

# 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	$\mu_L$ Па·с × 10 <sup>-4</sup>
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

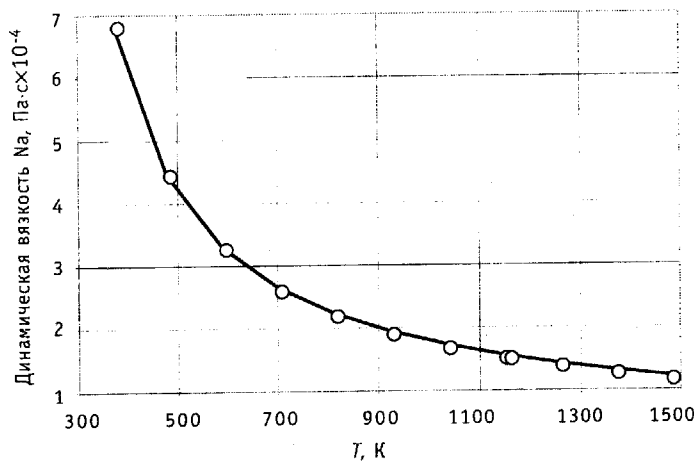


Рис. 1. Сравнение опытных данных по динамической вязкости с полученной приближенной формулой: ○ – опыт; — – формула

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 множитель 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

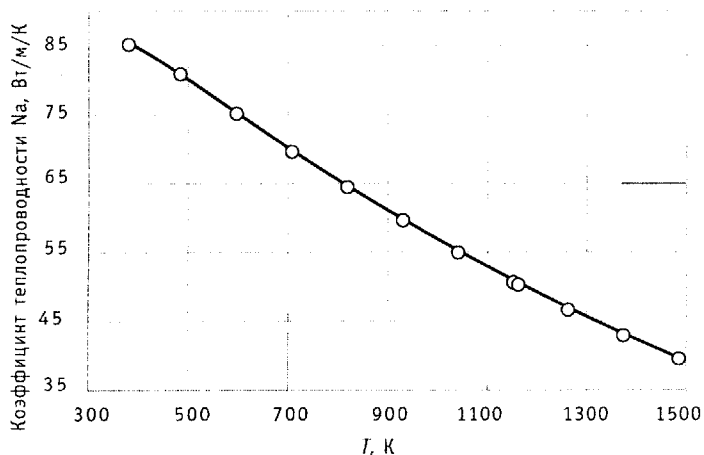


Рис. 2. Сравнение опытных данных по коэффициенту теплопроводности в жидкой фазе с полученной приближенной формулой:  $\circ$  – опыт; — – формула

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

### 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.

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

Таблица 3

**Коэффициент теплопроводности Na в газовой фазе в зависимости от температуры**

$T, K$	$k_v, \text{Вт/м/К}$
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

$T, K$	$c_{p, \text{Na}}$ 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

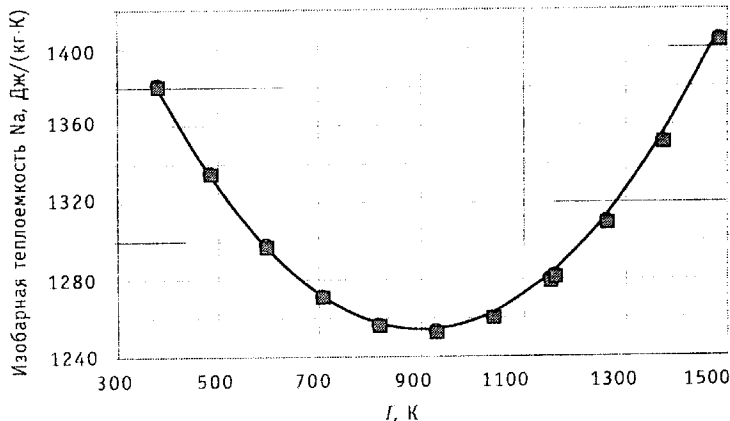


Рис. 3. Сравнение опытных данных по удельной изобарной теплоемкости натрия с полученной приближенной формулой:

○ — 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.

### Поверхностное натяжение жидкости на линии насыщения в зависимости от температуры

Таблица 5

$T, K$	Свойство $\sigma, H/m$
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

Получена приближенная формула

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

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 6

### Температуропроводность Na в зависимости от температуры

$T, K$	$a_{\text{т}}, \text{м}^2/\text{с} \times 10^{-5}$
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

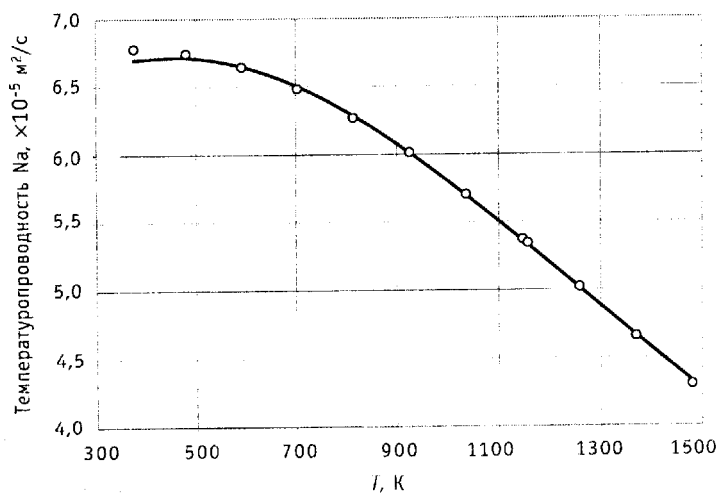


Рис. 4. Сравнение опытных данных по температуропроводности жидкого натрия с полученной приближенной формулой:  $\circ$  – опыт; — – формула

(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 $\lambda, \times 10^3 \text{ Дж/кг}$
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

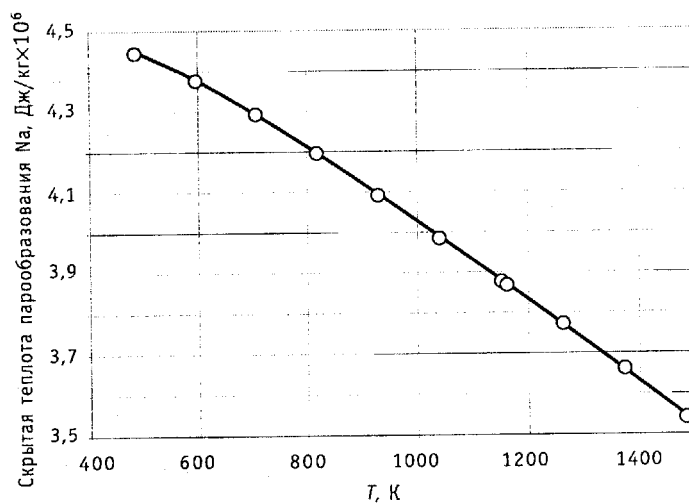


Рис. 5. Сравнение опытных данных по скрытой теплоте парообразования жидкого натрия с полученной приближенной формулой:  $\circ$  – опыт; — – формула

Таблица 8

### Давление насыщения $Na$ в зависимости от температуры

$T, K$	Свойство $P_{нас}, Pa$
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	$9.768 \cdot 10^5$

