

$$V = A_s Q_\gamma / 2C_2 (T_{пл} - T_{ср}).$$

Для достижения скорости погружения устройства несколько километров в год в рассматриваемых окружающих материалах необходима поверхностная активность ^{60}Co около 10^{17} Бк/м². Она может быть получена, в частности, при реализации устройства в виде пространственной структуры с шаровыми тепловыделяющими элементами радиусом около 2 см. При таком размере тепловыделяющих элементов доля поглощения энергии γ -излучения ^{60}Co составляет менее 30%.

Оценки выполнены для объемной теплоемкости $C_1 = 3,12 \cdot 10^6$ Дж/(м³·К), $C_2 = 2,86 \cdot 10^6$ Дж/(м³·К), коэффициентов теплопроводности $\lambda_1 = 1,6$ Вт/(м·К) и $\lambda_2 = 2,06$ Вт/(м·К), температуры плавления гранита $T_{пл} = 950$ °С [11, 12].

Выводы. В настоящей работе получено, что для устройства погружения в гранит и соль со скоростью 1 км/год при реализации прямого нагрева γ -излучением необходима средняя поверхностная активность ^{60}Co в нем около 10^{17} Бк/м². Вследствие поглощения большей части энергии в окружающей породе и малой толщины устройства погружения следует ожидать уменьшения температурных градиентов и максимальной температуры в элементах устройства по сравнению с передачей энергии окружающей породе теплопроводностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Gibb F.** High-temperature, very deep, geological disposal: a safer alternative for high-level radioactive waste? — *Waste Manag.*, 1999, v. 19, № 3, p. 207—211.
2. **Gibb F.** A new scheme for the very deep geological disposal of high-level radioactive waste. — *J. Geological Soc.*, 2000, v. 157, № 1, p. 27—36.
3. **Кашеев В.А., Никифоров А.С., Полуэктов П.П., Поляков А.С.** К теории самозахоронения высокоактивных отходов. — *Атомная энергия*, 1992, т. 73, вып. 3, с. 215—221.
4. **Logan S.** Deep self-burial of radioactive wastes by rock-melting capsules. — *Nucl. Techn.*, 1974, v. 21, № 2, p. 111—124.
5. **Арутюнян Р.В., Большов Л.А., Кондратенко П.С. и др.** Способ захоронения радиоактивных отходов и тепловыделяющая капсула для его осуществления. Пат. РФ № 2510540 С1 от 27.03.14. — Бюл. «Изобретения. Полезные модели», 2014, № 9.
6. **Арутюнян Р.В.** Устройство для погружения в расплавляемых геологических породах. Пат. РФ № 2535199 С1 от 10.12.14. — Там же, 2014, № 34.
7. **Арутюнян Р.В.** Устройство для погружения в расплавляемых геологических породах. Пат. РФ № 2577517 С1 от 20.03.16. — Там же, 2016, № 8.
8. **Машкович В.П., Кудрявцева А.В.** Защита от ионизирующих излучений. Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1999. 494 с.
9. **Арутюнян Р.В., Большов Л.А., Витюков В.В. и др.** Теоретический анализ и численное моделирование переноса тепла и миграции топлива в подстилающих грунтах и конструкциях АЭС при аварийных выбросах активной зоны: Препринт ИАЭ-4862/3. М., ЦНИИАтоминформ, 1989.
10. **Арутюнян Р.В.** Теплофизические модели воздействия умеренных потоков энергии на материалы. Автореф. дис. на соискание ученой степени доктора физ.-мат. наук. М., ОИВТ РАН, 1997.
11. **Баяк Е.И., Томашевская И.С., Добрынин В.М.** Физические свойства минералов и горных пород при высоких термодинамических параметрах. Справочник: М.: Недра, 1988. 255 с.
12. **Eppelbaum L., Kutasov I., Pilchin A.** Applied Geothermics. Berlin: Springer, 2014. 751 p.

