

Р и с. 6. Зависимость средней энергии  $\bar{E}_\theta$  от  $\theta$  и  $E_0$  (светлые точки — для свинца; темные — для воды):  
 — расчет по формуле (2); — — — расчет по формуле (3);  
 ◊ —  $\theta = 20 \div 30^\circ$ ; ○, ● —  $\theta = 0 \div 10^\circ$ ; ◊, ▲ —  $\theta = 60-70^\circ$ ;  
 □, ■ —  $\theta = 40 \div 50^\circ$ .

где  $\bar{E}_\theta$ ,  $E_0$  выражены в мегаэлектронвольтах;  $\theta$  — в градусах. Обе формулы можно применять в диапазоне  $1 \text{ Мэв} \leq E_0 \leq 10 \text{ Мэв}$  и  $5^\circ \leq \theta \leq 70^\circ$ . Для углов  $90^\circ \geq \theta \geq 70^\circ$  среднее значение  $\bar{E}_\theta$  то же, что и для  $\theta = 70^\circ$ .

Хотя формулы (2), (3) получены на основании расчетных данных по прохождению  $\gamma$ -квантов через свинец и воду, можно надеяться, что их использование для нахождения  $\bar{E}_\theta$  в других веществах не приведет к большой ошибке. При этом формулу (2) следует применять для нахождения средней энергии в тяжелых средах, а формулу (3) — для определения  $\bar{E}_\theta$  в легких средах и в средах со средними атомными номерами.

### Исследование влияния давления на процесс разделения изотопов В<sup>11</sup> и В<sup>10</sup> дистилляцией ВF<sub>3</sub>

И. Б. АМИРХАНОВА, П. Я. АСАТИАНИ, А. В. БОРИСОВ, И. Г. ГВЕРДЦИТЕЛИ, А. Т. КАРАМЯН, Г. Л. КАКУЛИЯ, Ю. В. НИКОЛАЕВ

Дистилляция трехфтористого бора — один из эффективных процессов разделения изотопов бора. Для расчета и выбора оптимальных условий проведения процесса необходимы дан-

Сравнение значений  $\bar{E}_\theta$  (Мэв), измеренных экспериментально и рассчитанных по формулам (2), (3)

Таблица 2

$\theta$ , градусы	Свинец		Железо	
	эксперимент [3]	расчет по (2)	эксперимент [4]	расчет по (3)
10	1,07	0,97	0,95	0,87
20	0,93	0,97	0,82	0,87
45	0,60	0,64	0,56	0,58
60	0,50	0,45	0,38	0,40

В табл. 2 для сравнения в качестве примера приведены значения  $\bar{E}_\theta$ , полученные из экспериментальных спектрально-угловых распределений для  $E_0 = 1,25 \text{ Мэв}$  в свинце ( $\mu_{0x} = 5,9$ ) [3] и железе ( $\mu_{0x} = 3,9$ ) [4], и значения, вычисленные по формулам (2) и (3). Видно, что в пределах 5—10% расчетные данные совпадают с экспериментальными. Примерно в таких же пределах (8—10%) отличаются средние значения  $\bar{E}_\theta$  в воде для  $E_0 = 1,25 \text{ Мэв}$ , рассчитанные по формуле (3), от значений  $\bar{E}_\theta$ , подсчитанных по экспериментальным энергетическим распределениям [4].

Таким образом, полученные формулы позволяют рассчитывать с точностью 5—10% среднее значение  $\bar{E}_\theta$  в довольно большом диапазоне энергий, углов и для различных материалов. Используя значения  $\bar{E}_\theta$  и угловые распределения интенсивности рассеянных  $\gamma$ -квантов, можно рассчитать защиту сложной конфигурации.

Поступила в Редакцию 3/1 1967 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Л. М. Ширкин. «Атомная энергия», 19, 394 (1965).
2. Ю. А. Казанский и др. Физические исследования защиты реакторов. М., Атомиздат, 1966.
3. Ю. А. Казанский, С. П. Белов. Приложение № 1 к журналу «Атомная энергия». М., Атомиздат, 1958, стр. 123.
4. Ю. А. Казанский. «Атомная энергия», 8, 432 (1960).

