

К РАСЧЕТУ ВОЗРАСТА НЕЙТРОНОВ ДЕЛЕНИЯ В МЕТАЛЛО-ВОДНЫХ СМЕСЯХ

А.В. Алексеев, А.В. Кузьмин

Томский политехнический университет

E-mail: kuzminav@tpu.ru

Анализируются экспериментальные и расчетные данные по определению возраста нейтронов деления до индиевого резонанса в часто используемых в реакторной физике смесях Zr-H₂O, Al-H₂O, Fe-H₂O. Приведены аппроксимации, полученные на основе метода наименьших квадратов, оценена их погрешность. Показана необходимость экспериментального определения возраста нейтронов в чистых металлах и поиска альтернативных методов расчета.

Введение

Возраст является важной миграционной характеристикой нейтрона в физике тепловых реакторов. Он определяет утечку замедляющихся нейтронов из активной зоны и необходим для решения критической задачи. Аналитическое определение возраста и его экспериментальное подтверждение в различных комбинациях материалов все еще не дают хорошего согласия из-за неточности ядерно-физических констант по отдельным элементам. Определение возраста нейтронов деления в различных смесях требует, прежде всего, знания возраста компонентов смеси. Точность экспериментальных данных, как правило, достигается за счет применения дорогостоящего оборудования, более усовершенствованных методик и устройств, что в свою очередь определяет и их дефицит. В настоящей работе обсуждаются экспериментальные значения возраста нейтронов деления до индиевого резонанса в металло-водных смесях, полученные Пашалем с сотрудниками [1–5] на установках Международного атомного центра по испытанию защитных материалов, результаты численных расчетов методом Монте-Карло [6, 7] и методом пространственно-угловых моментов функции распределения нейтронов [8] и аппроксимационные зависимости экспериментальных и расчетных значений возраста [9–11].

Возраст в отдельных компонентах металло-водной смеси

Весьма тщательному исследованию возраста нейтронов деления до индиевого резонанса подверглась легкая вода как один из основных компонентов активной зоны тепловых ядерных реакторов [12]. Разброс в результатах разных исследователей объясняется, на наш взгляд, прежде всего качеством моделирования источника нейтронов деления, совершенством конструкции индиевых детекторов, влиянием эффекта геометрического поглощения нейтронов, качеством подготовки воды. Экспериментальное оборудование определяет процедуру вычисления возраста и высших моментов, количество и величину вносимых поправок. Критерием совершенства проводимого эксперимента следует считать согласованность опыта с результатами теоретического расчета по различным машинным кодам.

В работе [1] при измерении возраста нейтронов деления при замедлении в воде до индиевого резонанса 1,46 эВ применялся плоский источник нейтронов деления ограниченного диаметра и плоские детекторы, практически эквивалентные неограниченной пластине. В отличие от измерений, в которых использовались осевые детекторы с большими плоскими источниками, эти результаты не требовали расчетной корректировки на экстраполяцию к источнику бесконечной геометрии, а поправки были невелики и хорошо согласованы. Экспериментальный возраст нейтронов в воде плотностью 1 г/см³ составил

$$\tau_{1,46}^{\text{эк}} = 26,48 \pm 0,32 \text{ см}^2,$$

что хорошо согласуется с результатами расчета замедления методом Монте-Карло по программе TUCHE [1]

$$\tau_{1,46}^{\text{рас}} = 25,99 \pm 0,18 \text{ см}^2.$$

Код учитывал неупругое рассеяние и анизотропию упругого рассеяния на кислороде. Такое хорошее совпадение определило наш выбор, поэтому результаты эксперимента [1] были приняты в качестве реперного для воды. Впоследствии другими исследователями были получены близкие к этому значению результаты.