Поступила в Редакцию 24.03.16

УДК 621.039.543.4

ВЫБОР МЕЛКОЙ НАСАДКИ ДЛЯ РЕКТИФИКАЦИИ ГЕКСАФТОРИДА УРАНА

Ежов В.К. (НИЦ «Курчатовский ин-т», г. Москва)

При создании оборудования или технологического процесса за критерий оптимизации чаще всего принимают минимальные стоимость аппаратуры и энергопотребления. Для проведения массообменных процессов распространено применение насадочных колонн. Они конструктивно просты и дешевы в изготовлении. В этом случае выбор насадки приобретает особое зна-

чение. Критерии, которыми руководствуются при выборе насадки, различные. Так, предлагается простой способ сравнения насадок по двум важнейшим характеристикам: кинетической и гидродинамической [1]. Согласно этому методу в качестве обобщенного показателя вводится понятие эффективной пропускной способности единицы объема насадки, эквивалентной одной

единице переноса. Этот параметр вытекает из расчета объема массообменной колонны

$$V = HS = (\text{БЕП } NL)/0,8L_{\text{уд}}^* = LN/0,8\Phi = LN\Phi; (1)$$

$$H = \text{БЕП } N; \Phi = L_{\text{уд}}^*/\text{БЕП},$$

где V — объем, м^3 ; H, S — высота, м , и поперечное сечение колонны, м^2 , соответственно; БЕП — высота единицы переноса, м ; N — число единиц переноса; L — поток жидкости, кг/ч ; $L_{\text{уд}}^*$ — предельная удельная нагрузка по жидкости, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$; Φ — эффективная пропускная способность единицы объема насадки, эквивалентная одной единице переноса, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$.

Высота единицы переноса определяет эффективность разделения, предельная удельная нагрузка — производительность колонны и энергетические затраты на перемещение газа через аппарат. Оба эти параметра определяют размер оборудования, и таким образом учитывается, хотя и частично (без стоимости насадки), капитальная составляющая.

Целью работы являлась классификация по предлагаемому методу мелких насадок, которые могут применяться для ректификации гексафторидов металлов.

При разделении некоторых изотопов, а также выделении летучих фторидов — продуктов деления урана (технеция, теллура, рутения и др.) из гексафторида урана в сублиматном производстве и во фторидно-дистилляционном методе переработки облученного ядерного топлива требуется высокая эффективность сепарации при небольшой производительности. Этому требованию в наибольшей степени отвечают насадочные колонны, заполненные нерегулярной мелкой насадкой, поскольку с уменьшением размера насадки увеличивается эффективность разделения, хотя при этом снижается удельная производительность оборудования и увеличивается гидравлическое сопротивление [2].

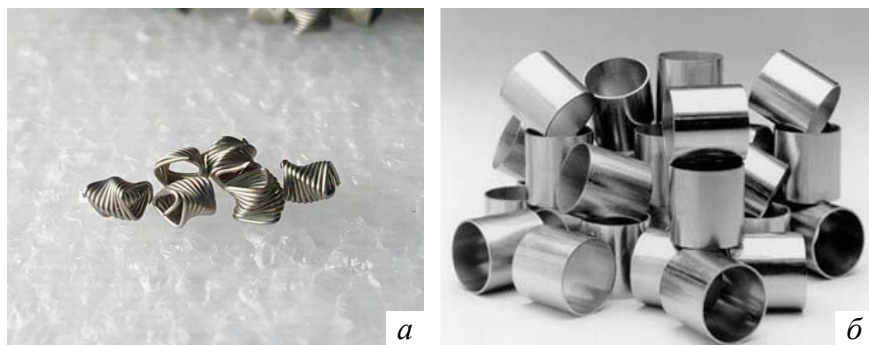
Для расчета эффективной пропускной способности единицы объема насадки, эквивалентной одной единице переноса, как следует из уравнения (1), необходимы сведения о предельной скорости пара в колонне и эффективности разделения смеси. Результаты исследования эффективности ректификации смесей гексафторида урана в колонне, заполненной мелкой насадкой, приведены в работе [3]. Анализ показал, что систематических исследований предельной скорости пара в насадочных ректификационных колоннах для высших фторидов металлов V и VI групп не проводили. Более того, даже обработка имеющихся данных затруднена из-за отсутствия характеристик применявшихся насадок и указания условий, при которых была достигнута предельная скорость пара в колонне [4—7].

В опытах исследовали никелевые мелкие насадки трех типов: спиральная, спирально-призматическая и кольцевая (кольца Рашига). Для простоты сопоставления элементы насадок имели одинаковый линейный размер: внешний диаметр и высота по 3 мм, толщина проволоки, из которой изготавливали спиральную и спирально-призматическую насадки, и толщина стенки кольцевой насадки 0,5 мм (табл. 1, рис. 1).

