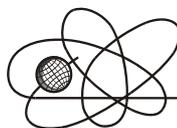




Российская Академия Наук

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

**ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ
БЕЗОПАСНОГО РАЗВИТИЯ
АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**



ИБРАЭ

RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

**NUCLEAR SAFETY
INSTITUTE**

Препринт ИБРАЭ № ИBRAE-2015-04

Preprint IBRAE-2015-04

А.В. Лизунов, А.А. Солодов

МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ ИЗОТОПА АЗОТА N¹⁵

Москва 2015

Moscow 2015

УДК: 621.039.542/544 , 621.038.8 , 621.039.8

А.В. Лизунов, А.А. Солодов. Метод получения изотопа азота ^{15}N . – Препринт / Ин-т. проблем безопас. развития атом. энергетики РАН. № ИБРАЭ-2015-04. – М. ИБРАЭ РАН, 2015 – 35 с. – Библиогр.: 24 назв. – 51 экз.

Изложен метод получения изотопа азота ^{15}N , основанный на фракционной перегонке жидкой двуокиси азота. Метод реализуется на базе предложенной ранее многоступенчатой многоканальной колонны разделения изотопов. Ступень колонны выполнена как комбинация короткой многоканальной колонны и газового смесителя гомогенного типа. Подробно описана конструкция колонны. Изложена математическая модель канала, ступени и колонны в целом. Представлен обзор практических вопросов: требуемая и достижимая точность дозировки флегмы и пара по каналам колонны, кандидатные конструкционные материалы. Тепловые потоки в конденсаторе/испарителе колонны генерируются с помощью теплового насоса, например, абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины (АБХМ). При масштабе производства ~ 600 кг ^{15}N / год и бесплатном отпуске низкопотенциального тепла, потребляемого АБХМ, стоимость получаемого ^{15}N принадлежит диапазону $\sim 10\text{--}15$ долл/г-ат ^{15}N .

©ИБРАЭ РАН, 2015

A.V. Lizunov, A.A. Solodov. The method of the nitrogen isotope ^{15}N production. – Preprint № ИБРАЭ-2015-04. Moscow: Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (IBRAE RAN), 2015. – 35 p. – Refs.: 24 items

The method of the nitrogen isotope N^{15} production is exposed, which is based on distillation of the liquid dinitrogen tetroxide. The method makes use of the early proposed multichannel isotope exchange column, which is made upon the cascade scheme with the stage including short multichannel column and a gas mixer element. The mathematic model of the channel, stage and column as a whole is described. The criteria of the column optimization is formulated. Essentials of practical items are discussed, such as: the needed and achieved precision of liquid and vapor distribution in the column channels, the list of candidate construction materials and the cost of N^{15} isotope produced. To minimize the cost of isotope the heat fluxes in condenser/boiler of the column are generated by use of vapor absorption chiller, by preference the lithium-bromide absorption chiller. In the case of available free waste heat to drive the chiller and production scale ~ 600 kG of N^{15} per year, the cost of isotope is as low as $\sim 10\text{--}15$ doll/g-at of N^{15} .

©Nuclear Safety Institute, 2015

Метод получения изотопа азота ^{15}N

А.В. Лизунов

АО “ВНИИНМ им. академика А. А. Бочвара”
123098, Москва, ул. Рогова, 5а
тел.: 8-499-190-88-72, эл. почта: avlizunov@bochvar.ru

А.А. Солодов

ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ БЕЗОПАСНОГО РАЗВИТИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ
113191, Москва, ул. Б. Тульская, 52
тел.: 8-495-955-22-19, 8-499-739-43-41, эл. почта: manacevich@gmail.com

Содержание

| | |
|---|----|
| 1 Введение..... | 4 |
| 2 Конструкция колонны | 8 |
| 3 Моделирование ступени и расчет колонны..... | 12 |
| 3.1 Обозначения, дополнительные условия и лемма 1 | 13 |
| 3.2 Уравнение канала | 16 |
| 3.3 Разделительная способность ступени | 18 |
| 3.4 Расчет головной колонны | 19 |
| 4 Обсуждение | 22 |
| 5 Приложение 1. Делитель потока флегмы | 23 |
| 6 Приложение 2. Контактная колонна рабочего модуля..... | 26 |
| 7 Приложение 3. Газовый смеситель | 28 |
| 8 Приложение 4. Стоимость изотопа ^{15}N | 31 |
| Литература | 34 |