Экспериментальных данных по возрасту нейтронов деления в цирконии, алюминии и железе нами обнаружено не было. В этой связи для сравнения были приняты результаты численного расчета по программе КДЗ ФЭИ в гомогенной бесконечной среде с плоским изотропным источником в многогрупповом приближении [8]: для Zr – $\tau_{1,01} = 1912 \text{ см}^2$ и $\tau_{1,00} = 2381 \text{ см}^2$; для Al – $\tau_{1,01} = 6294 \text{ см}^2$ и $\tau_{1,00} = 8327 \text{ см}^2$, а для Fe – $\tau_{1,01} = 548 \text{ см}^2$ и $\tau_{1,00} = 3170 \text{ см}^2$.

Расчетные значения возраста по 18-групповой системе констант были получены для энергии 1,01 эВ, а по 26-групповой – для энергии 1,00 эВ. Разницей в величине возраста в пределах 1,00...1,46 эВ пренебрегалось, поскольку по оценкам [12] она составляет 2,5...5,0 %.

Аппроксимации возраста в смеси Zr-H₂O

Опыты по определению возраста в смеси Zr-H₂O [2] проводились в алюминиевом баке длиной 234 см, шириной 132 см и глубиной 183 см. На пластины разных размеров ушло 6804 кг сплава цирка-

лоя-2, включающего более 98 % циркония плотностью 6,55 г/см³. Такие размеры сводили к минимуму влияние геометрических утечек. Результаты эксперимента, представленные на рис. 1, удовлетворительно с погрешностью $\delta \leq 3\%$ согласуются с расчетом замедления по методу Монте-Карло [6].

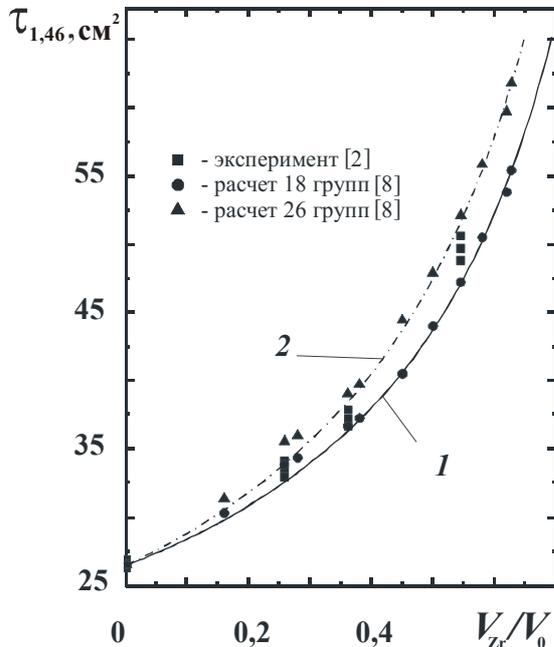


Рис. 1. Зависимость возраста нейтронов деления от доли металла в смеси Zr-H₂O: 1) по ур. (1); 2) по ур. (2)

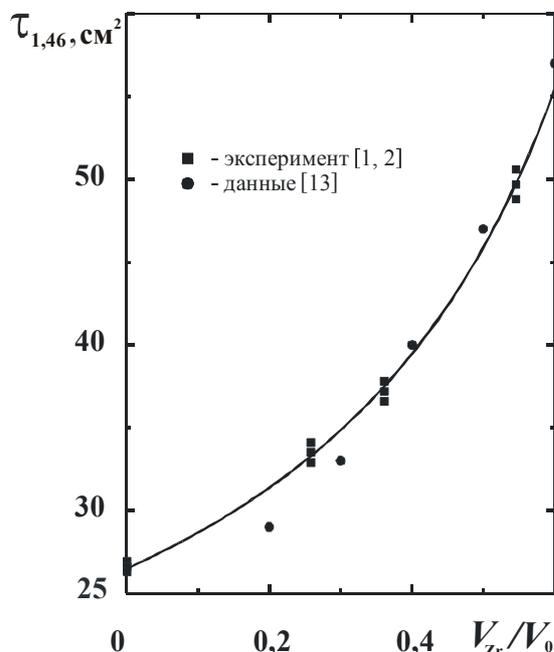


Рис. 2. Аппроксимация экспериментальных данных по возрасту нейтронов деления по [1, 2] для смеси Zr-H₂O, ур. (3)

