

ПРОСТЫЕ ФОРМУЛЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАТРИЯ

А.А. Казанцев*, А.С. Кондратьев**

**ЭНИМЦ Моделирующие системы, г. Обнинск*

***ГНЦ РФ-Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск*



Как теплоноситель натрий широко используется в реакторах на быстрых нейтронах, но для его расчета с использованием кода OpenFOAM требуется более широкий набор формул по сравнению с опубликованными в справочной литературе [2]. Для кодов вычислительной гидродинамики (CFD-кодов), таких как OpenFOAM [1], с открытым исходным кодом и возможностью изменять исходный текст под любую прикладную задачу потребовалось найти или получить простые формулы для расчета теплофизических свойств натрия. Исходные данные для получения интерполяционных функций взяты из отечественных и зарубежных монографий [3–5]. Получен набор расчетных функций, описывающих необходимые для расчетных кодов термодинамические и теплофизические свойства натрия и его паров: динамическая вязкость, теплопроводность, поверхностное натяжение, температуропроводность, скрытая теплота парообразования, давление насыщения от температуры, плотность на линии насыщения, число Прандтля на линии насыщения.

В современных CFD-кодах с открытым исходным текстом, таких как OpenFOAM [1], опубликованных по лицензии GNU, имеются свойства воздуха, многих углеводородов, воды и других сред. Эти коды обслуживают интересы автомобильных и авиационных концернов, а также химической промышленности и других отраслей, но не содержат свойств жидких металлов. При этом имеется возможность «встать на плечи гигантов» и получить современный расчетный инструмент при минимальных затратах сил, т.к. юридическая и техническая оснащенность позволяет использовать его математические средства для нужд расчетов теплообменного оборудования ядерных реакторов на быстрых нейтронах. Изучение блока свойств показало, что необходимо иметь свойства не только для жидкой фазы, но и для паров металлов. Таких данных вследствие агрессивности паров металлов немного, и они существуют в более узком интервале, чем для воды: от тройной точки и до температур порядка 1500 К, что достаточно для практических нужд расчета оборудования реакторов на быстрых нейтронах.

В ядерной энергетике известны простые расчетные формулы [2] для натрия и других жидких металлов. Однако их перечень недостаточен для расчета с использованием кода OpenFOAM, в котором требуется более широкий набор свойств. Натрий по сравнению с водой имеет низкое давление паров. Фактически для рас-

© А.А. Казанцев, А.С. Кондратьев, 2008

чета необходимы свойства жидкого натрия и аргона как изолирующего его от кислородной атмосферы газа.

Общее обоснование теоретического вида формул для описания свойств жидких металлов приведено в монографии [3]. Исходные табличные данные для получения формул взяты из монографий [3–5]. Единицы физических величин приведены в системе СИ, в частности, все температуры выражены в градусах Кельвина.

Ниже приведены полученные авторами формулы, аппроксимирующие экспериментальные таблицы термодинамических свойств натрия, – динамической и кинематической вязкости, теплопроводности жидкого и газообразного натрия, удельной изобарной теплоемкости, температуропроводности, коэффициента поверхностного натяжения, скрытой теплоты парообразования, давления насыщения, плотности жидкости и пара на линии насыщения, числа Прандтля для жидкости на линии насыщения в зависимости от температуры насыщения. Для каждой из функций указаны литературный источник опытных данных и погрешности формул – среднее квадратичное отклонение и максимальное отклонение от приведенных табличных данных. Обозначения величин приняты в соответствии с международным стандартом, использованным в коде OpenFoam [1]. Диапазон применимости формул соответствует диапазону приведенных экспериментальных таблиц.

ДИНАМИЧЕСКАЯ ВЯЗКОСТЬ

Получена приближенная формула

$$\mu_L = \exp \left(\frac{6,62 \cdot 10^2}{T} - 3,55 \cdot 10^{-4} T - 8,93 \right). \quad (1)$$

Среднеквадратичное отклонение равно $2,05 \cdot 10^{-7}$. Максимальное отклонение равно $-1,59 \cdot 10^{-6}$. Табличные данные взяты из [3]. Сравнение экспериментальных данных из табл. 1 с полученной формулой (1) представлено на рис. 1.

