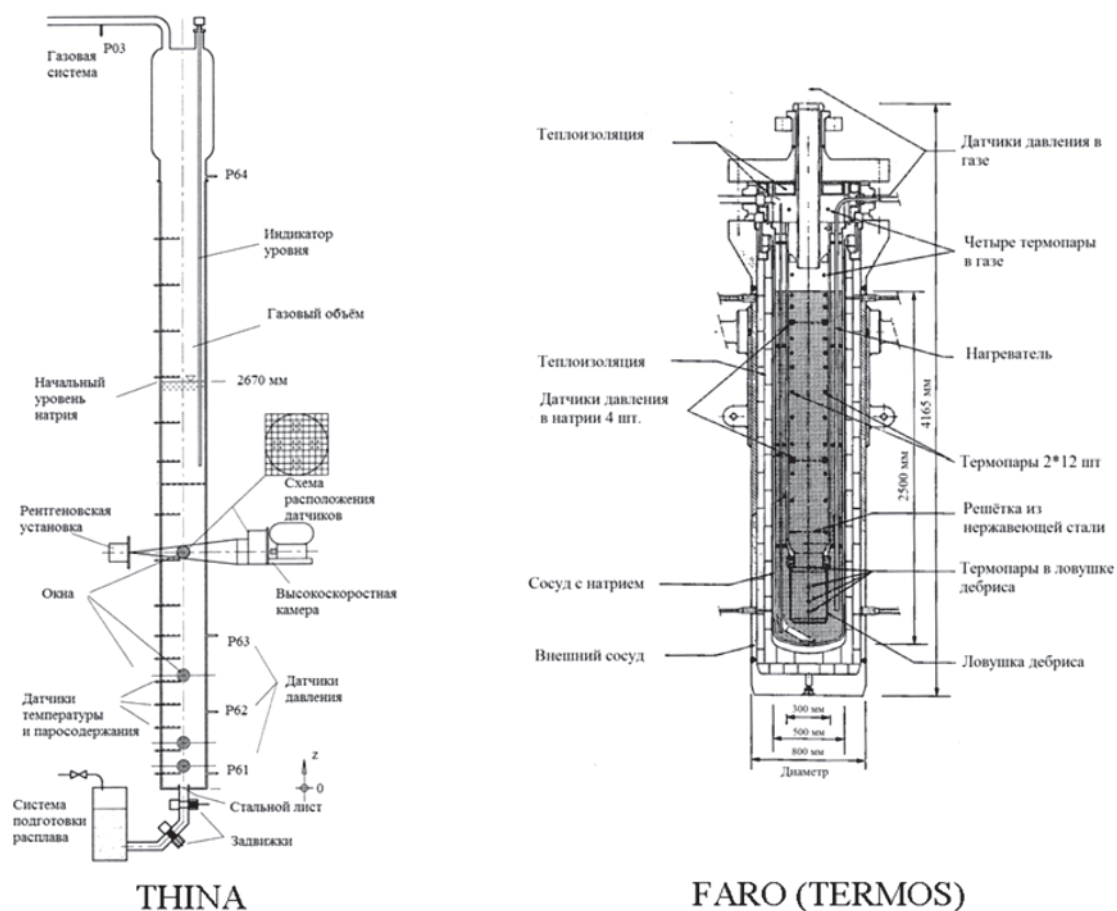


Рис. 1. Экспериментальные установки THINA и FARO

Нагреваемый объём натрия в зоне взаимодействия ограничен окружающим холодным теплоносителем и другими материалами, присутствующими в активной зоне. Для описания быстрого расширения нагреваемого объёма натрия в предлагаемой математической модели на начальном этапе используется уравнение движения, записанное в акустическом приближении, а затем движение столба натрия определяется силами, действующими на него.

Вторая фаза процесса термического взаимодействия начинается с момента закипания натрия. С этого момента теплопередача характеризуется:

- 1) ухудшением теплопередачи между расплавом и охладителем из-за образования плёнки пара натрия на внешней поверхности фрагментов расплава;
- 2) большой площадью поверхности взаимодействия.

Для описания процессов, имеющих место на первой и второй фазах процесса, формулируются уравнения сохранения массы и энергии для зоны термического взаимодействия и уравнение импульса для движущегося столба холодного натрия.

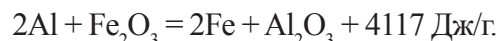
Описанная модель основана на [1, 4, 11]. Дополнительно к этим исследованиям в настоящей работе для расчёта теплообмена частиц расплава при плёночном кипении были использованы зависимости [2, 4, 7, 9]. Стоит отметить, что в моделируемых экспериментах газовая полость над уровнем натрия была заполнена аргоном. Для учёта процессов в газовой полости математическая модель была дополнена

уравнениями сохранения массы и энергии для аргона и уравнением теплообмена газа со стенками сосуда. Подробное описание математической модели изложено в [3].