УДК 621.039.332/546.27

ные о влиянии давления  $p$  на коэффициент обогащения  $\varepsilon$ , высоту единичной ступени ВЭТС и величину предельной плотности потока орошения  $q$ .



На основании полученной нами зависимости  $\epsilon$  от  $p$  [1] можно было предположить, что рабочее давление процесса в эксплуатируемых установках [2, 3] не является оптимальным. Цель настоящей работы — определить зависимости ВЭТС и  $q$  от  $p$ , что позволит с учетом зависимости  $\epsilon$  от  $p$ , полученной в работе [1], найти и выбрать оптимальную величину рабочего давления в дистилляционной колонне.

### Зависимость предельной плотности орошения и ВЭТС насадочной дистилляционной колонны от давления

Эксперименты проводились с использованием насадочных колонн диаметром 8 и 57 мм, длиной насадочной части 2,5 и 4,5 м при давлении  $\sim 1$  и 4 атм соответственно. Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Температура конденсатора  $\text{BF}_3$  регулировалась так же, как описано в работе [2]. В качестве термостатирующей жидкости использовали этилен или фтористый метил.

Колонна (см. рис. 1) работала в адиабатических условиях. В конденсаторе пары  $\text{BF}_3$  полностью конденсировались и возвращались в колонну в виде жидкого  $\text{BF}_3$ . Потоки пара и жидкого  $\text{BF}_3$  в колонне рассчитывали по величине мощности, подводимой к нагревателю испарителя.

Перепад давлений вдоль колонны измеряли ртутным дифференциальным манометром типа ДТ-50. Температуру колонны, конденсаторов и испарителя контролировали медь-константановыми термопарами. Пробы газообразного  $\text{BF}_3$  для масс-спектрометрического анализа изотопного состава отбирали с верхней и нижней частей колонны.

До начала эксперимента проводилось захлебывание колонны, которое достигалось увеличением пото-

Рис. 1. Схема ректификационной колонны диаметром 8 мм и длиной насадочной части 2,5 м:

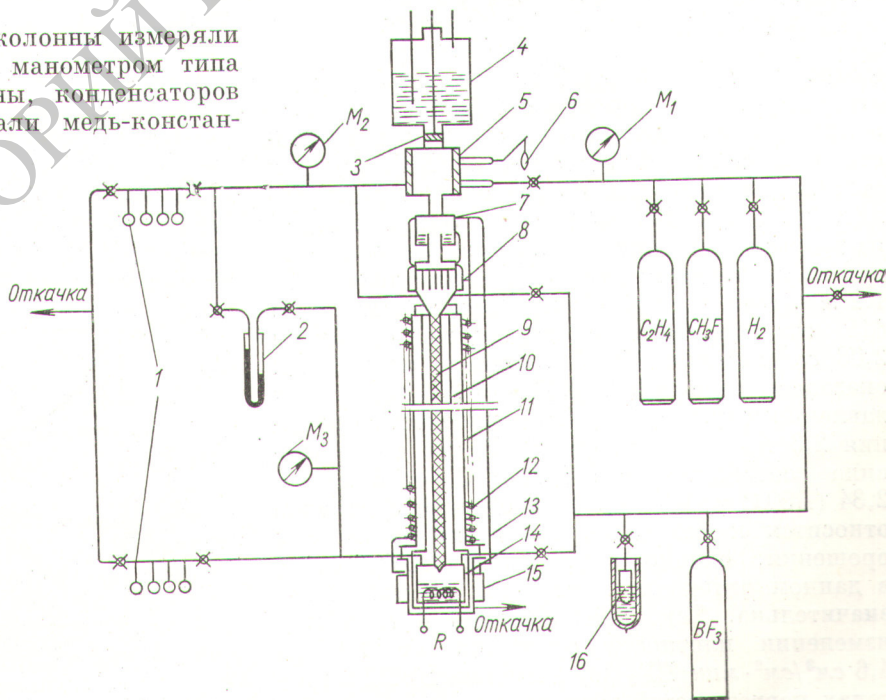
1 — ампулы для проб; 2 — дифференциальный манометр; 3 — поршень; 4 — бак с жидким азотом; 5 — конденсатор хладагента; 6 — резиновая камера; 7 — отстойник хладагента; 8 — конденсатор  $\text{BF}_3$ ; 9 — ректификационная трубка; 10 — экран; 11 — вакуумная рубашка; 12 — змеевик; 13 — пароотводная трубка; 14 — испаритель; 15 — экран испарителя; 16 — ловушка.

ка пара  $\text{BF}_3$  из испарителя. Значение ВЭТС определяли в безотборном режиме. Опыты продолжались в течение 120—170 ч до наступления стационарного состояния.

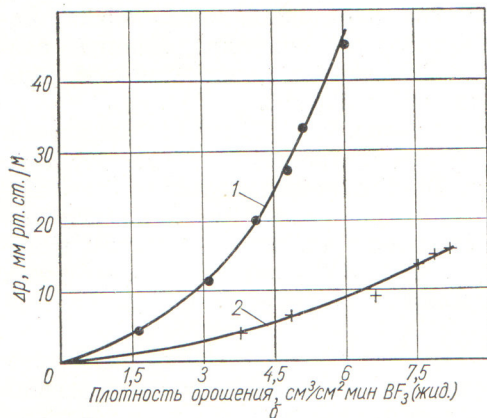
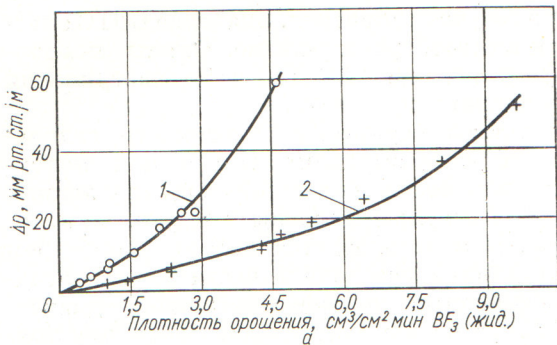
Результаты измерения зависимости гидравлического сопротивления насадочной колонны от плотности орошения при давлениях  $\sim 1$  и 4 атм представлены на рис. 2, а, б. На рис. 2, а используется колонна диаметром 8 мм с длиной насадочной части 2,5 м, насадка — одиночные кольца внутреннего диаметром 1,2 мм из константановой проволоки толщиной 0,25 мм; на 2, б — колонна диаметром 57 мм с длиной насадочной части 4,5 м, насадка — треугольные спирали Левина размером  $2,7 \times 2,5$  мм из константановой проволоки толщиной 0,25 мм.

Как видно из рис. 2, а, б, перепад давления  $\Delta p$  вдоль колонны с ростом давления от 1 до 4 атм при постоянной плотности орошения уменьшается в три-четыре раза. Предельная плотность орошения указанных насадок в интервале давления 615 мм рт.ст. — 4 атм пропорциональна квадратному корню из давления.

В результате опытов на колонне диаметром 8 мм найдено, что для насадки из треугольных спиралей размером  $1,5 \times 2$  мм при давлении в конденсаторе колонны 640 мм рт.ст. и







Р и с. 2. Зависимость сопротивления насадки от плотности орошения (а: 1, 2 — давление в конденсаторе колонны 615 мм рт.ст. и 4 атм соответственно; б: 1, 2 — давление в конденсаторе 1 и 4 атм соответственно).