Таблица 1

Динамическая вязкость Na в зависимости от температуры на линии насыщения

T, K	$\mu_L, \text{Па} \cdot \text{с} \times 10^{-4}$
373.15	6.866
477.15	4.506
589.15	3.328
700.15	2.654
811.15	2.253
922.15	1.964
1033.15	1.740
1144.15	1.579
1154.15	1.571
1255.15	1.451
1366.15	1.331
1477.15	1.232

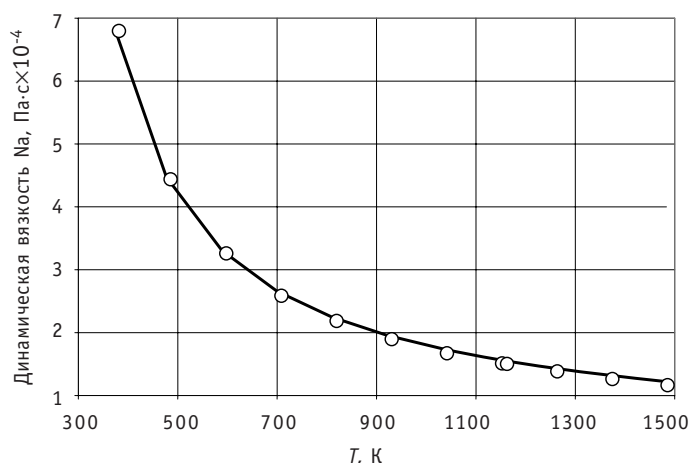


Рис. 1. Сравнение опытных данных по динамической вязкости с полученной приближенной формулой: ○ – опыт; — – формула

В книге [3] приведена формула Андраде для вязкости. Предлагаемая здесь формула обладает двумя преимуществами: описывает опытные данные в более широком интервале температур и исключает дополнительный расчет плотности жидкости, входящей как сомножитель в формулу Андраде.

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ЖИДКОГО НАТРИЯ

Получена приближенная формула

$$k_L = -56,759 \cdot \ln T - \frac{1,6072 \cdot 10^4}{T} + 465,05. \quad (2)$$

Среднеквадратичное отклонение равно $2,5473 \cdot 10^{-2}$.
Максимальное отклонение равно -0,1776. Табличные

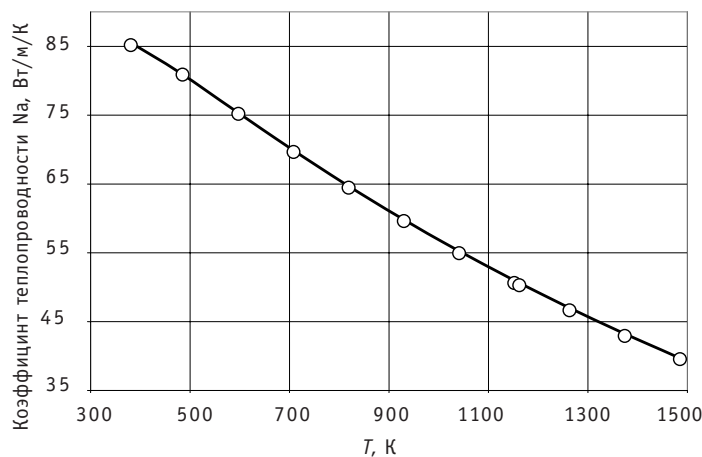


Рис. 2. Сравнение опытных данных по коэффициенту теплопроводности в жидкой фазе с полученной приближенной формулой: ○ — опыт; — — — формула

Таблица 2
Коэффициент теплопроводности Na в зависимости от температуры на линии насыщения

T, K	$k_L, \text{Вт/м/К}$
373.15	85.75
477.15	81.46
589.15	75.76
700.15	70.22
811.15	65.03
922.15	60.18
1033.15	55.52
1144.15	51.19
1154.15	50.85
1255.15	47.22
1366.15	43.49
1477.15	40.13

данные взяты из [3]. Сравнение экспериментальных данных из табл. 2 с полученной формулой (2) представлено на рис. 2.