Обозначения

$k = 1, \dots, K$ - номер ступени головной колонны

$i = 1, \dots, N$ - номер канала короткой многоканальной колонны ступени

x^* и X^* - атомная доля целевого ^{15}N в общем азоте флегмы и пара

l - вертикальная координата для рабочего канала ступени

$x_i(l)$ и $X_i(l)$ - концентрации, усредненные по потоку флегмы и пара в сечении l канала i

m и M - номинальные расходы общего азота в канале в потоках флегмы и пара

m_i и M_i - действительные расходы общего азота в канале i в потоках флегмы и пара

ζ_i - параметр перераспределения пара между каналами; определение ζ_i : $(1 - \zeta_i) m = M_i$

$j \equiv m - M$ - номинальный расход общего азота в канале ступени

j^X - номинальный расход целевого изотопа в рабочем канале ступени

J и J^X - расход общего азота и целевого изотопа на участке отбора полезного продукта

1 Введение

В работе изложен анализ нового метода получения изотопа азота ^{15}N , имеющего три особенности: 1 – выделение целевого ^{15}N проводится методом фракционной перегонки жидкой двуокиси азота; 2 – метод реализуется с помощью многоканальной колонны разделения изотопов, предложенной в патенте [1]; 3 – генерация тепловых потоков в конденсаторе и испарителе колонны проводится по энергосберегающей технологии с помощью абсорбционной холодильной машины. Цель работы – изложить теорию предложенной в [1] многоканальной колонны разделения изотопов, провести оценку стоимости изотопа ^{15}N , получаемого по новой технологии, а также выделить критические эксперименты по проверке работоспособности новой колонны. Получена оптимистическая оценка эффективности нового метода. В “продвинутом” варианте метода стоимость целевого изотопа ^{15}N достигает исключительно низких значений $\sim 10\text{--}20$ долл/г-ат ^{15}N (см. приложение 4). Для сравнения: азотнокислотный метод (наиболее эффективный из используемых в настоящее время) позволяет получать изотоп ^{15}N при затратах $50\text{--}200$ долл /г ^{15}N (т.е. $750\text{--}3000$ долл/г-ат ^{15}N).

Интерес к изотопу азота ^{15}N связан с проектами быстрых энергетических реакторов с нитридным ядерным топливом (U,Pu)N. Нитридное топливо имеет ряд достоинств: высокая плотность и теплопроводность, совместимость с основными материалами оболочек твэлов и жидкометаллическими теплоносителями – натрием и свинцом. В тепловых режимах с температурами на оси твэла < 900 °C нитридные таблетки испытывают медленное, однородное по радиусу распухание, удерживая газы до выгораний ~ 8 % FIMA. Данные по нитриднему топливу систематизированы в книгах [2,3].

Сопоставление схем регенерации основных ядерных топлив также выявляет преимущества нитридного топлива. В отличие от оксидного постреакторное нитридное топливо можно регенерировать не только водными [4], но также пирохимическими и электрохимическими методами. Для этих методов характерна малооперационность и многовариантность. Повидимому, в рамках пирохимических методов упрощаются задачи обращения с отходами, поскольку отвальные продукты пирохимических технологий имеют минимальные физические объемы. Кроме того, можно выбирать такие схемы регенерации, в которых отвальные продукты имеют химическую форму, наиболее удобную для хранения или остекловывания с последующим захоронением. Предварительный анализ некоторых пирохимических схем регенерации нитридного топлива изложен, например, в работе [5] и в нескольких отчетах ВНИИНМ (см. [6–8]).

В последнее время интерес к нитриднему топливу вырос, очевидно, в связи с ускорением работ по реактору БРЕСТ. Опубликованы новые результаты по технологии нитридной таблетки, по физхимии нитридного топлива, содержащего минорные актиноиды (МА), использованию нитридного топлива для дожигания минорных актиноидов в специализированных и энергетических реакторах. Важные результаты получены при исследовании нейтронных задач для нитридного топлива с МА. Показано, что реализуем топливный цикл энергетического реактора с нитридным топливом, в котором Am и другие минорные актиноиды не выводятся из топлива при регенерации, но используются как делящиеся компоненты наравне с Pu [9,10].

