

6. **Arzhannikov A.V., Shmakov V.M., Modestov D.G. et al.** Facility to study neutronic properties of a hybrid thorium reactor with a source of thermonuclear neutrons based on a magnetic trap. — Nucl. Engng Technol., 2020, v. 52, is. 11, p. 2460—2470.
7. **ENDF/B-VII.0**, Formats and Codes [Electronic resource]. National Nuclear Data Center. Upton, New York (USA): Brookhaven National Laboratory. Web site of IAEA. Access mode: in free access. URL: <https://www.nds.iaea.org/exfor/endf.htm> (date of the application 01.10.2020).
8. **Desai S., Rao M.** Drift of electrons and performance of BF_3 filled neutron proportional counters. — AIP Conf. Proc., 2017, v. 1832: Dae solid state physics symposium, Bhubaneswar, Odisha, India, 26—30 December 2016. Ed. S. Bhattacharya, S. Singh, A. Das, S. Basu, p. 060014.
9. **Pazirandeh A., Ghaseminejad S., Ghaseminejad M.** Effects of various spacer grid modeling on the neutronic parameters of the VVER-1000 reactor. — Ann. Nucl. Energy, 2011, v. 38, p. 1978—1986.
10. **Патент 2001130838**, Российская Федерация [Электронный ресурс]. Способ извлечения трифторида бора из газовых смесей / Изъюрова Н.С., Крупин А.Г., Кузьминых С.А. и др. Официальный сайт ФГБУ «Федеральный институт промышленной собственности». Режим доступа: в открытом доступе. URL: http://www1.fips.ru/fips_servl/fips_servlet (дата обращения 24.06.2020).

Поступила в Редакцию 18.12.20

УДК 621.039.542.34:536.2:666.3

РАЗРАБОТКА ИНЖЕНЕРНОЙ МОДЕЛИ СПЕКАНИЯ ТОПЛИВНЫХ ТАБЛЕТОК В МНОГОЗОННЫХ ПЕЧАХ

*Бутов В.Г., Солоненко В.А., Яцук А.А. (НИ ТГУ, г. Томск), Лысыков А.В.,
Мухеев Е.Н. (АО «ВНИИНМ», г. Москва), Тимченко С.Н. (НИ ТПУ, г. Томск)*
e-mail: bvg@niipmm.tsu.ru

Спекание топливных таблеток относится к заключительной стадии технологического процесса их получения. На этой стадии важную роль играют как физико-химические и технологические свойства исходного порошка, так и все предыдущие технологические операции. Спекание сопровождается уплотнением, рекристаллизацией и слиянием пор. Спеканию также могут сопутствовать химические и фазовые превращения, релаксация напряжений различного происхождения и др. Каждый из этих процессов оказывает влияние на конечные характеристики спеченных таблеток и их качество. Необходимость учитывать эти факторы при выборе оптимального режима спекания на практике приводит к большим временным и экономическим затратам.

Целью работы являлась разработка инженерной модели процесса спекания таблеток из диоксида урана. Данная модель рассматривает процесс тепломассообмена топливных таблеток при произвольном их расположении в лодочке для спекания в высокотемпературных печах. Модель основана на результатах работы [1],

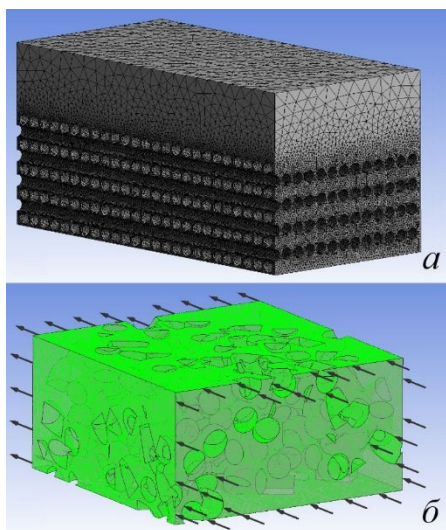
учитывает основные механизмы теплообмена внутри лодочки с различной укладкой топливных таблеток и теплофизические свойства входящих в процесс веществ, укладку таблеток, свойства которой задаются эффективными параметрами. Используя метод конечных элементов, рассчитывают температуру укладки, плотность определяют на основе главной кривой спекания [2, 3]. Данные о свойствах материала топливных таблеток взяты из работ [4—8].

В процессе спекания таблеток постепенное уменьшение их высоты и диаметра из-за усадки ведет к трансформации укладки от структурированной к произвольной. На рис. 1 показан полученный расчетом процесс оседания укладки таблеток.

Для изучения аэродинамических процессов, связанных с проникновением водорода внутрь укладки, и для определения исходных данных для инженерной модели была создана соответствующая математическая модель трехмерной укладки таблеток (рис. 2). По этой модели были определены проницаемость укладки и ее теплопроводность.



Р и с. 1. Трансформация укладки таблеток в процессе спекания



Р и с. 2. Модель для определения проницаемости укладки с упорядоченным (а) и неупорядоченным (б) расположением таблеток

Коэффициент проницаемости определяли, моделируя движение газа (водорода) сквозь укладку, по формуле

$$k = \frac{Q\mu L}{\Delta p F},$$

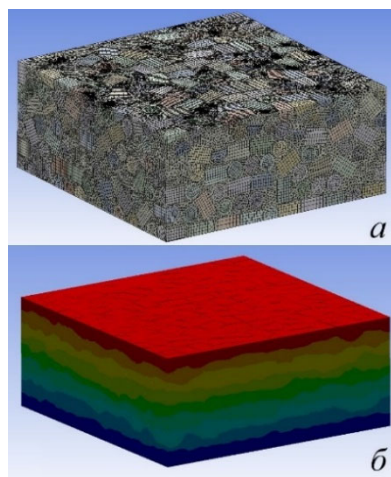
где Q — объемный расход, $\text{м}^3/\text{с}$ (задавался в качестве граничного условия на входе); μ — вязкость газа, $\text{Па}\cdot\text{с}$; L — длина пористого тела, м ; Δp — перепад давления на входе/выходе, Па (по результатам расчетов); F — общая площадь поперечного сечения, м^2 .

При этом не было необходимости учитывать наличие таблеток в укладке — моделировали только среду вокруг них. Проницаемость упорядоченной укладки для неспекенных образцов составила $(4\text{—}5)10^{-7} \text{ м}^2$ в начале цикла

и $(5\text{—}8)10^{-7} \text{ м}^2$ в конце процесса спекания, неупорядоченной — около $2\cdot 10^{-6} \text{ м}^2$.

Эффективную теплопроводность укладки таблеток определяли по известным коэффициентам теплопроводности материала таблеток и среды (водорода). Теплообмен в укладке осуществляется, в основном, за счет кондуктивной теплопередачи. Вклад радиационного теплообмена между таблетками и конвективной теплопередачи по водороду не учитывали из-за их пренебрежимо малых значений. В параметрических расчетах теплопроводность водорода и таблеток варьировали в пределах, характерных для условий спекания: теплопроводность таблеток — от 1 до 5 $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, водорода — от 0,18 до 1,1 $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$.

Для неупорядоченной геометрии укладки не представляется возможным определить аналитическую зависимость эффективной теплопроводности укладки от теплопроводности таблеток и среды. Поэтому определение эффективной теплопроводности осуществляли численным расчетом с использованием метода конечных элементов. Расчетная область представляла собой типичный элемент укладки в виде параллелепипеда с конечно-элементной сеткой (рис. 3).



Р и с. 3. Модель для определения эффективной теплопроводности укладки: конечно-элементная сетка (а) и распределение температуры при теплопередаче в вертикальном направлении (б)

На противоположных гранях задавали температурный перепад, проводили расчет теплового потока (см. рис. 3). Эффективный коэффициент теплопроводности находили по формуле

$$\lambda_{\text{эф}} = \frac{QH}{WL\Delta T},$$

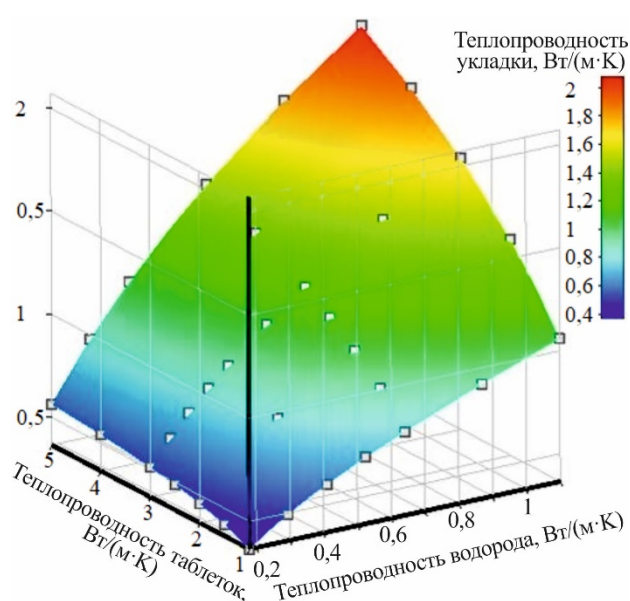
где Q — тепловой поток, Вт; H , W , L — высота, ширина, длина параллелепипеда соответственно, м; ΔT — перепад температуры, К.

Аналогично определяли эффективный коэффициент теплопроводности по другим направлениям.

Для определения способа представления эффективной теплопроводности укладки в инженерной модели проведена статистическая обработка результатов. Получено, что зависимость эффективной теплопроводности укладки от теплопроводности таблеток и водорода можно аппроксимировать с достаточной точностью полиномом второй степени. На рис. 4 приведены результаты расчетов эффективной теплопроводности укладки (■) и аппроксимирующая их квадратичная зависимость (закрашенная поверхность). Квадратичная зависимость для данного варианта геометрии имеет вид

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{эф}} = & -0,04019 + 1,254\lambda_{\text{H}_2} + \\ & + 0,1554\lambda_{\text{UO}_2} - 0,5449\lambda_{\text{H}_2}^2 + \\ & + 0,2189\lambda_{\text{H}_2} \cdot \lambda_{\text{UO}_2} - 0,02302\lambda_{\text{UO}_2}^2, \end{aligned}$$

где $\lambda_{\text{эф}}$, λ_{H_2} , λ_{UO_2} — эффективный коэффициент теплопроводности укладки, водорода и таблеток соответственно, Вт/(м·К).



Р и с. 4. Зависимость теплопроводности укладки от теплопроводности таблеток и окружающего их водорода

Аналогично построены зависимости для нескольких вариантов геометрии укладки, соответствующих возрастающей в процессе спекания плотности таблеток. Для промежуточных значений средней по укладке плотности таблеток эффективную теплопроводность определяли линейной интерполяцией.

Рассмотренная инженерная модель спекания в результате замены конечно-объемных расчетов в трехмерной постановке позволяет проводить вычисления быстро и почти без потери точности. Сравнение вариантов расчетов плотности спеченных таблеток с использованием полной (ПМ) и инженерной (ИМ) модели представлено в таблице.

Сравнение вариантов расчетов плотности таблеток с использованием различных моделей

Вариант расчета	Плотность таблеток, г/см ³				Ошибка, %
	минимальная		максимальная		
	ИМ	ПМ	ИМ	ПМ	
1	10,53	10,53	10,54	10,57	0,14
2	10,45	10,44	10,51	10,53	0,14
3	10,43	10,42	10,48	10,52	0,24
4	10,35	10,35	10,40	10,51	0,53
5	10,43	10,45	10,49	10,52	0,24
6	10,38	10,38	10,43	10,52	0,43
7	10,51	10,51	10,52	10,53	0,05
8	10,42	10,43	10,47	10,52	0,29
9	10,46	10,48	10,51	10,53	0,19

Заключение. Построенная инженерная модель позволяет достаточно точно провести расчет реального процесса спекания в промышленных печах и на его основе прогнозировать плотность таблетки при различном ее расположении в лодочке для спекания.