### Результаты исследования и их обсуждение

#### Расчёт эксперимента THINA

Установка THINA (см. рис. 1) состоит из двух основных частей: экспериментального сосуда и системы для приготовления и инъекции расплава. Около половины экспериментального сосуда заполнено жидким натрием, над поверхностью которого находится газ (аргон) для компенсации объёмных расширений. Малый диаметр сосуда (0,3 м) был выбран для возможности использования рентгеновского излучения с целью диагностики исследуемых процессов. Около 5 кг расплава подготавливалось в тигле с помощью экзотермической реакции алюминий/оксид железа согласно уравнению:



Продукты реакции разделяются в ходе и после реакции за счёт разности их плот-

ностей. Этот эффект был учтён в конструкции тиглей, один из которых позволяет подавать расплав, состоящий главным образом из алюминия, а второй – в большей части из железа.

Предложенная модель была валидирована на всех четырёх экспериментах [10]. В данной работе приводятся результаты расчётов эксперимента TH561, основные параметры которого приведены в таблице:

Основные параметры экспериментов

	TH 561 (THINA)	T2 (FARO)
Температура расплава, К	2780	3273
Время подачи расплава, с	0,190	-
Состав расплава	4 кг Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 1,5 кг стали	112 кг UO <sub>2</sub> + 28кг ZrO <sub>2</sub>
Масса натрия, кг	155	130
Температура натрия, К	790	673
Высота столба натрия, м	2,67	2,5
Начальное давление аргона, бар	1,1	1,3

С помощью разработанной математической модели были получены следующие результаты. Рассчитанный пик давления в зоне взаимодействия составил 7,4 бар, что хорошо согласуется с экспериментально полученным значением в 8,0 бар. Временные зависимости основных параметров, полученных в эксперименте и в расчёте, приведены на рис. 2. Коэффициент конверсии, полученный в эксперименте для данного теста, составил 0,13%, что несколько выше полученного значения с помощью разрабо-

танной математической модели – 0,07%. На рис. 2, 3 наблюдается качественное соответствие расчётных и экспериментальных данных. Различия вызваны принятой схематизацией исследуемого процесса (интегральный подход для формулировки законов сохранения) и неполнотой информации о параметрах экспериментальной установки и теплофизических свойствах высокотемпературного расплава. Расчёты трёх других экспериментов на установке THINA [10] дали аналогичные результаты.

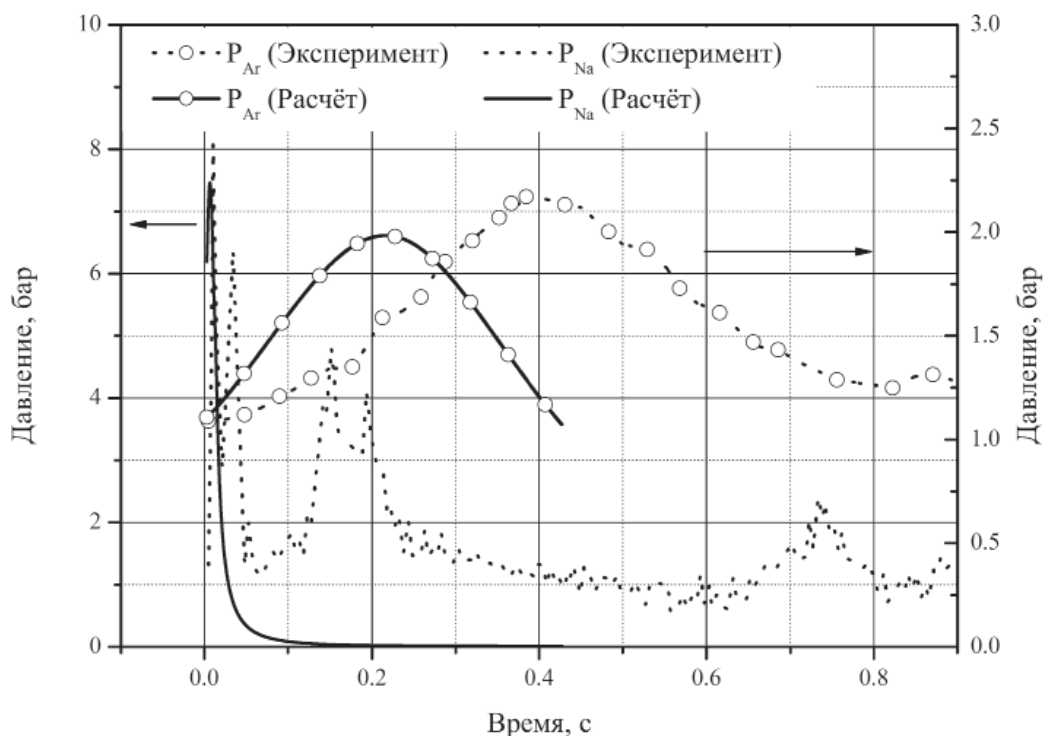


Рис. 2. Временные зависимости давления натрия в зоне взаимодействия, давления аргона