Имеются нерешенные проблемы нитридного топлива, рассмотренные в обзорах реактора БРЕСТ [11,12] и в докладах, посвященных планированию работ по быстрым реакторам, например в [13]. Одна из проблем состоит в том, что облучение в реакторе топлива (U,Pu)N с природным азотом сопровождается наработкой изотопа ^{14}C . При этом несколько ухудшается ней-

тронный баланс реактора, под оболочкой твэла появляются заметные количества водорода [2] и (что уже критично для серийного энергетического реактора) возникают экологические проблемы, обусловленные радиотоксичностью изотопа ^{14}C [4,11,12,13]. Последнее требует включения в цикл регенерации топлива операций по выделению и иммобилизации наработанного изотопа ^{14}C . Проблемы углерода ^{14}C решаются заменой в нитридах (U,Pu)N природного азота изотопом ^{15}N [2]. Таким образом, проекты коммерческих энергетических реакторов с нитридным топливом включают задачу получения промышленных количеств изотопа азота ^{15}N .

Изотоп ^{15}N используется в биологических исследованиях. Его мировое производство в последние годы достигает 20–40 кг ^{15}N /год. Изотопы азота получают в ректификационных колоннах преимущественно азотнокислотным методом, детально изложенным в [14]. Азотнокислотный метод основан на изотопном обмене в системе $\text{NO}-\text{HNO}_3$, состоящей из газообразной окиси азота NO и азотной кислоты с концентрацией $\sim 5-7$ М. На нижнем конце колонны проводится химическое обращение потока за счет восстановления HNO_3 до газообразного NO с помощью диоксида серы SO_2 . Азотнокислотный метод весьма затратен, так как удельный расход SO_2 достигает ~ 660 кг на 1 г-ат целевого ^{15}N [14]. При получении азотнокислотным методом изотоп ^{15}N имеет стоимость от 50 до 200 долл за 1 г ^{15}N ($750-3000$ долл/г-ат ^{15}N) [4]. Считается, что существует некоторый потенциал оптимизации метода и снижения стоимости целевого ^{15}N . Однако по оценкам разработчиков азотнокислотного метода при выходе производства изотопа ^{15}N на уровень ~ 100 кг/год потребуются новые технологии этого изотопа [15].

Предложены процессы, потенциально способные дать приемлемые способы получения изотопа ^{15}N . К их числу относится лазерное разделение изотопов азота [16]. Метод находится в стадии лабораторных исследований, его промышленные перспективы остаются неясными.

В работе [17] предложен вариант азотнокислотного метода, в котором проводится рецикл SO_2 за счет термokatалитического восстановления отвальной серной кислоты углеводородами при $500-600$ $^\circ\text{C}$, например по реакции



Удельный расход метана на рецикл SO_2 составляет ~ 50 кг CH_4 /г-ат ^{15}N (стоимостный эквивалент $\sim 15-20$ долл/г-ат ^{15}N). Однако этот метод может столкнуться с трудностями аппаратурного оформления, поскольку пары H_2SO_4 и SO_2 агрессивны. Характерно, что в [17] не дана оценка технологичности метода.

Начиная с 50-х годов прошлого столетия было изучено несколько методов получения изотопов азота в ректификационных колоннах [14,18,24]. Повидимому, вначале ставилась задача получения небольших количеств изотопа ^{15}N для исследовательских целей. В рамках такого подхода нужны колонны лабораторного масштаба и рабочие системы с максимальной величиной изотопического эффекта в распределении изотопа между паром и жидкостью. Таким образом, исторически были отобраны рабочие системы, требующие химического обращения потоков (азотнокислотный метод), либо системы, создающие серьезные технологические трудности (низкотемпературная дистилляция жидкой окиси азота). Выполненные колонны позволяют получать небольшие количества изотопа ^{15}N при высоких удельных затратах.

Считается, что в ближайшие десятилетия основными реакторами ядерной энергетики станут реакторы типа БРЕСТ или БН с нитридным топливом. При строительстве серии подобных реакторов потребность в изотопе ^{15}N достигнет уровня ~ 1000 кг/год, что ставит проблему масштабного производства изотопа ^{15}N . Главное требование к технологиям изотопа азота ^{15}N для нужд атомной энергетики – получение промышленных количеств изотопа при стоимости око-

ло 1 долл/г ^{15}N (15 долл/г–ат ^{15}N) [4]. Азотнокислотный метод или низкотемпературная дистилляция жидкой окиси азота, повидимому, не дают решения этой задачи [14,15].

Очевидно, что для понимания перспектив нитридного топлива уже сегодня нужны предметные ответы на вопрос о наличии или отсутствии приемлимой технологии изотопа ^{15}N для нужд ядерной энергетики.