Расчет возраста методом пространственно-угловых моментов функции распределения нейтронов [8] с разным числом групп как бы дает при-

ближение «снизу» и «сверху» с ошибкой не более 7,5 и 6 %, соответственно. Данные расчета [8] удовлетворительно аппроксимируются рациональными функциями:

$$\tau_{1,01} = \frac{26,48 - 8,838 \cdot V_{Zr}/V_0}{1 - 0,9908 \cdot V_{Zr}/V_0}, \quad (1)$$

$$\tau_{1,0} = \frac{26,48 - 5,002 \cdot V_{Zr}/V_0}{1 - 0,991 \cdot V_{Zr}/V_0} \quad (2)$$

с погрешностью не более 1,7 и 2,5 %, не считая точек со значениями V_{Zr}/V_0 , равными 0,258 и 0,280, где ошибка составила около 4,0 и 4,5 %. Не исключено, что это обусловлено неточностью в публикации.

На рис. 2 можно видеть, что данные [2] хорошо ($\delta \leq 1\%$) согласуются с уравнением

$$\tau_{1,01} = \frac{26,48 - 6,635 \cdot V_{Zr}/V_0}{1 - 0,9907 \cdot V_{Zr}/V_0} \quad (3)$$

и заметно отличаются от расчетных значений [13].

Аппроксимации возраста в смеси Al-H₂O

Для смесей Al-H₂O характерен меньший разброс экспериментальных [3, 4] и расчетных данных (рис. 3). Результаты расчета по 18-групповой программе [8] аппроксимируются нижеприведенной зависимостью с $\delta \leq 1,5\%$

$$\tau_{1,01} = \frac{26,48 + 7,9346 \cdot V_{Al}/V_0}{1 - 0,995 \cdot V_{Al}/V_0} \quad (4)$$

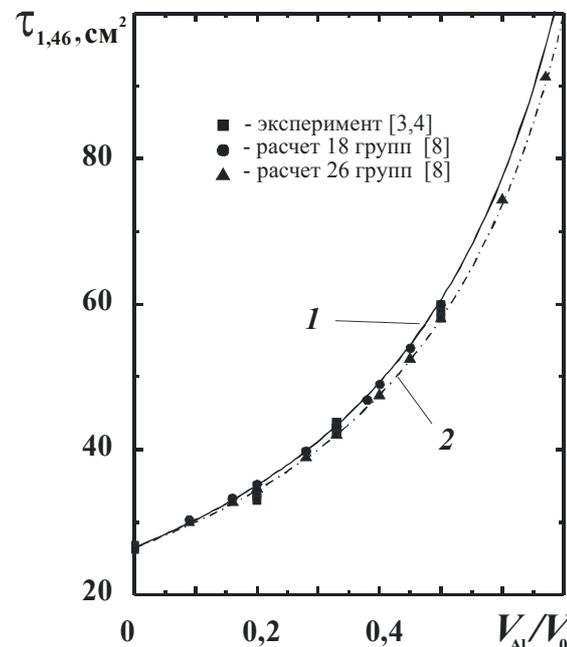


Рис. 3. Зависимость возраста нейтронов деления от доли металла в смеси Al-H₂O: 1) по ур. (4), 2) по ур. (5)

Обращает на себя внимание, в отличие от случая с Zr, приближение этой зависимости наблюдается «снизу».

С погрешностью ~1 % обобщаются результаты расчета по 26-групповой программе [3]

$$\tau_{1,00} = \frac{26,48 + 5,2604 \cdot V_{Al}/V_0}{1 - 0,9962 \cdot V_{Al}/V_0} \quad (5)$$

Эта аппроксимация лучше согласуется с экспериментом (см. рис. 3), поэтому ее можно рекомендовать для расчетов.