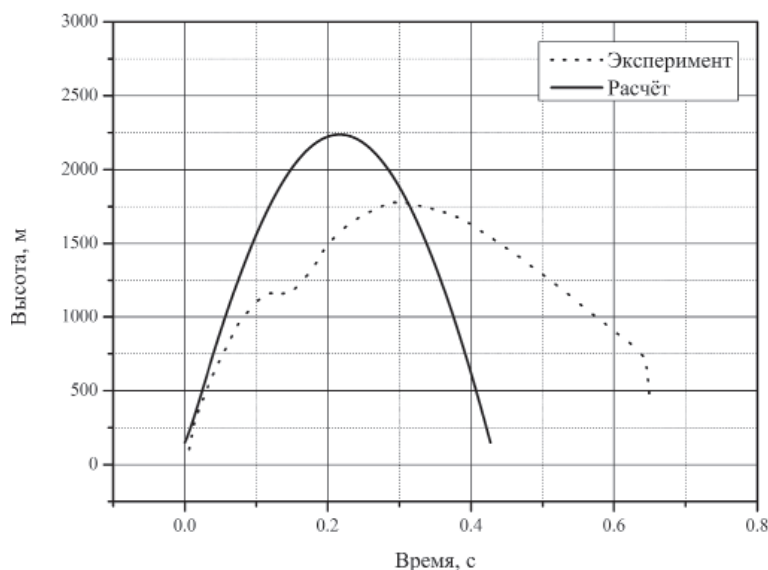


Рис. 3. Временная зависимость высоты зоны взаимодействия

### Расчёт эксперимента FARO

Установка FARO [10] состоит из экспериментального сосуда TERMOS и системы подачи кориума.

TERMOS представляет собой сосуд высокого давления, внешним диаметром 800 мм и высотой 4,0 м. Контейнер с натрием находится внутри сосуда TERMOS и имеет диаметр 470 мм. Экспериментальный сосуд подсоединен к устройству для подготовки расплава через канал и три межсекционных клапана. Объем инертного газа, находящегося над уровнем натрия, составлял 0,15 м<sup>3</sup>. Температура натрия равна 673,15 К, уровень жидкого натрия – 2,5 м. Начальные условия эксперимента приведены в таблице.

Основным параметром, используемым для валидации модели на этом эксперименте, является максимальный пик давления в зоне взаимодействия. Рассчитанное значение в зоне взаимодействия составило 82 бар, что хорошо согласуется с экспериментально полученным значением в 80 бар.

### Выводы

Предложена модель термического взаимодействия расплава с натрием, основанная на законах сохранения массы и энергии для зоны взаимодействия и импульса для столба холодного натрия. Данная модель была валидирована для двух типов взаимодействия: при подаче расплава в нижнюю

часть экспериментального сосуда (THINA) и в верхнюю (FARO). Сравнение проводилось по нескольким параметрам: максимальное давление в натрии и аргоне, высоты подъема столба натрия и коэффициентов конверсии. Было получено приемлемое соответствие расчетных и экспериментальных результатов.

*Работа была выполнена при финансировании ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. (госконтракт № 14.В37.21.0151), НИР НИУ «МЭИ» «Исследование теплофизических процессов в перспективном энергетическом оборудовании» рег. № 7.3163.2011, проекта РФФИ № 11-08-00410\_a.*

### Список литературы

1. Букша Ю.К., Багдасаров Ю.Е., Кузнецов И.А. Исследование взаимодействия расплавленного топлива с натрием в активной зоне быстрого реактора // Атомная энергия. – 1976. – Т.41, Вып. 1. – С. 9–14.
2. Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П. Справочник по теплогидравлическим расчетам. – М., Энергоатомиздат, 1990. – 360 с.
3. Тарасов А.Е., Ртищев Н.А. Оценка ударных воздействий на конструкции при паровом взрыве // Сборник трудов XIII научной школы молодых ученых ИБРАЭ РАН, проходившей 26-27 апреля 2012 г. – (Препринт / Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, апрель 2012, № ИВРАЭ-2012-02). – М.: ИБРАЭ РАН, 2012. – 146 с.
4. Caldalora L.A. Theoretical Model for the Molten Fuel-Sodium Interaction in a Nuclear Fast Reactor // Nuclear Engineering and Design. – 1972. – Vol. 22. – P. 175–211.
5. Cronenberg A.W., Benz R. Vapour explosion phenomena with respect to nuclear reactor safety assessment // Advance

in Nuclear Science and Technology, Editors // J. Lewins and M. Becker. – 1980. – Vol. 12. – P. 247–321.

