

## Список литературы:

1. Трухинский А.Д., Изюмов М.А., Поваров О.А., Малышенко С.П. Основы современной энергетики: учебник для вузов: том 1. Современная теплоэнергетика; под ред. А.Д. Трухуня. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 472 с.
2. Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом». URL: <http://www.gosatom.ru/> (дата обращения: 11.10.2015).
3. Габараев Б.А., Смирнов Ю.Б., Черепнин Ю.С. Атомная энергетика XXI века: учебное пособие / – М.: Издательский дом МЭИ, 2013. – 250 с.
4. В.И. Рачков. Стратегия развития атомной энергетики России. Труды конференции «Повышение надежности и эффективности эксплуатации электрических станций и энергетических систем» - 2010 г., МЭИ.

**Оценка метода эквивалентной длины пробега нейтрона в расчете возраста  
в металловодных смесях**

**Южаков А.В., Кузьмин А.В.**

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет,*

*Россия, г. Томск*

*E-mail: kuzminav@tpu.ru*

В расчетах и проектировании ядерного реактора требуется знание возраста нейтронов деления. Эта физическая величина, связанная с замедлением быстрых нейтронов до детектируемой энергии, определяет утечки нейтронов и тем самым влияет на размеры реактора. Для определения возраста в смеси материалов активной зоны проектируемого реактора все еще требуется проведение дорогостоящих натуральных экспериментов. К настоящему времени имеется несколько экспериментальных и расчетно-теоретических методик по определению значения возраста нейтронов в металловодных смесях. Но из-за неточностей в экспериментах и в ядерно-физических константах надежного согласования теории с опытом получить не удалось. Поэтому разработка новых и аттестация старых методов по определению возраста в смесях представляет интерес.

В [1] был предложен метод эквивалентных длин пробега, основанный на сравнении двух различных металловодных систем X и Y. Если предположить, что среднее сечение рассеяния в смеси X больше, чем в системе Y, то при одинаковых объемных долях значение возраста в системе X будет больше. Однако если средние сечения рассеяния у металлов не сильно различаются, то можно подобрать такую объемную долю воды для системы X, что возраст в этих системах будет одинаков. Тогда сравнение вклада металла в возраст смеси можно провести по длине упругого рассеяния нейтрона:

$$\lambda_s^{(i)} \approx \lambda_t^{(i)} = \left( \frac{v_i \cdot \rho_i \cdot \sigma_s^{(i)}}{A_i} + \frac{v_{H_2O}^{(i)} \cdot \rho_{H_2O}^{(i)} \cdot \sigma_s^{(H_2O)}}{M_{H_2O}} \right)^{-1}, \quad (1)$$

где  $\rho_{(i)}$  и  $\rho_{(H_2O)}^{(i)}$  – плотности  $i$  металла и воды в системе, содержащей  $i$  металл;  $v_i$ ,  $v_{H_2O}^{(i)}$  – объемная доля  $i$  металла и воды в данной системе.

Справедливо также соотношение:

$$v_i + v_{H_2O}^{(i)} = 1. \quad (2)$$

Так как сравнение металлов производим по длинам свободного пробега, то:

$$\lambda_t^{(X)} = \lambda_t^{(Y)}. \quad (3)$$

Используя выражение (1) и соотношение (2) из равенства (3), получаем условие:

$$\frac{v_X \cdot \rho_X \cdot \sigma_s^{(X)}}{A_X} + \frac{\rho_{H_2O}^{(X)} \cdot \sigma_s^{H_2O(X)}}{A_{H_2O}} \cdot (1 - v_X) = \frac{v_Y \cdot \rho_Y \cdot \sigma_s^{(Y)}}{A_Y} + \frac{\rho_{H_2O}^{(Y)} \cdot \sigma_s^{H_2O(Y)}}{A_{H_2O}} \cdot (1 - v_Y). \quad (4)$$

Допустим, имеются данные по возрасту в системе X, полученные некоторым способом, и имеющиеся значения возраста есть функция объемных долей металла и воды. По этим данным

можно определить возраст в системе Y, так как объемную долю металла  $v_Y$  в системе Y можно вычислить из формулы (4) по объемному содержанию  $v_X$  для системы X, которая имеет такое же значение возраста нейтронов. Используя это значение  $v_X$ , по кривой зависимости возраста от объемной доли в системе X, можно сразу же узнать возраст в системе Y, которая имеет объемную долю металла  $v_Y$ .