Известно, что получение изотопов в лабораторных и промышленных масштабах основывается на несколько различных принципах. Поиск и отбор технологий изотопа ^{15}N для нужд ядерной энергетики может оказаться более успешным, если подойти к проблеме с производственных позиций, как к задаче конструктора и технолога. Такой подход формулируется как набор хорошо известных консервативных положений:

- использование стандартных, хорошо изученных рабочих процессов и аппаратов;
- максимальное упрощение установки разделения изотопов и ее рабочих процессов;
- использование экономичных дистилляционных насадочных колонн разделения изотопов со строго тепловым обращением потоков;
- устойчивость рабочего процесса; отсутствие проблем со смачиванием насадки;
- доступность сырья; простая подготовка сырья для подачи в колонну разделения изотопов;
- технологически удобный интервал рабочих температур и давлений;
- при масштабном производстве изотопа следует использовать колонну большой размерности, поскольку это проверенный способ снижения стоимости изотопной продукции.

Анализ выписанных положений начинается с выбора рабочего тела. В табл. 1 включены две рабочие системы для дистилляционной колонны разделения изотопов азота, удовлетворяющие выписанным требованиям: двуокись азота и водные растворы аммиака (индексы *g*, *l* и *sol* означают газовую фазу, жидкость и компонент раствора).

Таблица 1. Рабочие тела дистилляционных колонн разделения изотопов азота

| Рабочая система, компоненты системы | Диапазон рабочих температур и давлений | Коэффициенты α и ε | Источник |
|--|--|--|---------------|
| пар 0.25 $\text{NO}_2(\text{g})$ – 0.75 $\text{N}_2\text{O}_4(\text{g})$ жидкая фаза $\text{N}_2\text{O}_4(\text{l})$ | ~ 21 °С, 1 ат | $\alpha = 1 - \varepsilon$, $\varepsilon = 0,0038$ в точке нормального кипения 21 °С | [20] |
| пар $\text{NH}_3(\text{g})$ жидкая фаза $\text{H}_2\text{O} - \text{NH}_4\text{OH}(\text{sol})$ | возможен выбор рабочего давления и температуры в интервале ~ 0,1–3 ат. и ~ 0–30 °С | $\alpha = 1 + \varepsilon$, $\varepsilon = 0,006$ при 23 °С | [18], [24] |

В России и некоторых других странах аммиак и двуокись азота вырабатываются как полупродукты азотнокислотного производства в объемах ~ 1 млн т/год. Фактически, эти продукты доступны в неограниченных количествах. Используя их как сырье на ^{15}N , можно применить проходную схему питания колонны (см. рис. 1), что позволяет исключить исчерпывающую секцию и серьезно упростить головную колонну разделения изотопов. В проходной схеме из сырьевого потока можно извлекать ~ 5–10 % поступающего целевого изотопа, возвращая разубоженное сырье в основное производство (рис. 1). Таким образом, технология оказывается безотходной, а расходы на сырье пренебрежимо малы.

Известно (наряду с указанными в табл. 1) несколько кандидатных систем для разделения изотопов азота в ректификационных колоннах с тепловым обращением потоков, в первую очередь: аммиак – спиртовые растворы аммиака [24] и азеотроп аммиак – диметиловый эфир. В системах NH_3 –спирт в жидкой фазе образуются комплексы, при этом изотопический эффект в распределении ^{15}N между паром и флегмой относительно велик и достигает $\sim 1\%$ [24]. Недостатки подобных рабочих тел – несколько замедленный изотопический обмен между паровой и жидкой фазой, повышенная энергоемкость процесса и сложная тепловая схема колонны. Дистилляционная колонна с рабочим телом – двуокисью азота имеет преимущества простейшей тепловой схемы. Поэтому двуокись азота оценивается как основное рабочее тело на изотоп ^{15}N . Преимущества и недостатки систем NH_3 – спиртовые растворы NH_3 и других подобных систем требуют анализа. В данной работе указанные рабочие тела оцениваются как резервные.

Дистилляционная колонна разделения изотопов с двуокисью азота имеет ряд достоинств.

– Очистка сырьевой двуокиси азота от агрессивных примесей (азотная кислота и вода) перед подачей в колонну относится к рядовым технологическим операциям.

– По данным [19] для температур $< 50\text{ }^\circ\text{C}$ известны металлы и сплавы, “совершенно стойкие” (корродирующие со скоростью < 1 мкм/год) в жидкой и газообразной двуокиси азота. Следовательно, наиболее уязвимая для коррозии спиральная насадка колонны при работе в двуокиси азота может иметь ресурс 20–30 лет. Это позволяет выполнить колонну с большим ресурсом, максимально снижая долю капитальных затрат в стоимости целевого продукта (прил. 4).