Аппроксимации возраста в смеси Fe-H₂O

Важность оценки возраста в железо-водной смеси связана, прежде всего, с железо-водными отражателями нейтронов, неотъемлемым конструктивным элементом наиболее распространенных реакторов с урано-водной решеткой типа ВВЭР и ВК.

Диапазон изменения доли металла в экспериментальных работах сравнительно невысок и зависит от мощности конвертора тепловых нейтронов (рис. 4). В качестве испытуемого материала в работе [14] использовалась сталь Ст3, содержащая 0,14...0,22 % С, 0,05 % Si, 0,3...0,65 % Mn, 0,3 % Cr, 0,05 % S, 0,04 % P, 0,01 % N. В работе [5] применялась малоуглеродистая сталь плотностью 7,86 г/см³, включающая 0,2 % С и 0,4 % Mn. Состав стали в этих работах помимо методики, вероятно, может повлиять на отличия в результатах.

Для обобщения экспериментальных данных [5, 14] в исследуемом диапазоне изменения доли металла в смеси принималась экспоненциальная функция, коэффициенты которой находились по методу наименьших квадратов. Полученные аппроксимации представлены на рис. 4 и обобщают экспериментальные данные работы [14] в интервале изменения доли железа в смеси $V_{Fe}/V_0 - [0;0,43]$:

$$\tau_{1,46} = 23,5 + 5,81 \cdot \exp\left(\frac{V_{Fe}/V_0}{0,279}\right) \quad (6)$$

с относительной погрешностью $\delta < 8\%$, а работы [5] в интервале [0;0,634]

$$\tau_{1,46} = 23,94 + 2,28 \cdot \exp\left(\frac{V_{Fe}/V_0}{0,2766}\right) \quad (7)$$

с погрешностью $\delta < 3\%$.

Следует подчеркнуть, что результаты эксперимента [5] также подтверждены расчетами замедления вероятностным методом Монте-Карло по программе ТУСНЕ-III [7].

Значения возраста в смеси Fe-H₂O в области $V_{Fe}/V_0 > 0,634$ определялись только численно многогрупповыми программами методом пространственно-угловых моментов функции распределения нейтронов [8]. Особенностью программы с 26-групповой системой констант в задаче замедления является более детальный учет неупругого рассеяния, резонансной самоэкранировки в среднегрупповые сечения захвата, полного и неупругого рассеяния.

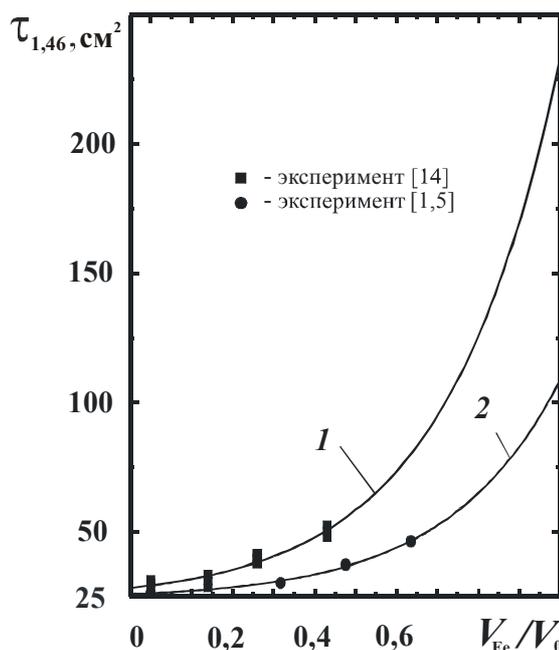


Рис. 4. Аппроксимации опытных данных по возрасту в смесях Fe-H₂O: 1) по ур. (6), 2) по ур. (7)