Выражение для  $v_X$  через  $v_Y$  получается из формулы (4):

$$v_X = \frac{v_Y \cdot (\theta_Y - \chi) + (\chi - 1)}{\theta_X - 1}, \quad (5)$$

где

$$\chi = \frac{\rho_{H_2O}^{(Y)} \cdot \sigma_s^{H_2O(Y)}}{\rho_{H_2O}^{(X)} \cdot \sigma_s^{H_2O(X)}}, \quad (6)$$

$$\theta_i = \left( \frac{\rho_i \cdot \sigma_s^{(i)}}{A_i} \right) \cdot \left( \frac{A_{H_2O}}{\rho_{H_2O}^{(X)} \cdot \sigma_s^{H_2O(X)}} \right). \quad (7)$$

Соотношение (5) может быть использовано для пересчета от одной металловодной системы к другой, а также от одной температуры к другой.

Для аттестации методики в качестве исходной системы X примем наиболее распространенную систему железо-вода. В работе [2] имеются экспериментальные данные по возрасту в железо-водяной смеси. Выбор источника связан с тем, что результаты эксперимента в [2] были подтверждены расчетами замедления вероятностным методом Монте-Карло по программе TUCHE-III [3], поэтому они являются наиболее достоверными. Также в работах [4,5] методом наименьших квадратов были получены аппроксимации экспериментальных работ [2] с погрешностью менее 3% и имеют вид:

$$\tau_{1,46} = 23,94 + 2,28 \cdot \exp\left(\frac{v_{Fe}}{0,2766}\right). \quad (8)$$

Для определения возраста в Al-H<sub>2</sub>O смеси методом эквивалентных длин пробега воспользуемся формулой (5):

$$v_{Fe} = \frac{v_{Al} \cdot (\theta_{Al} - \chi) + (\chi - 1)}{\theta_{Fe} - 1}.$$

Сечения рассеяния усреднены по потоку и сведены в таблицу 1:

$$\sigma_s = \frac{\int_E^{E_0} \sigma_s(E) \frac{dE}{E}}{\int_{E_1}^{E_0} \frac{dE}{E}} = \frac{1}{u_1 - u_0} \cdot \int_{u_0}^{u_1} \sigma_s(u) du. \quad (9)$$

Затем вычисляются значения  $\theta_{Al}$ ,  $\theta_{Fe}$  и  $\chi$  по формулам (6, 7) для данных систем, полученные значения занесены в таблицу 2. Далее по имеющейся функциональной зависимости возраста от объемной доли в железо-водяной смеси (8) определяем объемные доли алюминия в алюминиево-водяной смеси, соответствующие тем же значениям возраста. По полученным данным строим зависимость возраста нейтронов в алюминиево-водяной смеси, полученного методом эквивалентных длин пробега, от объемной доли алюминия в смеси (рисунок 1). На том же графике сравним полученные значения с экспериментальными данными из [6] и с аппроксимированными зависимостями по данной системе, полученными ранее в работе [4] по

данным в [7] по 18-ти групповой программе:

$$\tau_{1,01} = \frac{26,48 + 7,9346 \cdot v_{Al}}{1 - 0,995 \cdot v_{Al}} \quad (10)$$

По 26-ти групповой программе [4]:

$$\tau_{1,01} = \frac{26,48 + 5,2604 \cdot v_{Al}}{1 - 0,9962 \cdot v_{Al}} \quad (11)$$

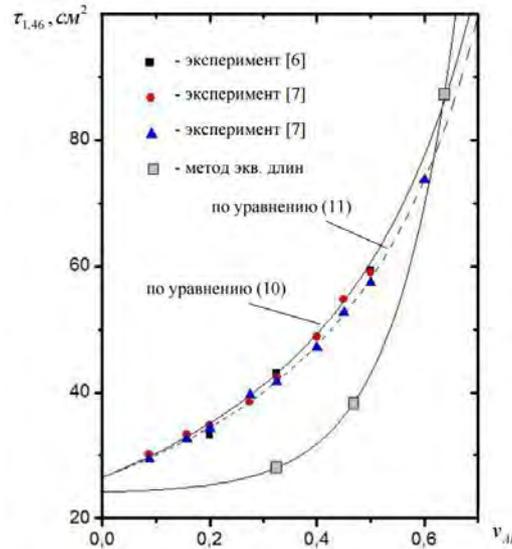


Рис. 1. Зависимости возраста нейтронов от доли алюминия в смеси

Аналогично проведем расчеты по  $Zr-H_2O$  системе. Полученная зависимость представлена на рисунке 2. В [8] приведены результаты экспериментов по определению возраста в данной смеси. В [4] эти данные были аппроксимированы зависимостью:

$$\tau_{1,01} = \frac{26,48 - 6,635 \cdot v_{Zr}}{1 - 0,9907 \cdot v_{Zr}} \quad (12)$$

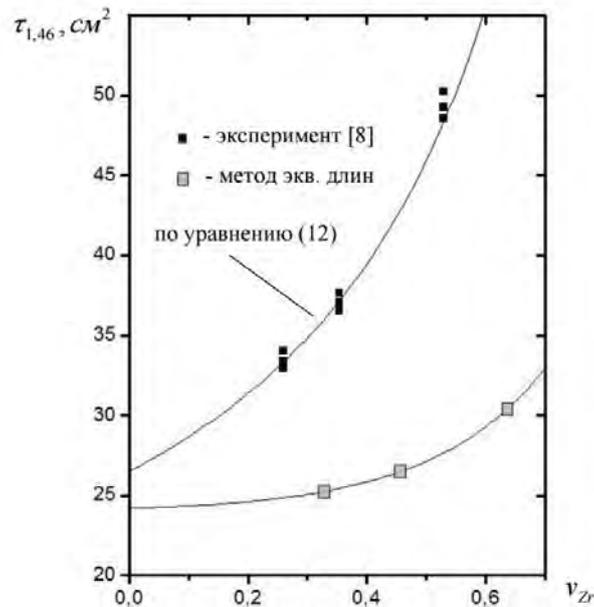


Рис. 2. Зависимости возраста нейтронов от доли циркония в смеси

Таблица 1. Усредненные сечения, вычисленные по формуле (9) при 20°C

Алюминий – вода	Цирконий – вода
$\rho_{Al} = 2,7 \text{ г/см}^3$ , $\rho_{H_2O}^{(Al)} = 1,0 \text{ г/см}^3$ $\sigma_s^{Al} = 1,5 \text{ барн}$ , $\sigma_s^{H_2O(Al)} = 42,7 \text{ барн}$	$\rho_{Zr} = 6,43 \text{ г/см}^3$ , $\rho_{H_2O}^{(Zr)} = 1,0 \text{ г/см}^3$ $\sigma_s^{Zr} = 9,0 \text{ барн}$ , $\sigma_s^{H_2O(Zr)} = 42,7 \text{ барн}$

Таблица 2. Результаты расчетов возраста нейтронов в различных системах

$\nu_i$	<i>Fe-H<sub>2</sub>O</i>	<i>Al-H<sub>2</sub>O</i>	<i>Zr-H<sub>2</sub>O</i>
		$\theta_{Fe} = 0,517$	$\theta_{Al} = 0,131$ , $\chi = 1,303$
	$\tau, \text{см}^2$ [2]	$\tau, \text{см}^2$	
0,31	31,17	25,82	24,11
0,47	37,34	27,84	24,66
0,64	46,6	31,18	25,73

Проведенная оценка метода эквивалентных длин пробега для определения возраста нейтронов в металловодных смесях показала отсутствие согласия с имеющимися данными. Метод разрабатывался для экспресс-оценки, поэтому принятые в нем допущения о том, что основной вклад в значение возраста дают лишь ядра водорода, а ядра металла и кислорода служат для распределения нейтронов в системе, а также пренебрежение неупругим рассеянием нейтронов, скорее всего и обусловили большие погрешности метода.

#### Список литературы:

1. Meghreblian R.V., Holmes D.K. Reactor analysis // OAK Ridge National Laboratory – 1960.
2. Paschall R.K. The Age of Fission Neutrons to Indium Resonance Energy in Iron-Water Mixtures – II. Theory // JI. Nucl. Energy. – Part A/B. – 1966. – Vol. 20. – P.25.
3. Alter H. The Age of Fission Neutrons to Indium Resonance Energy in Iron-Water Mixtures – II. Theory // JI. Nucl. Energy. – Part A/B. – 1966. – V. 20. – P. 37.
4. 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 международ. научно-практ. конференци. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006 – Т. 2.- С. 336-338.
5. 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.
6. Paschall R.K. The Age of Fission Neutrons to Indium Resonance Energy in Aluminum-Water Mixtures // Nucl. Sci. Engng. – 1966. – V. 26. – P. 73.
7. Марченко Л.В., Сергеев Ю.А. Расчет квадрата длины замедления для различных сред в 18- и 26-групповых P<sub>1</sub>-приближениях и их сравнение с экспериментальными данными // Бюллетень центра по ядерным данным. – М.: Атомиздат, 1969. – Вып. 6. – С. 319-390.
8. Paschal R.K. The Age of Fission Neutrons to Indium Resonance Energy in Zirconium-Water Mixtures – I. Experiment // nucl. Sci. Engng. – 1965. – V. 23. – P. 256.

#### Эффективность внедрения турбины на действующей котельной

*Асмоловский В.В., Абрамовских А.А.*

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск*

*E-mail: [vva8@tpu.ru](mailto:vva8@tpu.ru), E-mail: [aleksey82@tpu.ru](mailto:aleksey82@tpu.ru)*

Энергетическая отрасль Российской федерации находится в упадке, постройка новых объектов редкость, по сравнению с прошлым, полный износ энергетического оборудования, ведущий к огромным затратам на ремонтные работы, при этом энергетика в РФ плохо