Таблица 3
Коэффициент теплопроводности Na в газовой фазе в зависимости от температуры

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ГАЗООБРАЗНОГО НАТРИЯ

Получена приближенная формула

$$k_v = 0,22374 \cdot T + 65,548. \quad (3)$$

Среднеквадратичное отклонение равно $7,77 \cdot 10^{-2}$.
Максимальное отклонение равно -0,457. Табличные данные взяты из [2]. Графиком функции является простая линейная зависимость.

ТЕПЛОЕМКОСТЬ

Получена приближенная формула

$$a_L = 4,5811 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 - 0,82651 \cdot T + 1,627 \cdot 10^3. \quad (4)$$

Среднеквадратичное отклонение равно 0,1018.
Максимальное отклонение равно -0,530. Табличные данные взяты из [3]. Сравнение экспериментальных данных из табл. 4 с полученной формулой (4) представлено на рис. 3.

T, K	$k_v, \text{Вт/м/К}$
700	222
800	245
900	267
1000	289
1100	312
1200	334
1250	345
1300	356
1350	368
1400	379
1450	390
1500	401

Таблица 4

Удельная изобарная теплоемкость Na в зависимости от температуры

T, K	$C_{pl}, \text{ Дж/(кг·К)}$
373.15	1383
477.15	1337
589.15	1300
700.15	1273
811.15	1258
922.15	1255
1033.15	1262
1144.15	1282
1154.15	1284
1255.15	1312
1366.15	1353
1477.15	1406

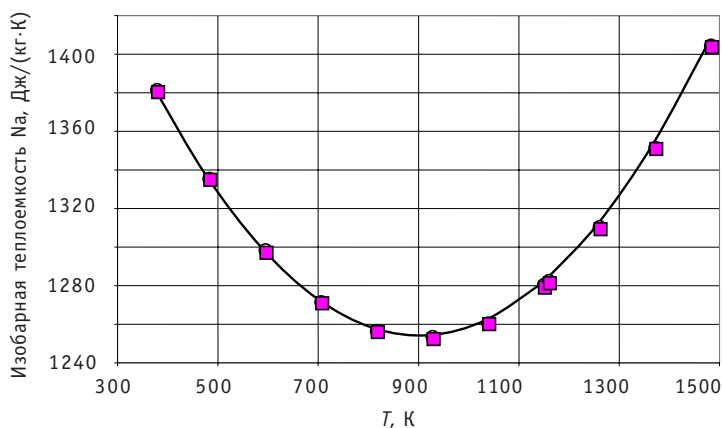


Рис. 3. Сравнение опытных данных по удельной изобарной теплоемкости натрия с полученной приближенной формулой:

○ — опыт; ■ — формула

ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ

Получена приближенная формула

$$\sigma = 0,23429 - 1,0037 \cdot 10^{-4} \cdot T. \quad (5)$$

Среднеквадратичное отклонение равно $9,319 \cdot 10^{-5}$. Максимальное отклонение равно $5,50 \cdot 10^{-4}$. Табличные данные взяты из [3]. Графиком функции является простая линейная зависимость.

ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТЬ

Получена приближенная формула

$$a_L = 1 / (7,751 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 - 6,985 \cdot T + 1,646 \cdot 10^4). \quad (6)$$

Среднеквадратичное отклонение равно $4,15 \cdot 10^{-8}$. Максимальное отклонение равно $-2,495 \cdot 10^{-7}$. Табличные данные взяты из [3]. Сравнение экспериментальных данных из табл. 6 с полученной формулой (6) представлено на рис. 4.

СКРЫТАЯ ТЕПЛОТА ПАРООБРАЗОВАНИЯ

Получена приближенная формула

$$\lambda = -\frac{127,29 \cdot 10^6}{T} - 1,0837 \cdot 10^3 \cdot T + 5,2394 \cdot 10^6. \quad (7)$$

Среднеквадратичное отклонение равно 756,39. Максимальное отклонение — $4,494 \cdot 10^{-3}$. Табличные данные взяты из [3]. Сравнение экспериментальных данных из табл. 7 с полученной формулой (7) представлено на рис. 5.