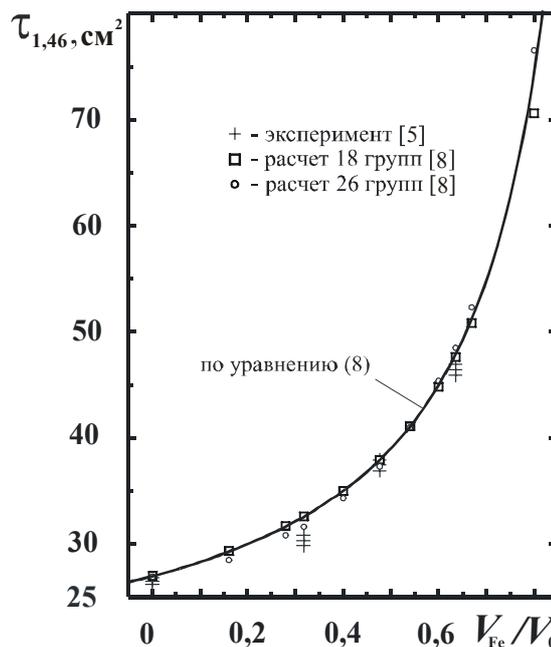


Рис. 5. Сопоставление результатов расчета по методу многих групп с экспериментом [5]

Результаты расчета с использованием 18 и 26 групп нейтронов приведены на рис. 5. Результаты расчета с разным числом групп вплоть до $V_{Fe}/V_0 = 0,8$ мало отличаются друг от друга и несколько превышают экспериментальные данные [5]. Это позволило аппроксимировать их одной зависимостью

$$\tau_{1,00} = \frac{26,95 - 14,758 \cdot V_{Fe}/V_0}{1 - 0,9956 \cdot V_{Fe}/V_0} \quad (8)$$

которая описывает результаты расчета с учетом 18 групп с погрешностью $\delta < 1\%$ в интервале $[0; 0,67]$, а с учетом 26 групп – с $\delta < 3\%$ в диапазоне $[0; 0,8]$.

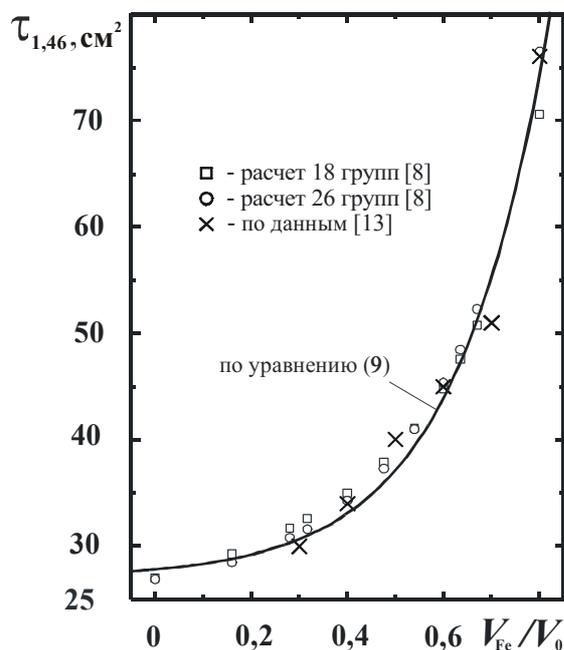


Рис. 6. Сопоставление расчетных данных по возрасту в смеси Fe-H₂O с данными [13]

В работе [13] по результатам расчетов [8,16] предложены значения возраста в железо-водной смеси (рис. 6). С начальным значением [1] они аппроксимируются зависимостью

$$\tau_{1,46}^{\text{рас}} = 27,075 + 0,765 \cdot \exp\left(\frac{V_{\text{Fe}}/V_0}{0,194}\right), \quad (9)$$

которая на интервале $[0; 0,8]$ имеет погрешность $\delta < 8\%$.

Обсуждение результатов

Принципиальным отличием опытов в железо-водных смесях [5, 14] помимо габаритов установки (примерно 3 м³ в эксперименте [5] против 0,5 м³ в [14]) является заметное расхождение в результатах определения возраста в чистой воде (рис. 4). В работе [14] значение возраста до энергии индиевого резонанса определялось на той же экспериментальной установке и в воде было равно

$$\tau_{1,46} = 30,2 \pm 2,7 \text{ см}^2,$$

в то время как в опытах [1] в воде такой же плотности (1 г/см³) оно оказалось меньше на 14%. Это значение, явившееся результатом более совершенной методики и техники эксперимента, было подтверждено в той же лаборатории теоретическим расчетом Олтера с помощью метода Монте-Карло, а затем и другими исследователями.