Удельная поверхность насадки представляет суммарную геометрическую поверхность всех насадочных тел в единице объема аппарата [8]. Чем больше удельная поверхность насадки, тем выше ее эффективность, но ниже удельная производительность аппарата и больше гидравлическое сопротивление. Удельную поверхность определяли арифметически по геометрическим параметрам и среднестатистическому числу элементов насадки в единице объема, полученным экспериментально. Под свободным объемом понимают суммарный объем пустот между насадочными телами и внутри их в единице объема. Чем больше свободный объем, тем выше ее производительность и меньше гидрав-

Т а б л и ц а 1. Характеристики нерегулярных мелких насадок, применявшихся в экспериментах

Насадка	Материал насадки	Удельная поверхность, $\text{м}^2/\text{м}^3$	Свободный объем, $\text{м}^3/\text{м}^3$	Эквивалентный диаметр, мм
Спирально-призматическая	Никелевая проволока	2640	0,75	1,27
		2640 [7]	0,85 [7]	
Спиральная	То же	2400	0,82	1,37
Кольцевая (кольца Рашига)	Никелевая трубка	1470	0,66	1,79
		1470 [7]	0,66 [7]	



Р и с. 1. Насадки, применявшиеся в экспериментах: *а* — спирально-призматическая; *б* — кольцевая

лическое сопротивление, однако при этом снижается эффективность работы насадки. Свободный объем находили заполнением известного объема насадки водой. Отношение объема воды к объему, заполненному насадкой, и есть свободный объем.

Для гидравлической характеристики насадки обычно используют эквивалентный диаметр, который определяют по соотношению [9]

$$d_s = 4V_c/a,$$

где V_c — свободный объем, $\text{м}^3/\text{м}^3$; a — удельная поверхность, $\text{м}^2/\text{м}^3$.

Эксперименты проводили на установке, основным узлом которой являлась колонна с насадочной частью в виде никелевой трубы внутренним диаметром 32 мм [3]. Насадку насыпали на высоту 100 мм на дырчатое ложное днище, свободное сечение которого составляло около 90%. Температуру измеряли в парах кипящей жидкости куба, в пяти точках, равномерно расположенных по высоте насадочной части колонки, и в нижней части дефлегматора хромель-копелевыми термодарами. Перепад давления измеряли манометром дифференциального типа. В опытах дефлегматор охлаждали водой, пропускаемой через змеевик из никелевой трубки, которая расположена внутри него. Расход и температуру воды на входе и выходе из дефлегматора измеряли хромель-копелевыми термодарами и датчиком расхода. Образующаяся в дефлегматоре жидкость стекала по конической капельнице в центр верхней поверхности насадки. Расходом охлаждающей воды, ее начальной температурой и мощностью нагрева кубовой жидкости в колонне устанавливали необходимые давление и гидродинамический режим. Опыты проводили при полном возврате флегмы

(безотборный режим). Предельную скорость пара устанавливали по началу резкого увеличения перепада давления на насадке. Скорость пара в колонне рассчитывали по тепловому балансу воды, охлаждающей дефлегматор.

Пределы изменения параметров ректификации и физических констант ректифицируемых веществ были следующими: давление 0,2—0,5 МПа, температура

37—107,8 °С, вязкость жидкости $(0,45—0,679)10^{-3}$ Па·с, плотность жидкости 2248—3580 $\text{кг}/\text{м}^3$, плотность пара 14,8—55,4 $\text{кг}/\text{м}^3$.

Обработку предельной скорости пара, приведенной в табл. 2, проводили по уравнению Бейна—Хоугена [9]

$$\lg \left[\frac{a(W_0)^2}{gV_c^3} \frac{\gamma_n}{\gamma_{ж}} \mu_{ж}^{0,16} \right] = b - d(\gamma_n/\gamma_{ж})^{1/8} (L/G)^{1/4}, \quad (2)$$

где a — удельная поверхность насадки, $\text{м}^2/\text{м}^3$; W_0 — предельная линейная скорость пара в полном сечении колонны, $\text{м}/\text{с}$; γ_n , $\gamma_{ж}$ — плотность пара и жидкости соответственно, $\text{кг}/\text{м}^3$; μ — вязкость жидкости, Па·с; L , G — поток жидкости и пара соответственно, $\text{кг}/\text{ч}$.

Поскольку опыты проводили в безотборном режиме, т.е. $L = G$, уравнение Бейна—Хоугена упрощали удалением множителя $(L/G)^{1/4}$ в уравнении (2).

Как видно на рис. 2, в выбранных координатах экспериментальные точки укладываются на прямую линию с коэффициентами в уравнении Бейна—Хоугена: $d = 1,75 \pm 0,01$, $b = 0,380 \pm 0,005$. Полученный в экспериментах коэффициент d совпадает с приводимым в работах [9—11], коэффициент b — с рекомендуемым в статье [12].