ДАВЛЕНИЕ НАСЫЩЕНИЯ Na

Получена приближенная формула

$$\lambda = -\frac{127,29 \cdot 10^6}{T} - 1,0837 \cdot 10^3 \cdot T + 5,2394 \cdot 10^6.$$

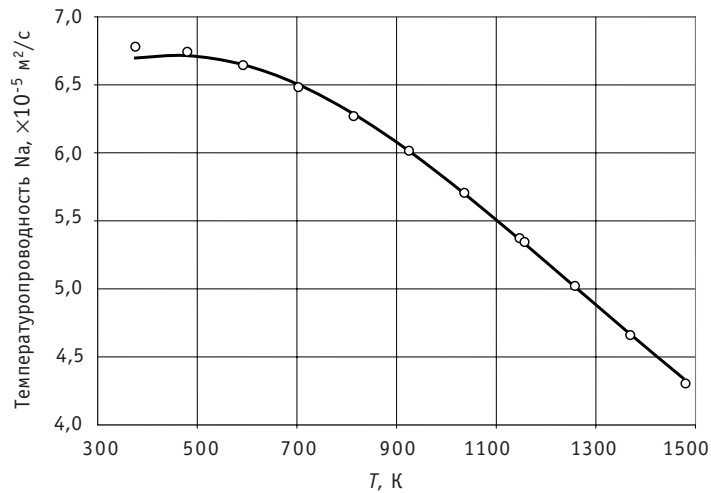
Таблица 5
Поверхностное натяжение жидкости на линии насыщения в зависимости от температуры

T, K	Свойство $\sigma, \text{ Н/м}$
373.15	0.197
477.15	0.186
589.15	0.175
700.15	0.164
811.15	0.153
922.15	0.142
1033.15	0.131
1144.15	0.120
1154.15	0.118
1255.15	0.108
1366.15	0.097
1477.15	0.086

Таблица 6

**Температуропроводность
Na в зависимости
от температуры**

T, K	$a_{\text{л}}, \text{м}^2/\text{с} \times 10^{-5}$
373.15	6.79
477.15	6.753
589.15	6.655
700.15	6.493
811.15	6.281
922.15	6.026
1033.15	5.716
1144.15	5.383
1154.15	5.355
1255.15	5.032
1366.15	4.671
1477.15	4.315

Рис. 4. Сравнение опытных данных по температуропроводности жидкого натрия с полученной приближенной формулой: \circ – опыт; — формула

(8)

Среднеквадратичное отклонение равно 57,5. Максимальное отклонение равно $-4,69 \cdot 10^2$. Табличные данные взяты из [1]. Сравнение экспериментальных данных из табл. 8 с полученной формулой (8) представлено на рис. 6.

Таблица 7

**Скрытая теплота
парообразования Na в
зависимости
от температуры**

T, K	Свойство λ , $\times 10^3 \text{ Дж/кг}$
477.15	4454.29
589.15	4385.67
700.15	4301.47
811.15	4204.48
922.15	4100.04
1033.15	3993.51
1144.15	3886.28
1154.15	3876.98
1255.15	3781.15
1366.15	3670.19
1477.15	3549.48

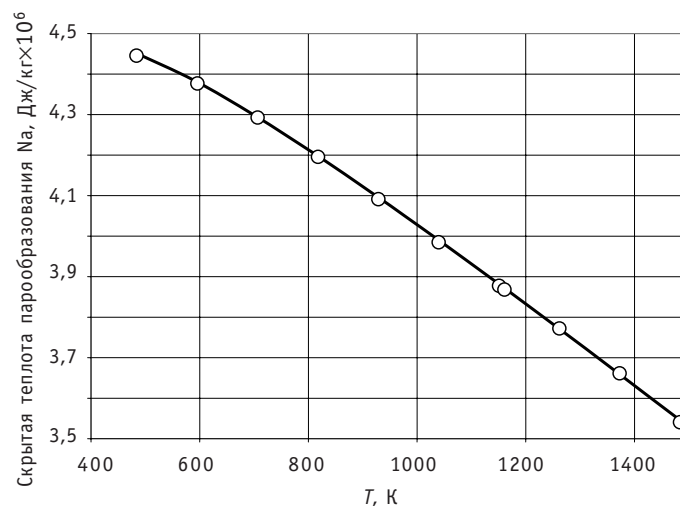
Рис. 5. Сравнение опытных данных по скрытой теплоте парообразования жидкого натрия с полученной приближенной формулой: \circ – опыт; — формула