Заметим, что успешное определение возраста нейтронов деления в воде [1] позднее легло в осно-

ву тестирования новых экспериментальных данных по сечениям поглощения кислорода и дифференциальным сечениям упругого рассеяния на кислороде в МэВ-области энергий [15], учитывая их значимость в физике реакторов на быстрых нейтронах с окисным топливом. Эта задача также решалась методом Монте-Карло по модифицированной программе МАК с точечным заданием сечений и вероятностей, т. е. не допускающей традиционных упрощений в решении задачи о замедлении нейтронов в бесконечной однородной среде и более строго учитывающей анизотропию упругого рассеяния на кислороде.

Не менее важно знание возраста нейтронов деления в рассматриваемых металлах, по которым имеются только расчетные значения. Общую картину можно представить, например, сравнивая расчетные данные по возрасту нейтронов деления в объеме железа, полученные разными авторами, с результатами интерполяции по предложенным аппроксимациям, табл.

Таблица. Результаты расчета возраста нейтронов деления до энергии E*

Источник	E*, эВ	$\tau(E^*)$, см ²
[17]	0,2	160
[14]	1,46	743
[8], 18 групп	1,01	548
[8], 26 групп	1,00	3170
По ур. (6)	1,46	233
По ур. (7)	1,46	109
По ур. (9)	1,0...1,46	160

Авторами работы [14] был проведен расчет возраста по методике А.Д. Галанина [17], которая позднее [13] была признана им же несостоятельной. Расчет дал удовлетворительное совпадение с результатами эксперимента, что можно считать случайным из-за неверного определения среднего косинуса угла рассеяния.

Выводы

Проведен анализ экспериментальных и расчетных данных по определению возраста нейтронов деления до индиевого резонанса в смесях Zr-H₂O, Al-H₂O, Fe-H₂O. На основе метода наименьших квадратов получены их аппроксимации, оценена погрешность определения.