– Температура нормального кипения жидкой двуокиси азота равна $21\text{ }^\circ\text{C}$. Таким образом, рабочий процесс колонны реализуется в технологически удобном диапазоне давлений и температур ~ 1 ат и $\sim 21\text{ }^\circ\text{C}$. Нужно подчеркнуть, что рабочие температуры $\sim 21\text{ }^\circ\text{C}$ особенно удачны, если колонна разделения изотопов работает в связке с тепловым насосом (прил. 4).

Однако рабочие тела, включенные в табл. 1, характеризуются малой величиной коэффициента обогащения $\varepsilon \approx 0,004\text{--}0,005$, что на порядок ниже, чем в азотнокислотном методе. Поскольку атомная доля ^{15}N в природном азоте составляет $x^0 = 0,00366$ [20], то при получении изотопа ^{15}N методом дистилляции жидкой двуокиси азота параметр $(\varepsilon \cdot x^0)^{-1}$, определяющий энергоемкость метода, имеет оценку

$$(\varepsilon \cdot x^0)^{-1} \cong 0,7 \cdot 10^5.$$

Последняя оценка фиксирует удельный расход холода/тепла в конденсаторе/испарителе колонны на уровне $\sim 2 \cdot 10^6$ кДж/г–ат N^{15} (прил. 4). Формально энергоемкость метода недопустимо велика. Однако для генерации подобных потоков можно использовать энергосберегающие технологии, основанные на применении тепловых насосов. Например, при получении изотопа ^{15}N методом дистилляции жидкой двуокиси азота в колонне, обслуживаемой простейшим тепловым насосом (парокомпрессионная холодильная машина), эффективная удельная энергоемкость процесса достигает $\sim 100\text{--}150$ кВт–час/г–ат ^{15}N . При цене энергии 0,1 долл/кВт–час стоимостный эквивалент энергозатрат близок $\sim 10\text{--}15$ долл/г–ат ^{15}N (прил. 4).

Наиболее экономичен тепловой насос в виде абсорбционной холодильной машины (рис. 7). В ряде случаев для питания этих машин доступно сбросовое неоплачиваемое низкопотенциальное тепло. В подобных вариантах оплачивается только электроэнергия, потребляемая вспомогательными насосами. При этом эффективные (оплачиваемые) энергозатраты снижаются до уровня $15\text{--}30$ кВт–час/г–ат ^{15}N (стоимостный эквивалент равен $\sim 1,5\text{--}3$ долл/г–ат ^{15}N). Таким образом, при использовании для генерации тепловых потоков в колонне энергосберегающих технологий величина $(\varepsilon \cdot x^0)^{-1}$ становится нелимитирующим параметром метода.

Для снижения стоимости изотопа необходимо использовать колонны большой размерности и выполнять их в варианте с высоким ресурсом. Многоканальная колонна разделения изотопов большой размерности предложена и кратко описана в патенте [1]. Новая колонна, возможно, дает ключ к технологии изотопа ^{15}N для нужд ядерной энергетики. Ввиду важности проблемы в данной работе описание колонны и метода изложено подробнее, чем это обычно принято; материал разбит на разделы с тем, чтобы упростить анализ и поиск возможных опровержений изложенных результатов. В разделах 2, 3 и в приложениях 1–4 рассмотрены: конструкция колонны, расчетные характеристики, критерии работоспособности, а также стоимость изотопа ^{15}N , получаемого методом дистилляции жидкой двуокиси азота.

При отборе материала теоретического раздела 3 было учтено, что основной интерес теоретика при моделировании конкретных устройств приходится на постановку задачи, оценку корректности используемых физических моделей, а также анализ дополнительных условий и ограничений. Повидимому, чтобы понять принципиальный момент (почему оказывается работоспособной многоканальная колонна разделения изотопов), теоретику достаточно просмотреть в разделе 3 уравнение (10), вывод соотношений (16) и критерия (21).