плотности орошения  $1,9 \text{ см}^3/\text{см}^2 \cdot \text{мин}$   $\text{BF}_3$  (ж) степень разделения равна 2,9 (ВЭТС = 2,0 см), а при давлении дистилляции 4 атм и плотности орошения  $3,6 \text{ см}^3/\text{см}^2 \cdot \text{мин}$   $\text{BF}_3$  (ж) для этой же насадки степень разделения уменьшилась до 2,4 (ВЭТС = 1,8 см). Затем насадка из треугольных спиралей была заменена насадкой из одиночных колец внутренним диаметром 1,2 мм. При давлении в конденсаторе колонны 615 мм рт. ст. и плотности орошения  $2,08 \text{ см}^3/\text{см}^2 \cdot \text{мин}$   $\text{BF}_3$  (ж) степень разделения оказалась равной 2,8 (ВЭТС = 2,2 см), а при давлении в колонне 4 атм и плотности орошения 2,6 и  $4,6 \text{ см}^3/\text{см}^2 \cdot \text{мин}$   $\text{BF}_3$  (ж) она составила соответственно 2,4 (ВЭТС = 1,8 см) и 2,34 (ВЭТС = 1,8 см). Приведенное сравнение относится к несколько отличным плотностям орошения, однако зависимость ВЭТС от  $q$  в данном интервале плотностей орошения незначительна. Так, для давления 4 атм при изменении плотности орошения от 2,6 до  $4,6 \text{ см}^3/\text{см}^2 \cdot \text{мин}$   $\text{BF}_3$  (ж) величина ВЭТС в пределах погрешностей эксперимента остается без

изменения; в то же время с ростом давления от 615 мм рт. ст. до 4 атм она уменьшается от 2,2 до 1,8 см.

Таким образом, результаты экспериментов на колоннах показывают, что с ростом давления примерно в пять раз (от ~0,8 до 4 атм) степень разделения уменьшается на ~20%. При этом коэффициент обогащения снижается в 1,4 раза (от  $\epsilon = 8,8 \cdot 10^{-3}$  до  $\epsilon = 6,2 \cdot 10^{-3}$ ) [1], а вызываемое этим уменьшение степени разделения частично компенсируется уменьшением ВЭТС. Последнее не противоречит данным работы [4], где ВЭТС с ростом давления хотя и незначительно, но также уменьшается.

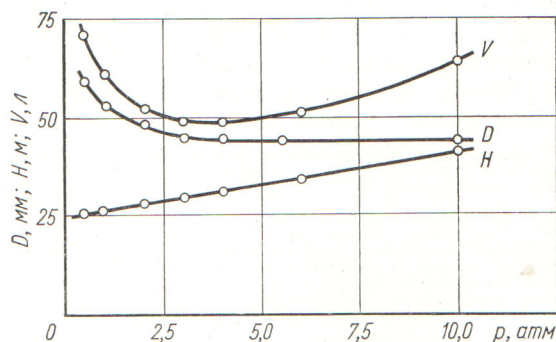
### Выбор оптимального рабочего давления дистилляционной колонны

На основании данных настоящего сообщения и результатов измерений коэффициентов обогащения, проведенных ранее [1], было рассмотрено влияние давления на параметры дистилляционной колонны с заданной производительностью и колонны с фиксированным диаметром.

Для насадочной колонны с заданной производительностью определялась зависимость диаметра и высоты (объема) колонны от давления. При этом зависимость ВЭТС от давления находилась линейной экстраполяцией экспериментальных данных, полученных при исследовании работы колонн диаметром 8 и 57 мм.

Как видно из рис. 3, необходимый диаметр колонны заданной производительности уменьшается с ростом давления, причем основное уменьшение приходится на давление 0,5—3 атм (~20%); при давлении выше 3 атм диаметр практически не изменяется.

В то же время высота колонны увеличивается при повышении давления. Вследствие тако-



Р и с. 3. Зависимость диаметра  $D$ , высоты  $H$  и объема  $V$  колонны от давления ректификации  $\text{B}^{11}\text{F}_3$  —  $\text{B}^{10}\text{F}_3$ .