Полученные выражения могут быть использованы для расчета реакторов в диффузионно-возрастном приближении. Значительный разброс расчетных данных по различным программам и аппроксимациям (на примере чистого железа) указывает на необходимость экспериментального уточнения ядерно-физических констант, совершенствования теоретического аппарата, поиска альтернативных методов расчета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Paschall R.K. The Age of Fission Neutrons to Indium Resonance Energy in Water // Nucl. Sci. and Eng. – 1964. – V. 20. – P. 436–444.
2. Paschall R.K. The Age of Fission Neutrons to Indium Resonance Energy in Zirconium-Water Mixtures – I. Experiment // Nucl. Sci. and Eng. – 1965. – V. 23. – P. 256–263.
3. Paschall R.K. The Age of Fission Neutrons to Indium Resonance Energy in Aluminum-Water Mixtures // Transactions of ANS. – 1965. – V. 8. – № 2. – P. 467–468.
4. Paschall R.K. The Age of Fission Neutrons to Indium Resonance Energy in Aluminum-Water Mixtures // Nucl. Sci. and Eng. – 1966. – V. 26. – P. 73–79.
5. Paschall R.K. The Age of Fission Neutrons to Indium Resonance Energy in Iron-Water Mixtures – I. Experiment // J. Nucl. Energy. Part A/B. – 1966. – V. 20. – P. 25–35.
6. Alter H. The Age of Fission Neutrons to Indium Resonance Energy in Zirconium-Water Mixtures – II. Theory // Nucl. Sci. and Eng. – 1965. – V. 23. – P. 264–271.
7. Alter H. The Age of Fission Neutrons to Indium Resonance Energy in Iron-Water Mixtures – II. Theory // J. Nucl. Energy. Part A/B. – 1966. – V. 20. – P. 37–54.
8. Марченко Л.В., Сергеев Ю.А. Расчет квадрата длины замедления для различных сред в 18- и 26-групповых P_1 -приближениях и их сравнение с экспериментальными данными // Бюллетень центра по ядерным данным. – М.: Атомиздат, 1969. – Вып. 6. – С. 319–390.
9. Zyk I.S., Kuzmin A.V. Approximations for the age of fission neutrons in mixtures zirconium, aluminum and water // Modern Techniques and Technologie: Transactions XII Internat. Scientific and Practical Conf. – Tomsk, 2006. – P. 154–156.
10. Алексеев А.В., Кузьмин А.В. Аппроксимации экспериментальных и расчетных данных по возрасту нейтронов деления в железо-водной смеси // Современные техника и технологии: Труды XII Междунар. научно-практ. конф. – Томск, 2006. – Т. 2. – С. 336–338.
11. Алексеев А.В., Зык И.С., Кузьмин А.В. К определению возраста нейтронов деления в смесях металлов с водой // Трансфер технологий, инновации, современные проблемы атомной отрасли: Труды Междунар. научно-практ. конф. – Снежинск, 2006. – С. 215–216.
12. Бекурц К., Виртц К. Нейтронная физика. – М.: Атомиздат, 1968. – 456 с.
13. Галанин А.Д. Введение в теорию ядерных реакторов на тепловых нейтронах. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 536 с.
14. Герасева Л.А., Вавилов В.В. Замедление нейтронов в железо-водных смесях // Атомная энергия. – 1960. – Т. 8. – Вып. 6. – С. 556–557.
15. Наумов В.А., Розин С.Г. Решение задач физики реакторов методом Монте-Карло. – Минск: Наука и техника, 1978. – 208 с.
16. Гарусов Е.А., Петров Ю.В. Моменты функции замедления и её малогрупповые модели для водо-металлических смесей // Атомная энергия. – 1974. – Т. 36. – Вып. 2. – С. 143–144.
17. Галанин А.Д. Теория ядерных реакторов на тепловых нейтронах. – М.: Атомиздат, 1959. – 383 с.

Поступила 07.12.2006 г.

УДК 536.21

О ВЫБОРЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПРОФИЛЯ ПРИ РЕШЕНИИ УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ В СФЕРИЧЕСКИХ КООРДИНАТАХ МЕТОДОМ ИНТЕГРАЛА ТЕПЛООВОГО БАЛАНСА

Р.В. Городов, А.В. Кузьмин

Томский политехнический университет
E-mail: gorodov@tpu.ru

С помощью интегрального метода получены решения уравнения теплопроводности для шара и области, ограниченной изнутри сферической полостью. Показано влияние выбора температурного профиля на эффективность приближенного аналитического решения. Предлагается вариант уточнения решения в переходной области.

Введение

Точные решения задач теплопроводности достаточно громоздки и трудоемки. К тому же они практически отсутствуют в задачах о радиальном потоке тепла в сферических координатах с изменением агрегатного состояния [1, 2]. Поэтому для решения практических задач обычно используют графики, полученные численными или приближенными методами [3]. Одним из приближенных аналитических методов является метод интеграла теплового баланса (ИТБ), в котором, прежде всего, привлекают его физическая ясность, простота и достаточно высокая точность результатов, что наглядно показывает Т. Гудмен [4] на многочислен-

ных примерах. Основная трудность, с которой приходится сталкиваться при использовании метода ИТБ, заключается в правильном задании температурного профиля, который, по мнению Т. Гудмена, значительно влияет на точность результатов.

Существует несколько подходов в выборе температурных профилей. В работе [5] А.И. Вейник предлагает для задач любой геометрии использовать температурные профили в виде обычных полиномов, что должно упрощать решение поставленной задачи.

Ссылаясь на работу Ф. Поля и Т. Ларднера [6] и не приводя решения, Т. Гудмен в своей статье [4] рекомендует в случае сферической симметрии использовать температурный профиль вида: