

УДК 621.039.542.84

В. В. СОРОКИН

ОЦЕНКА МОЩНОСТИ УСТРОЙСТВА С ВРАЩАЮЩИМСЯ СЛОЕМ МИКРОТВЭЛЬНОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны НАН Беларуси

(Поступила в редакцию 20.08.2013)

Введение. Наиболее безопасным способом обращения с радиоактивными отходами является ядерное превращение излучающих изотопов, содержащихся в отходах, в стабильные ядра (трансмутация). Для эффективной трансмутации с использованием нейтронов требуются высокие плотности потока, спектр со значительной долей быстрых и резонансных нейтронов. Ряд сеансов облучения определенной длительности по времени, желателен, чередовать с переделами состава отходов [1–4]. Количество излучающих изотопов в отработанном топливе коммерческого реактора составляет порядка 1%, массы отдельных изотопов в загрузке – до нескольких десятков килограммов [3]. Плотность потока нейтронов в активных зонах и продолжительность кампании коммерческих реакторов неоптимальны для трансмутации, величина первого фактора мала, а второго велика. Актуально создание специализированного устройства для трансмутации. Подходящим вариантом могут быть реакторы с микротвэлами, непосредственно охлаждаемыми водой [5, 6].

Шаровой твэл (микротвэл) состоит из топливного ядра, покрытого защитной оболочкой. Оболочки разделяют топливо и теплоноситель и обеспечивают удержание продуктов деления ядер. Перспективный микротвэл диаметром 1,8 мм состоит из топливного зерна из двуокиси урана диаметром 1,5 мм и трехслойной оболочки толщиной 0,15 мм (пористый углерод, плотный углерод, карбид кремния). Малое тепловое сопротивление микротвэла создает предпосылки для достижения большой плотности мощности без опасного перегрева топлива [5]. Представляет интерес подвижная засыпка, с возможностью несложной перегрузки на ходу и быстрого рассыпания в гарантированно подкритическую структуру при аварии. Одной из реализаций является устойчивый плотный вращающийся слой микротвэлов в радиально-окружном потоке капельной жидкости внутри вихревой камеры [6–8].

Схема устройства и фотография слоя приведены на рис. 1, где представлены разрез и сектор слоя. Стенки устройства неподвижные. Вращающийся слой 1 размещен между боковой 2 и торцевыми стенками 3 и имеет четкую внутреннюю границу 4.

Жидкость поступает в камеру через направляющий аппарат 5, размещенный на боковой стенке, приобретая радиальную и окружную составляющие скорости. Далее, обтекая частицы, она проходит через слой, его внутреннюю границу 4 и покидает камеру через центральное от-

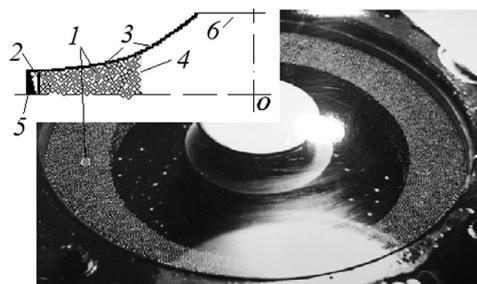


Рис. 1. Схема устройства и фотография слоя

верстие в торцевой крышке 6. Значение радиуса границы слоя может лишь незначительно превышать радиус центрального отверстия.

При пористости около 0,5 слой демонстрирует высокую устойчивость в широком диапазоне толщин: существует десятки часов без потерь частиц, нечувствительный к ориентации относительно вертикали и различным возмущениям (удары, вибрация, переменность расхода жидкости, внедрение предметов в слой), допускает догрузку или выгрузку частиц на ходу [6–9].

Теплоотдача микротвэлов. Анализ литературных источников показал, что непосредственно теплоотдача от микротвэлов в составе вращающегося толстого слоя внутри вихревой камеры к воде не определялась.

В [10] вращающийся слой в вихревой камере нагревался электрическими токами высокой частоты. Определялось изменение коэффициента гидравлического сопротивления частицы в зависимости от разности температур жидкости на входе и выходе из камеры.

В [11] высказывается мнение о высоких значениях коэффициента теплопередачи от шара к жидкости и ожидается, что с объема вращающегося слоя микротвэлов высотой 0,6 и диаметром 0,4 м возможно безопасно отвести до 1000 МВт тепловой энергии, что более 13 МВт/л.

Предложена модель взаимодействия жидкости и шара внутри вращающегося слоя или неподвижной засыпки. Шар обтекает струя жидкости, сформированная предыдущими рядами шаров. Частица со струей может рассматриваться как элементарная ячейка продуваемого слоя [7, 11, 12]. Значения параметров теплоотдачи слоя можно определить суммированием по соответствующему количеству ячеек.

Экспериментально в [10] определены теплоотдача от отдельного нагреваемого шара к струе и теплоотдача от калориметрического шара внутри кубической укладки к фильтрующейся жидкости, установлены обобщенные расчетные формулы. Последние удовлетворительно коррелируют с результатами большого количества исследований теплопередачи в засыпках. Это позволяет представлять теплоотдачу вращающихся слоев на базе соотношений для засыпок.

Для засыпок на базе фундаментальных принципов установлены однозначные связи между сопротивлением и теплоотдачей. Зная сопротивление вращающегося слоя, на основании этих связей можно рассчитать его теплоотдачу [13, 14].

В [15] проведено численное моделирование как центробежных, так и гравитационных псевдооживленных слоев. Получены адекватные картины течения фаз, решена задача теплопередачи при разовом ступенчатом увеличении температуры жидкости. Расчеты осуществлены на базе единой системы уравнений. При переходе к вращающимся слоям ускорение свободного падения менялось на центробежное ускорение. Известны другие методы расчета теплоотдачи частиц в статических и гравитационных псевдооживленных слоях [16–18].

В табл. 1 сведены значения чисел Нуссельта (Nu) теплоотдачи шара в составе вращающегося слоя, вычисленные по формулам из перечисленных работ. Параметры слоя рассчитаны по [9] для варианта: $2R = 300$ мм, одно центральное отверстие $2R_2 = 80$ мм; $n = 36$, $\delta = 1,8$ мм, $m = 0,07$; $h_0 = 30$ мм, $d = 2$ мм, плотности материала шара $\rho_s = 10$ г/см³ и жидкости $\rho_f = 1$ г/см³, высота слоя 80 мм, пористость $\varepsilon = 0,49$, давление в ресивере 0,6 МПа, $\mu = 0,17$, $p_2 = 160$ кПа, $\Omega = 91,6$ с⁻¹, $W_{щ} = 16,2$ м/с, $\Omega R = 13,7$ м/с, $W_2 = 6,41$ м/с, $U = 1,134$ м/с, где R – радиус камеры; радиус центрального отверстия R_2 ; n , δ – соответственно число щелей и их ширина; m – доля свободного сечения направляющего аппарата; h_0 – высота камеры; d – диаметр частицы; μ – коэффициент трения частиц о неподвижную стенку камеры; p_2 – давление за слоем; Ω – угловая скорость вращения слоя; $W_{щ}$ – скорость в щелях; W_2 – скорость свободной границы слоя; U – скорость фильтрации. Число Прандтля (Pr) положено равным 1, кинематическая вязкость жидкости $\nu = 10^{-6}$ м²/с.

Формулы табл. 1 имеют близкую структуру, устанавливающую пропорциональность коэффициента теплоотдачи шара числу Рейнольдса (Re) в степени от 0,6 до 1,0 и Pr в степени 1/3. Численные оценки величины коэффициента теплоотдачи при характерных для толстого вращающегося слоя параметрах также близки. За счет многочисленных аналогичных эмпирических и полуэмпирических зависимостей, рекомендованных для описания тепло- и массообмена частиц в подвижных плотных слоях [18], табл. 1 могла быть расширена. Поскольку характерные для толстого вращающегося слоя параметры радиальной скорости порядка 1 м/с и размера частицы порядка 1 мм варьируются незначительно, то в нашем случае все формулы дают примерно одинаковые результаты.

Для расчетов выбрана зависимость [17]

$$Nu = 2 + 1,1Re^{0,6}Pr^{1/3},$$

где $Re = Ud/\nu$, поскольку она представляется консервативной и устанавливает величину теплоотдачи на несколько более низком уровне, чем большинство формул табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Теплоотдача частицы во вращающемся слое

Nu	Объект	Формула	Источник
115	Засыпка	$Nu = 2 + 1,1Re^{0,6}Pr^{1/3}; Re = Ud/\nu$	[17]
86	Засыпка	$Nu = 0,39Re_e^{0,64}Pr^{1/3}; Re_e = Re/\varepsilon$	[16]
98	Засыпка	$Nu_e = 0,64Nu = 0,145(\zeta Re_2^3)^{0,25}Pr^{1/3}; \zeta = (\Delta p/H)(2d_e/\rho_f U_e^2); U_e = U/\varepsilon;$ $d_e = 2\varepsilon d/3(1 - \varepsilon); Re_2 = U_e d_e/\nu$	[14]
95	Засыпка	$Nu = \alpha d/\lambda_f; \alpha = 0,145\lambda_f(2WP/\nu^3)^{0,25}; WP = U\Delta p/\rho_f H$	[14]
159	Шар в кубической укладке	$Nu = 0,63Re_e^{0,655}$	[10]
119–170	Шар в струе	$Nu = 0,56C_1 Re^{0,74}; C_1 = 0,7–1,0$	[10]
97–153	Засыпка	$Nu_e = 4 + C_2(144Re_2^2 + 1,5Re_2^3)^{0,25}Pr^{1/3}; C_2 = 0,13–0,21$	[13]
138	Вращающийся псевдо-ожиженный слой	$Nu = C_3 Re Pr^{1/3}; C_3 = 0,043((\Omega^2 R d/U^2)(\rho_s - \rho_f)\tau^2/\rho_f)^{0,25}$	[15]*

* Формулы преобразованы для единообразия представления данных.

Оценим температуры при теплопередаче от слоя к теплоносителю (воде) для следующего варианта: шар диаметром 2 мм имеет равномерно тепловыделяющее ядро диаметром 1,5 мм с теплопроводностью 3 Вт/(м·К) (диоксид урана) и оболочку толщиной 0,25 мм с теплопроводностью 30 Вт/(м·К) (плотный пирографит и карбид кремния). Объемное энерговыделение в ядре равномерное. Характеристики воды при 20 °С: теплопроводность 0,6 Вт/(м·К), вязкость 10^{-6} м²/с, Pr = 7, плотность 1 г/см³, теплоемкость 4,2 кВт/(кг·К), $\varepsilon = 0,5$. Радиальная скорость воды 1 м/с, тепловой поток на поверхности шара 1 МВт/м². Используя известные формулы [19, 20] и значение Nu = 202, вычисленное по приведенной выше формуле, относительно температуры теплоносителя получаем температуры: стенка шара +17 °С, граница топливного ядра +28 °С, центр ядра +251 °С. Подогрев жидкости после прохода через слой составит 25 °С. Мощность 1 л слоя 1,5 МВт (для сравнения мощность 1 л активной зоны ВВЭР-1000 0,11 МВт). Соотношение данных мощностей примерно соответствует соотношению величин нейтронных потоков [20], следовательно, использование вращающегося слоя микротвэлов действительно позволяет достигать повышенных уровней нейтронного потока.

При мощности теплового потока на поверхности шара 1 МВт/м² температурные параметры топлива оказываются приемлемыми. В силу линейности задачи параметры легко пересчитать на любой другой поток FL (МВт/м²), умножив на величину FL. Ограничения на значение FL: по условиям надежности топлива температура в центре ядра не должна превышать 1500 °С [5]; для исключения кипения температура поверхности шара не должна быть выше температуры насыщения, соответствующей давлению в камере [21].

Учет устойчивости. Подогрев теплоносителя сопровождается снижением его плотности и ростом сопротивления засыпки движению жидкости. Данные расчета изменения параметров слоя при равномерном по течению уменьшении плотности жидкости до уровней на выходе 90 и 80% от начальной плотности приведены в табл. 2. Параметр var представляет отношение веса шара на свободной границе слоя к таковому без подогрева теплоносителя. Из данных табл. 2 следует, что подогрев приводит к ускорению вращения слоя, снижению расхода и запаса устойчивости (var < 1), остальные параметры практически не изменяются.

Т а б л и ц а 2. Влияние подогрева теплоносителя

Условие	Ω, c^{-1}	$U^*, m/c$	P, kPa	p_2, kPa	$W_1, m/c$	var
Без изменения плотности теплоносителя	91,8	1,13	105	160	16,2	1
Уменьшение плотности на выходе из слоя 10%	93,1	1,24	108	155	16,1	0,99
Уменьшение плотности на выходе из слоя 20%	93,5	1,38	109	160	15,7	0,91

* Величина на свободной границе слоя.

С увеличением размера камеры устойчивость шара на свободной поверхности уменьшается. Данный эффект иллюстрируется рис. 2. Камеры ряда радиусов сравниваются с устройством радиусом 150 мм. На графике безразмерный вес частицы на свободной границе $\bar{F} = (\text{вес в камере } R) / (\text{вес в камере } R_{150})$ приведен как функция безразмерного радиуса $\bar{R} = R/R_{150}$. Рассмотрены камеры с радиусами 75, 200, 300 и 400 мм. Все размеры, кроме ширины щелей и диаметра частиц, варьируются пропорционально радиусу. Снижение устойчивости связано с уменьшением центробежного веса частиц с ростом радиуса слоя, что накладывает ограничения на размер устройств и массу засыпки частиц. Если в качестве предельного радиуса камеры выбрать 400 мм, то объем засыпки окажется не более 42,8 л, а масса шаров – 214 кг.

Пример. Для камеры радиусом 150 мм при давлении 5,5 МПа, температуре воды на входе 180 °С и подогреве 50 °С возможно снять тепловую мощность 5 МВт/л. Тепловая мощность устройства составит $2,25 \text{ л} \times 5 \text{ МВт/л} = 11,2 \text{ МВт}$. Слой сохранит устойчивость, кипения теплоносителя (воды) не ожидается. Для камеры радиусом 300 мм при тех же условиях и перегреве тепловая мощность будет 2,5 МВт/л; мощность устройства – 50 МВт. При большем абсолютном давлении мощность можно увеличивать и далее.

Заключение. Реакторы с микровзлами в форме устойчивого плотного вращающегося слоя, непосредственно охлаждаемого водой, перспективны для использования при трансмутации радиоактивных отходов по тепловым параметрам. Теплоотдачу вращающегося слоя шаров предложено рассчитывать по формуле для неподвижной засыпки. Оценка мощности устройства с вращающимся слоем, продуваемым водой под давлением, показывает, что достигнута величина порядка 1–5 МВт/л. Данное значение зависит от абсолютного давления и размера устройства. Условие отсутствия кипения устанавливает наиболее значительные ограничения на мощность, усиливающиеся с ростом размера устройства.

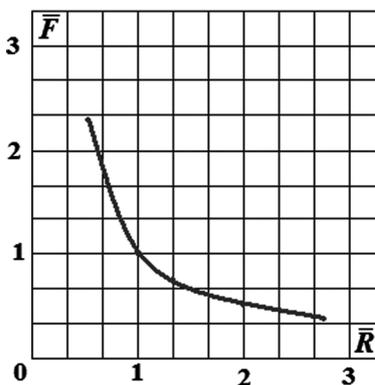


Рис. 2. Зависимость веса частицы на свободной границе от радиуса камеры

Литература

1. Артисюк В. В. Развитие физико-технических основ трансмутации долгоживущих радиоактивных отходов ядерных реакторов: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.14.03. Обнинск, 2002.
2. Gudowski W. // Nuclear Physics A. 2005. Vol.752. P. 623–632.
3. Status of minor actinide fuel development. Vienna: International Atomic. Energy Agency, 2009. 81 p. (IAEA nuclear energy series no. NF-T-4.6). STI/PUB/1415.
4. Слабоспицкий Р. П. // Вісник Харківського національного університету. Сер. фізична «Ядра, частинки, поля». 2011. Т. 946, вип. 1. С. 43–49.
5. Сорокин В. В. Гидравлика и теплообмен шаровых засыпок в условиях активной зоны водо-водяных ядерных реакторов с микровзлами. Мн., 2010.
6. Сорокин В. В. // IV Конгресс физиков Беларуси. Мн., 2013. С. 35–36.
7. Гольдиштик М. А. Процессы переноса в зернистом слое. Новосибирск, 2005.
8. Сорокин В. В., Сорокин В. Н. Вихревая камера. Пат. РБ 10594. 2008.
9. Сорокин В. В. // Докл. НАН Беларуси. 2009. Т.53, № 5. С. 100–103.
10. Лебедев А. В. Влияние геометрии зернистого слоя на его гидродинамические и тепловые характеристики: Дис. ... канд. техн. наук: 01.04.14. Новосибирск, 1988.
11. Гольдиштик М. А. Вихревые процессы и явления. Новосибирск, 1989. (Препринт/ ИТФ СО АН СССР: 210).
12. Гольдиштик М. А. Процессы переноса в зернистом слое. Новосибирск, 1984.
13. Кокорев Л. С. и др. // ТВТ. 1987. Т. 25, № 1. С. 92–97.
14. Атаманов В. В., Харитонов В. В., Якутин Н. В. // Теплофиз. высоких темпер. 1996. Т. 34, № 4. С. 590–596.
15. De Broqueville A., De Wilde J. J. // Chemical Engineering Science. 2009. Vol. 64. P. 1232–1248.
16. Аэров, М. Э., Тодес О. М. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим слоем. Л., 1968.
17. Kaviany M. Principles of heat transfer in porous media. N. Y.: Springer–Verlag, 1991.
18. Кутепов А. М., Латкин А. С. Вихревые процессы для модификации дисперсных систем. М., 1999.

19. Теория тепломассообмена / Под ред. А. И. Леонтьева. М., 1979.
20. Деметьев Б. А. Ядерные энергетические реакторы. М., 1984.
21. Руководящий документ по стандартизации министерства тяжелого, энергетического и транспортного машиностроения СССР. Тепловой и гидравлический расчет теплообменного оборудования АЭС. Методические указания: РД 24.035.05–89. Введ. 01.07.90. Л., 1991.

V. V. SOROKIN

POWER ASSESSMENT FOR A UNIT WITH ROTATING NUCLEAR MICROFUEL BED

Summary

A formula for porous media heat transfer is suggested for the one for rotation particle bed. The heat power of order of 1–5 MWt/l is assessed for microfuel particle bed flowed through by water. It depends on absolute pressure and the device dimension.