Статья написана по итогам конференции, проведенной при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 20-08-22056).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дягтерев Н.А., Бахтеев О.А., Лысков А.В. и др. Математическое моделирование процесса спекания топливных таблеток из диоксида урана в высокотемпературных печах. — Изв. вузов. Сер. Физика, 2014, т. 57, вып. 8/2, с. 110—117.
2. **Sintering of Advanced Materials: Fundamentals and Processes.** Ed. Zh. Fang. Cambridge: Woodhead Publ. Ltd., 2010. 483 p.
3. **Su H., Johnson D.** Master sintering curve: a practical approach to sintering. — J. Am. Ceram. Soc., 1996, v. 79, № 12, p. 3211—3217.
4. **Fink J.** Thermophysical properties of uranium dioxide. — J. Nucl. Mater., 2000, v. 279, p. 1—18.
5. **IAEA-TECDOC-1496.** Thermophysical Properties Database of Materials for Light Water Reactors and Heavy Water Reactors. Final Report of a Coordinated Research Project 1999—2005. Vienna: IAEA, 2006. 404 p.
6. **Beere W.** The sintering and morphology of interconnected porosity in UO_2 powder compacts. — J. Mater. Sci., 1973, v. 8, p. 1717—1721.
7. **Burton B., Reynolds G.** The sintering of grain boundary cavities in uranium dioxide. — J. Nucl. Mater., 1972, v. 45, p. 10—17.
8. **Жиганов А.Н., Гузеев В.В., Андреев Г.Г.** Технология диоксида урана для керамического ядерного топлива. Учебное пос. для вузов. Томск: STT, 2002. 326 с.

Поступила в Редакцию 18.12.20

УДК 621.387.143:621.039.54

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА СЛОЖНЫХ ОКСИДНЫХ КОМПОЗИЦИЙ
ДЛЯ ДИСПЕРСИОННОГО СМЕШАННОГО УРАН-ПЛУТОНИЕВОГО ТОПЛИВА

Шаманин И.В., Каренгин А.Г., Каренгин А.А., Новоселов И.Ю., Расторгуев В.И. (НИ ТПУ, г. Томск)
e-mail: karengin@tpu.ru

Применяемое на АЭС керамическое ядерное топливо из диоксида урана, обогащенного по урану-235, имеет низкую теплопроводность, короткий цикл использования, ограничивается природными запасами урана-235 [1]. Применение изотопов урана-238 и плутония-239 не требует дорогостоящего изотопного обогащения и позволит использовать накопленные запасы урана и плутония из отработавшего ядерного топлива. Однако такое топливо имеет существенный недостаток — низкую теплопроводность.

Одним из перспективных направлений развития ядерной энергетики России является использование дисперсионного смешанного уран-плутониевого топлива, которое содержит включения из делящихся материалов (диоксидов урана и плутония). Они равномерно распределены в матрице из оксидов металлов (магния, иттрия и др.), имеющих высокую теплопроводность и низкое поперечное сечение поглощения нейтронов [2, 3]. Традиционные методы изготовления сложных оксидных композиций для такого топлива многостадийны, продолжительны, не обеспечивают требуемый фазовый состав и равномерное

распределение фаз, характеризуются высокими энерго- и трудозатратами [3]. Для получения сложных оксидных композиций из диспергированных смешанных водных нитратных растворов наиболее перспективным является применение плазмы, имеющее следующие преимущества: одностадийность, высокая скорость, возможность активно влиять на размер и морфологию частиц, равномерное распределение фаз [4]. Однако плазменная переработка только водных нитратных растворов требует значительных энергозатрат (до 4 МВт·ч/т) и не обеспечивает в воздушной плазме требуемый фазовый состав получаемых сложных оксидных композиций. Существенно снизить энергозатраты до 0,1 МВт·ч/т и получить сложные оксидные композиции с высокими физико-химическими свойствами можно при переработке в воздушно-плазменном потоке оптимальных по составу диспергированных водно-органических нитратных растворов, включающих водные нитратные растворы и органический компонент (спирты, кетоны) [5—10].

Цель работы — установление закономерностей влияния состава водно-органических