Для ориентировочных расчетов рекомендуется более простое эмпирическое уравнение, выведенное обобщением опытных данных [13]:

$$L_{уд}^* 10^{-3} = c + k(\gamma_n \gamma_{ж} d_s)^{0,5}, \quad (3)$$

где $L_{уд}^*$ — предельная удельная массовая скорость жидкости в колонне, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; c , k — экспериментальные коэффициенты; d_s — эквивалентный диаметр насадки, м.

Таблица 2. Предельная скорость пара гексафторидов металлов в насадочной ректификационной колонне с мелкими никелевыми насадками размером 3×3×0,5 мм

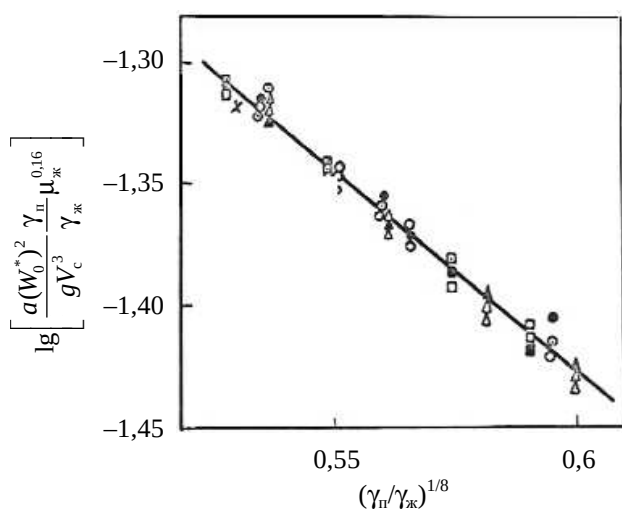
Вещество	Давление, МПа	Температура, °С	Предельная скорость пара, 10 ⁻² кг/(м ² ·ч)		
			Спиральная насадка	Спирально-призматическая насадка	Кольцевая насадка
UF ₆	0,2	73,5	202	205	188
	0,25	81,2	221	222	203
	0,3	87,7	232	235	214
	0,4	98,8	268	272	249
	0,5	107,8	292	281	252
WF ₆	0,2	55	177	180	164
	0,3	68,9	200	201	185
	0,4	79,5	215	217	198
	0,5	88	226	230	219
MoF ₆	0,2	37	123	124	114
	0,3	50	141	142	130
	0,4	60	151,5	153	140,5
	0,5	68	157	16 150	14 800

На рис. 3 видно, что в координатах $L_{уд}^* - (\gamma_{п}\gamma_{ж}d_3)^{0,5}$ опытные точки удовлетворительно группируются вокруг двух прямых, одна из которых соответствует экспериментальным данным для спиральной и спирально-призматической насадок с коэффициентами уравнения (3) $c = 3,7 \pm 0,4$, $k = 1,56 \pm 0,56$. Коэффициенты уравнения другой прямой, соответствующей экспериментальным данным для кольцевой насадки, составили $c = -0,85 \pm 0,5$, $k = 1,56 \pm 0$.

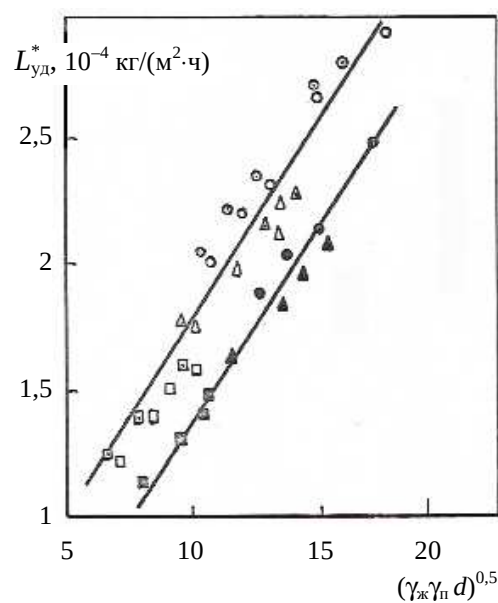
С использованием полученных данных была рассчитана эффективная пропускная способность единицы объема насадки, эквивалентная одной единице переноса. Из табл. 3 следует, что кольцевая насадка значительно уступает спи-

ральной и спирально-призматической по эффективной пропускной способности единицы объема. При повышении давления (температуры) эта разница немного сглаживается, но продолжает оставаться существенной. В то же время спиральная и спирально-призматическая насадки отличаются одна от другой в меньшей степени, причем предпочтение следует отдать спирально-призматической насадке по всем параметрам, приводимым в табл. 3.

Такой вывод совпадает с экспериментальными исследованиями [12, 13], что указывает на



Р и с. 2. Обработка экспериментальной предельной скорости пара по уравнению Бейна—Хоугена при ректификации смесей гексафторида урана; точки разной формы относятся к разным сериям опытов; х — [4]



Р и с. 3. Обработка экспериментальной предельной скорости по уравнению (3) при ректификации бинарных смесей гексафторида урана с гексафторидами вольфрама и молибдена с помощью спиральной и спирально-призматической (светлые символы) и кольцевой насадки (темные символы)

Т а б л и ц а 3. Кинетические и гидродинамические характеристики мелких насадок

Насадка	Ректифицируемый раствор	Давление, МПа	Эффективная пропускная способность единицы объема насадки на единицу переноса, 10^{-2} кг/(м ³ ·ч)	Гидравлическое сопротивление на единицу переноса, Па
Кольцевая	UF ₆ —WF ₆	0,2	1062	147
Спиральная	UF ₆ —MoF ₆ UF ₆ —WF ₆	0,25	1253	
		0,35	1510	
		0,25	1666	
		0,2	4489	
		0,25	4989	
		0,3	5471	
Спирально-призматическая	UF ₆ —MoF ₆ UF ₆ —WF ₆	0,35	6015	103
		0,25	5909	
		0,2	6550	
		0,25	7279	
		0,35	8669	
		0,25	8441	
		0,25	8441	

применимость рассматриваемого способа для выбора насадок при ректификации гексафторидов металлов и их смесей. Однако следует заметить, что выявленные преимущества спирально-призматической насадки в сравнении со спиральной будут особенно заметны в лабораторной практике или при сепарации изотопов и трудноразделяемых смесей. Скорее всего, при очистке небольшого количества гексафторида урана от примесей летучих фторидов применение спирально-призматической и спиральной насадок допустимо в равной степени, хотя и первой из них предпочтительнее.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Розен А.М. Теория разделения изотопов в колоннах. М.: Атомиздат, 1960.
2. Андреев Б.М., Зельвенский Я.Д., Котальников С.Г. Тяжелые изотопы водорода в ядерной энергетике. М.: Энергоатомиздат, 1987.
3. Ежов В.К. Распределение диффузионного сопротивления массопередаче между жидкой и паровой фазой при ректификации смесей гексафторида урана. — Атомная энергия, 2015, т. 118, вып. 4, с. 210—215.
4. McGill R. A Glass Still for the Evaluation of Column Packing with Uranium Hexafluoride. USAEC-Rep. AECD-3713, 1951.
5. Ivins A. The Distillation of Uranium Hexafluoride and Bromine Pentafluoride in 0,5-Inch Diameter Packed Column. USAEC-Rep. ANL-6362, 1962.
6. Long G. Uranium Hexafluoride Distillation Correlation for Engineering Design. USAEC-Rep. ORNL-1738, 1954.
7. Ниссельсон Л.А., Титов А.А. Аппараты и процессы ректификационной металлургии. М.: Изд-во Центра научн.-исследоват. информации и технико-экономич. исследований цветной металлургии, 1970.
8. Скобко А.И., Молоканов Ю.К., Владимиров А.И., Щелкунов В.А. Процессы и аппараты нефтегазопереработки и нефтехимии. 3-е изд. М.: Недра, 2000.
9. Кафаров В.В. Основы массопередачи. М.: Высшая школа, 1979.
10. Жаворонков Н.М., Лотхов В.А., Малюсов В.А. Исследование эффективности лабораторной ректификационной колонны со спирально-призматической насадкой. — Хим. пром-сть, 1966, № 10, с. 777—781.
11. Зельвенский Я.Д., Ройтман А.А., Тимашев А.П. Некоторые вопросы оптимизации работы ректификационных насадочных колонн. — Там же, 1973, № 7, с. 538—541.
12. Зельвенский Я.Д. Некоторые вопросы гидродинамики колонн с мелкой насадкой. — Теоретич. основы хим. технологии, 1967, т. 1, вып. 6, с. 846—851.
13. Зельвенский Я.Д. Определение гидравлических характеристик и ректифицирующей способности мелкой насадки для маломасштабной колонны. — Хим. пром-сть, 1970, № 8, с. 610—612.

Поступила в Редакцию 19.12.2016