6. Experimental Facilities for Sodium Fast Reactor Safety Studies. Task Group on Advanced Reactors Experimental Facilities (TAREF). NEA/CSNI/R(2010)12. OECD 2011.

7. Farahat M.M.K., Eggen Donald T. Pool Boiling in Subcooled Sodium at Atmospheric Pressure // Nuclear Science and Engineering. – 1974. – Vol. 53. – P. 240–253.

8. Kaiser A., Huber F., Wilhelm D. Experiments on the behaviour of a hot melt injected into sodium // Experimental Thermal and Fluid Science. – 1998. – Vol. 18. – P. 48–69.

9. Kolev N.I. Film boiling on vertical plates and spheres // Experimental Thermal and Fluid Science. – 1998. – Vol. 18. – P. 97–115.

10. Magallon D., Hohmann H., Schins H. Pouring of 100-kg-Scale Molten UO<sub>2</sub> into Sodium. Nuclear Technology. – 1992. – Vol. 98. – P. 79–90.

11. Witte L.G., Cox J.E. Thermal explosion hazard // Advances in Nuclear Science and Technology. – 1973. – Vol. 7. – P. 329–364.

12. Zyszkowski W. Thermal Explosion Hazards in (Fast) Nuclear Reactors // Atomic Energy Review. – 1978. – Vol. 16, № 1. – P. 3–86.

### References

1. Buksha Yu.K., Bagdasarov Yu.E., Kuznetsov I.A. Issledovanie vzaimodejstvija rasplavlennogo topliva s natriem v aktivnoj zone bystrogoreaktora–AtomayaEnegiya. 1976. T. 41, Vyp. 1, pp. 9–14.

2. Kirillov P.L., Jurev Yu.S., Bobkov V.P. Spravochnik po teplogidravlicheskim raschetam. M., Energoatomizdat, 1990. 360 p.

3. Tarasov A.E., Rtishchev N.A. Ocenka udarnyh vozdeystvij na konstrukcii pri parovom vzryve. Sborniktrudov XIII nauchnoj shkoly molodyhuch jonyh IBRAE RAN.– (Preprint / Institut problem bezopasnogorazvitiijaatomnojenergetiki RAN, april 2012, no. IBRAE-2012-02). M. IBRAE RAN, 2012. 146 p.

4. Caldalora L.A. Theoretical Model for the Molten Fuel-Sodium Interaction in a Nuclear Fast Reactor – Nuclear Engineering and Design, Vol. 22, 1972, pp. 175–211.

5. Cronenberg A.W., Benz R. Vapourexpllosion phenomena with respect to nuclear reactor safety assessment.– Advance in Nuclear Science and Technology, Editors: J. Lewins and M. Becker, Vol. 12, 1980, pp. 247–321.

6. Experimental Facilities for Sodium Fast Reactor Safety Studies. Task Group on Advanced Reactors Experimental Facilities (TAREF). NEA/CSNI/R(2010)12. OECD 2011.

7. Farahat M.M.K., Eggen Donald T. Pool Boiling in Subcooled Sodium at Atmospheric Pressure – Nuclear Science and Engineering, Vol. 53, 1974, pp. 240–253.

8. 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, pp. 48–69.

9. Kolev N.I. Film boiling on vertical plates and spheres // Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 18, 1998, pp. 97–115.

10. Magallon D., Hohmann H., Schins H. Pouring of 100-kg-Scale Molten UO<sub>2</sub> into Sodium. Nuclear Technology Vol.98, 1992, pp. 79–90.

11. Witte L.G., Cox J.E. Thermal explosion hazard–Advances in Nuclear Science and Technology, Vol. 7, 1973, pp. 329–364.

12. Zyszkowski W. Thermal Explosion Hazards in (Fast) Nuclear Reactors – Atomic Energy Review. Vol. 16, 1978, no. 1, pp. 3–86.

### Рецензенты:

Семенов В.Н., д.ф.-м.н., заведующий отделом моделирования АЭС с реакторными установками нового поколения, ФГБУН «Институт проблем безопасного развития атомной энергии» РАН, г. Москва;

Якуш С.Е., д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник лаборатории термогазодинамики и горения, ФГБУН «Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского» РАН, г. Москва.

Работа поступила в редакцию 12.03.2013.