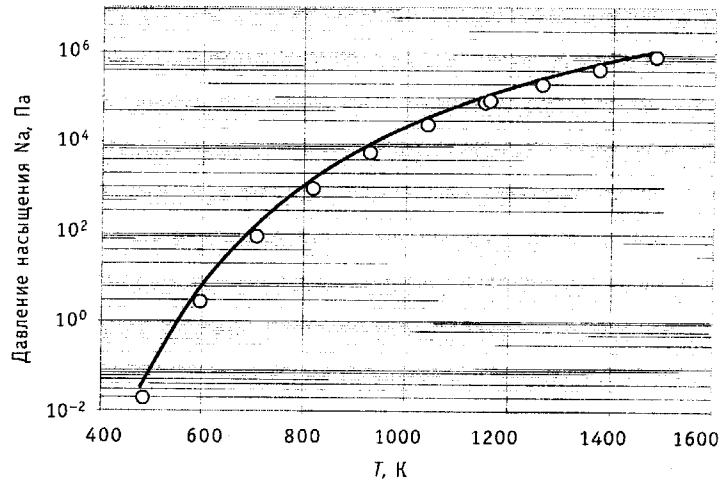


Рис. 6. Сравнение опытных данных по давлению насыщения жидкого натрия с полученной приближенной формулой:  $\circ$  – опыт; — формула

Таблица 9

### Плотность жидкого $Na$ в зависимости от температуры на линии насыщения

$T, K$	Свойство $\rho_l, kg/m^3$
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.

**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

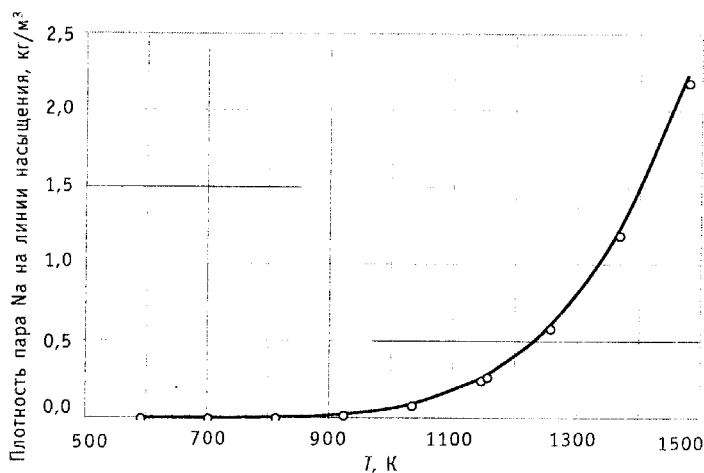


Рис. 7. Сравнение опытных данных по плотности парообразного натрия с полученной приближенной формулой: ○ – опыт; — – формула

**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.

**Число Прандтля Na на линии насыщения в зависимости от температуры**

Таблица 11

$T, K$	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

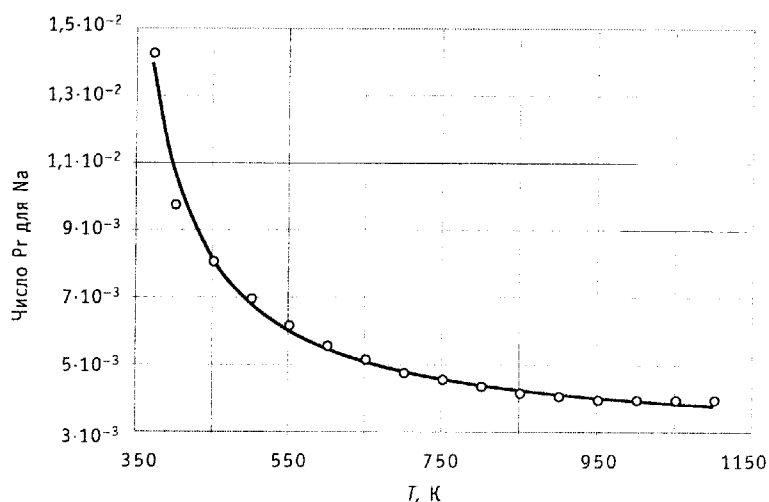


Рис. 8. Сравнение опытных данных по числу Прандтля жидкого натрия с полученной приближенной формулой: ○ – опыт; — – формула

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