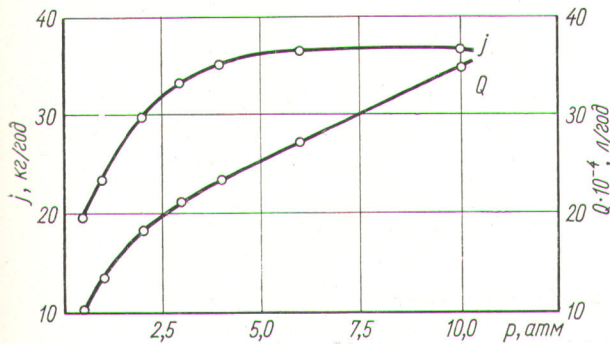


Рис. 4. Зависимость предельной производительности  $j$  колонны диаметром 57 мм и расхода жидкого азота  $Q$  от давления дистилляции.

го характера зависимости диаметра и высоты колонны от давления ее объем имеет минимум. При этом оптимальное давление оказалось равным 3,5 атм.

Для колонны с фиксированным диаметром (57 мм) рассчитана зависимость предельной производительности  $j$  от давления. Расчет проведен по формуле [5]:

$$j = \frac{L \varepsilon C_0 (1 - C_0)}{C_{II} - C_0},$$

где  $L$  — поток разделяемой смеси в колонне;  $C_0$  и  $C_{II}$  — концентрация извлекаемого изотопа в потоке питания и отбора.

Исходная концентрация  $V^{10}F_3$  при расчете взята равной 18,6%, а концентрация в отборе — 80%. Как видно из рис. 4, до 4 атм величина  $j$  растет, а при дальнейшем увеличении давления остается постоянной. На основании полученных данных сравниваются параметры дистилляционной колонны при давлениях 1 и 4 атм. С изменением рабочего давления от 1 до 4 атм  $j$  возрастает в 1,5 раза; длина колонны при этом должна быть увеличена в соответствии с падением эффективности на 16%. Расход жидкого азота (см. рис. 4) возрастает в 1,7 раза.

Учитывая изложенное, а также более устойчивую работу колонны при давлении 4 атм, рекомендовали проводить дистилляцию  $BF_3$  при этом давлении [6].

В настоящее время в Научно-исследовательском институте стабильных изотопов (Тбилиси) эксплуатируется дистилляционная колонна при давлении в конденсаторе 4,3 атм для разделения  $V^{10}F_3$  и  $V^{11}F_3$ . При потоке орошения 268,5 л жидкого  $BF_3$  в сутки с колонны отбирается 180 л в сутки газообразного  $BF_3$  с концентрацией  $V^{10}F_3$  86%, что эквивалентно отбо-

ру 28,2 кг/год 86%-ного  $V^{10}$ . Предельная производительность колонны для указанного потока орошения составляет 29,4 кг/год 86%-ного  $V^{10}$ .

Приведенные результаты работы колонны с отбором согласуются с расчетными данными и подтверждают, таким образом, проектные параметры, в частности величину коэффициента обогащения.

Для рассматриваемого случая (отбор близок к предельному) производную в уравнении переноса [5] можно принять равной нулю, и при условии несмешивания в точке питания получим коэффициент обогащения в колонне  $5,7 \times 10^{-3}$ . Коэффициент обогащения, полученный прямыми измерениями [1], для этой температуры равен  $6,0 \cdot 10^{-3}$ . Такое совпадение вполне удовлетворительно.

Поступила в Редакцию I/XII 1966 г.  
В окончательной редакции 15/V 1967 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. И. Б. Амирханова и др. «Атомная энергия», 19, 20 (1965).
2. Ю. К. Мюллерфордт, Г. Г. Зиверт, Т. А. Гагуа. В кн. «Труды Всесоюзной научно-технической конференции по применению радиоактивных и стабильных изотопов». М., Изд-во АН СССР, 1958, стр. 127.
3. P. Netley, D. Gartwright, H. Kronberger. Proc. Sympos. on Isotope Separ. Amsterdam, 1957, p. 385.
4. Я. Д. Зельвенский, А. А. Титов, В. А. Шалыгин. «Хим. пром-сть», № 2, 36 (1963).
5. А. М. Розен. Теория разделения изотопов в колоннах. М., Атомиздат, 1960.
6. И. Б. Амирханова и др. Авторское свидетельство № 180570 от 20/VII 1964 г.