Таблица 8

Давление насыщения Na в зависимости от температуры

T, K	Свойство $P_{\text{нас}}, \text{Па}$
370.95	$14.32 \cdot 10^{-6}$
477.15	$2.33 \cdot 10^{-2}$
589.15	3.303
700.15	$9.608 \cdot 10^1$
811.15	$1.098 \cdot 10^3$
922.15	$6.917 \cdot 10^3$
1033.15	$29.1 \cdot 10^3$
1144.15	$92.4 \cdot 10^3$
1154.15	$101.3 \cdot 10^3$
1255.15	$233.8 \cdot 10^3$
1366.15	$507.5 \cdot 10^3$
1477.15	$976.8 \cdot 10^3$
2299	$9.768 \cdot 10^5$

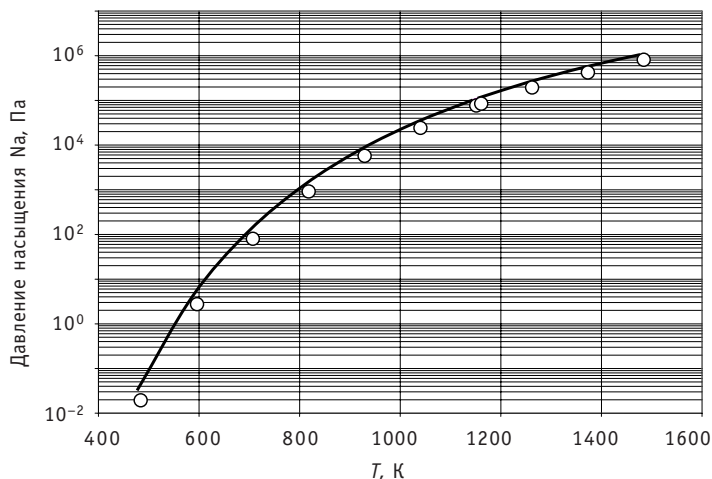


Рис. 6. Сравнение опытных данных по давлению насыщения жидкого натрия с полученной приближенной формулой: ○ – опыт; — – формула

Таблица 9

Плотность жидкого Na в зависимости от температуры на линии насыщения

T, K	Свойство $\rho_l, \text{кг/м}^3$
373.15	926.0
477.15	902.48
589.15	876.21
700.15	849.78
811.15	823.19
922.15	796.43
1033.15	769.52
1144.15	742.61
1154.15	740.05
1255.15	715.70
1366.15	688.79
1477.15	662.04

ПЛОТНОСТЬ ЖИДКОГО НАТРИЯ НА ЛИНИИ НАСЫЩЕНИЯ

Получена приближенная формула

$$\rho_l = -0,24x + 1,02 \cdot 10^3. \quad (9)$$

Среднеквадратичное отклонение равно 0,18. Максимальное отклонение равно -1,57. Табличные данные взяты из [3]. Графиком функции является прямая линия.

ПЛОТНОСТЬ ПАРОВ ЖИДКОГО НАТРИЯ НА ЛИНИИ НАСЫЩЕНИЯ

Получена приближенная формула

$$\rho_v = \exp\left(-\frac{1,1 \cdot 10^4}{x} + 8,25\right). \quad (10)$$

Среднеквадратичное отклонение равно $5 \cdot 10^{-4}$. Максимальное отклонение равно $-3,65 \cdot 10^{-3}$. Табличные данные взяты из [3]. Сравнение экспериментальных данных из табл. 10 с полученной формулой (10) представлено на рис. 7.

Таблица 10

**Плотность пара Na
в зависимости от
температуры на линии
насыщения**

T, K	Свойство $\rho_v, \text{кг/м}^3$
589.15	$1.566 \cdot 10^{-5}$
700.15	$3.881 \cdot 10^{-4}$
811.15	$3.896 \cdot 10^{-3}$
922.15	$2.204 \cdot 10^{-2}$
1033.15	$8.469 \cdot 10^{-2}$
1144.15	0.248
1154.15	0.270
1255.15	0.585
1366.15	1.194
1477.15	2.1866

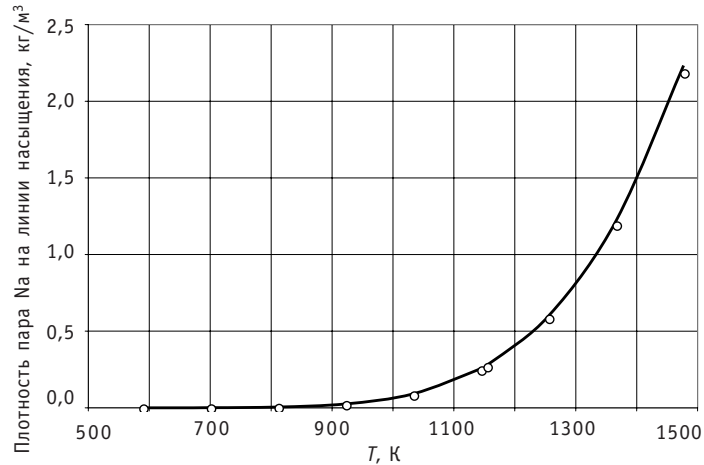


Рис. 7. Сравнение опытных данных по плотности парообразного натрия с полученной приближенной формулой: \circ — опыт; — формула

ЧИСЛО ПРАНДТЛЯ ДЛЯ Na НА ЛИНИИ НАСЫЩЕНИЯ

Получена приближенная формула

$$Pr = 1 / \left(-\frac{1,0786 \cdot 10^5}{T} + 362,29 \right). \quad (11)$$

Среднеквадратичное отклонение равно $9,102 \cdot 10^{-5}$. Максимальное отклонение равно $-9,95 \cdot 10^{-4}$. Табличные данные взяты из [1]. Сравнение экспериментальных данных из табл. 11 с полученной формулой (11) представлено на рис. 8.

Таблица 11

**Число Прандтля Na
на линии насыщения в зави-
симости от температуры**

T, K	Число $Pr, 10^{-2}$
371	1,43
400	0,98
450	0,81
500	0,70
550	0,62
600	0,56
650	0,52
700	0,48
750	0,46
800	0,44
900	0,41
1100	0,40

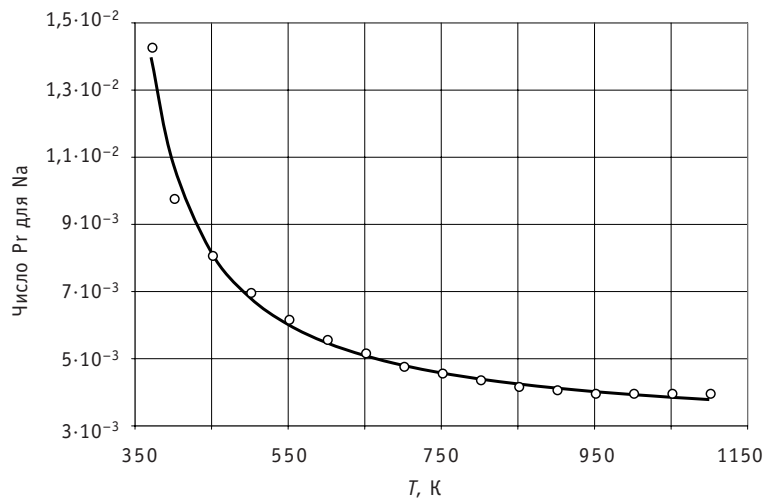


Рис. 8. Сравнение опытных данных по числу Прандтля жидкого натрия с полученной приближенной формулой: \circ — опыт; — формула

вать их для вывода аналитических производных свойств, требующихся в расчетах. В настоящее время набор этих функций для свойств натрия используется в коде КАНАЛ в ЭНИМЦ «МС». В дальнейшем предполагается использовать эти формулы для вставки в расчетный код OpenFOAM версии 1.5 для расчета в сопряженной постановке (совместный перенос тепла в металле и теплоносителях) теплообменника натрий-натрий для реактора на быстрых нейтронах.

Литература

1. Open FOAM The Open Source CFD Toolbox (User Guide) Version 1.5, 9th July 2008 (<http://www.opencfd.co.uk/>)
2. Кириллов П.Л., Терентьева М.И., Денискина Н.Б. Теплофизические свойства материалов ядерной техники: Учебное справочное пособие для студентов специальностей 14.03.05 – Ядерные реакторы и энергетические установки, 14.04.04 – Атомные электрические станции и установки (изд. 2-е). – М.: ИздАт, 2007. – 200 с.
3. Боришанский В.М., Кутателадзе С.С., Новиков И.И., Фудынский О.С. Жидкометаллические теплоносители (изд. 3-е). – М.: Атомиздат, 1976. – 328 с.
4. Варгафтик Н.Б., Филиппов Л.П., Тарзиманов А.А., Тоцкий Е.Е. Справочник по теплопроводности жидкостей и газов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.
5. Двайер О. Теплообмен при кипении жидких металлов/Пер. с англ. под ред. чл.-корр. АН СССР В.И. Субботина. – М.: Мир, 1980. – 315 с.

Поступила в редакцию 9.10.2008

УДК 621.039.58

Thermohydraulics Simulation for PHEBUS Containment \A.A. Bryzgalov, A.A. Natalenko, F. De Rosa, S. Tirini, N. Voukelatou; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2008. – 10 pages, 5 tables, 3 illustrations. – References, 8 titles.

Verification and validation study of ASTEC code on the PHEBUS FPT1 experiment have been performed. The ASTEC coupled and the ASTEC CPA stand-alone containment calculations for the bundle degradation phase of experiment have been made. For the CPA stand-alone calculation the inlet steam and hydrogen flow rates sensitivity analyses has been made within the uncertainty of experimental data. Studying of the dependence between different geometry models of the containment and computational values was carried out. General patterns of the thermohydraulics behavior were found and probable reasons of discrepancies between ASTEC prediction and experimental results were noted.

УДК 621.039.534.63

Simple Formulas for Thermodynamic Properties of Sodium \A.A. Kazantsev, A.S. Kondratyev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2008. – 8 pages, 11 tables, 8 illustrations. – References, 5 titles.

As the coolant, sodium is widely used in the fast breeder reactors, but for its calculation with use of code OpenFOAM wider set of formulas, in comparison with published in reference books is required. For codes of computing hydrodynamics (CFD codes), such as OpenFOAM, by an Open Source license code there is possibility to change the source code text according to any applied problem, it was required to find or to obtain simple formulas for calculation thermo physics properties of sodium. Initial data for obtaining interpolation functions are taken from domestic and foreign handbook. The set of the calculated functions describing necessary for calculated codes thermodynamic and thermal physics properties of sodium and its steams, namely: dynamic viscosity, heat conductivity, superficial tension, thermal conductivity, heat of evaporation, pressure on saturation line from temperature, density on saturation line, Prandtl number on a saturation line were received.

УДК 621.039.5

Development of Thermal Hydraulic Code KANAL and Thermal Physics Models for NPP Simulators \A.A. Kazantsev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2008. – 10 pages. – References, 24 titles.

For supporting of NPP simulators development there was performed the cycle of thermal physics and thermodynamic works, the set of models of main equipment, two phase non equilibrium code KANAL based on 6 equation model. The new flow map pattern was applied in the code and was used Russian correlation for bubble boiling and for condensation into tube, that is different from known code prototype, such as TRAC. For learning the TRAC code correlations there were performed accurate 3D transient calculations of some problems, including horizontal steam generator calculations, there was performed comparison of calculations with the experimental model of top quarter of tube bundle of horizontal steam generator.

УДК 621.039.548

Non-Stationary Hydrodynamic Loadings and Fuel Rods Beam Vibrations in Fuel Assembly WWER-440 \V.V. Perevezentsev, V.I. Solonin, F.D. Sorokin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2008. – 9 pages, 5 illustrations. – References, 3 titles.

Are received by on a full-scale test model experimental data on flow-induced vibrations of a fuel rods beam in fuel assembly WWER-440. Essential influence of hydrodynamics of a stream before a basic lattice (on an input in a fuel rods beam) on intensity of vibrations is shown. On measurements of pulsations of pressure in a backlash between an internal surface a cover and an external series fuel rods the non-stationary hydrodynamic forces influencing a fuel rods beam and causing it of vibration are defined. The mechanical model of a fuel rods beam on the basis of its description as beams with low