Начиная дорогостоящую работу по созданию новой колонны разделения изотопов, необходимо вычлнить проблемы, которые могут возникнуть при выполнении колонны “в металле”. Для конструктора и технолога важны реализуемость и трудоемкость конструкции, вопросы материаловедения, ресурс колонны и т.п. Для этой группы специалистов в прил. 1–3 приведено подробное описание конструкции колонны. В текст включены наиболее значимые справочные данные, по возможности, со ссылками на источники, а в наиболее элементарных случаях – без ссылок. Базовый материал по аппаратам и процессам азотнокислотного производства можно найти в книгах: В.И. Атрощенко и С.И. Каргин. Технология азотной кислоты М. – Л.: ГНТИ, 1947 г.; В.И. Атрощенко и С.И. Каргин. Технология азотной кислоты М.: Химия, 1970 г.; а также в двухтомнике: Справочник азотчика. Ред. Симулин Н.А. и др. В 2-х томах. М.: Химия, 1967–1969 г.г.. Эти книги доступны в интернете в виде файлов djvu. Таблицы физико–химических констант основных рабочих тел для разделения изотопов азота в ректификационных колоннах, а также библиография по данной тематике приведены в [24].

Для разработчиков реакторов с нитридным топливом, в данном случае выступающих в роли потребителей, важен практический итог, то есть ожидаемая стоимость целевого ^{15}N . По оценкам приложения 4, получение изотопа ^{15}N методом дистилляции двуокиси азота потенциально исключительно экономично и способно обеспечить стоимость $\sim 10\text{--}20$ долл/г–ат ^{15}N . Результат представляет интерес для проекта реактора БРЕСТ. Имея в виду начало работ над новой колонной, в работе указаны критические эксперименты (см. раздел 4), результаты которых могут стать обоснованием или опровержением новой технологии.

2 Конструкция колонны

При построении дистилляционной колонны разделения изотопов большой размерности необходимо преодолеть специфические трудности, обзор которых приведен ниже. Для рабочих тел, включенных в табл. 1, характерна малая величина коэффициента обогащения ($\varepsilon \cong 0,004$). Коэффициент ε играет роль размерного фактора, определяющего проблемы колонн разделения изотопов и, в конечном итоге, их конструктивные формы.

Известно, что поперечное перемешивание на нерегулярной насадке в потоках флегмы и пара проходит недостаточно интенсивно. Спонтанные эффекты поперечной неоднородности нарушают работу насадочных колонн разделения изотопов, что составляет основную проблему этих колонн ([18], с. 27–28). На практике для подавления эффектов поперечной неоднородности в колоннах изотопного обмена используют простейший прием: ограничивают диаметр рабочего канала колонны. Фактически это означает переход к физически тонкому каналу. Обзор выполненных колонн показывает, что при величине $\varepsilon \sim 0.004$ выбирают диаметр рабочего канала < 100 мм. Оптимальным может быть диаметр канала 50–70 мм.

Например, одна из первых установок получения изотопа кислорода O^{18} методом дистилляции воды ($\varepsilon \sim 0.0032$) была выполнена как каскад из трех колонн с диаметрами 100, 75 и 25 мм, высотой ~ 10 м каждая (см. [18], табл. 2.10; с. 87–88). В колонне использовалась насадка Диксона (выполненные из сетки кольца с внутренними перегородками). Установка имела производительность ~ 12 г O^{18} /сутки при доле целевого O^{18} в конечном продукте 99,8 %. Таким образом, для получения ~ 1000 кг изотопа в год требуется ~ 300 подобных колонн.

В теории одноканальной колонны разделения изотопов доказывается, что оптимизация колонны приводит к требованию, по которому расходы флегмы и пара в рабочем канале должны совпадать с относительной точностью не хуже величины коэффициента обогащения ε . Используя для расходов флегмы и пара в колонне обозначения m и M , сформулированный критерий можно записать в виде слабого неравенства $|m - M| / m < \varepsilon$. В одноканальной колонне в безотборном режиме последний критерий выполнен “автоматически” как следствие законов сохранения. В реальной колонне в режиме с отбором нужно выполнить сильный критерий работоспособности одноканальной колонны в форме

$$j \equiv |m - M| \ll \varepsilon \cdot m,$$

где j – расход рабочего тела на участке отбора. Объемный расход флегмы в выполненных одноканальных колоннах (диаметр канала 70–25 мм) имеет величину $m \sim 1-0,1$ см³/сек; следовательно, при $\varepsilon \sim 0,004$ (см. табл. 1) отбор проводится со скоростью $j \ll 0,4 - 0,04$ мм³/с. Очевидно, операция отбора имеет прецизионный характер и ее организация сталкивается с некоторыми трудностями даже в лабораторных условиях ([18], с. 87–88).

Опыт выполненных установок показывает, что при величине $\varepsilon \sim 0,004$ основная и устоявшаяся конструктивная форма насадочной колонны разделения изотопов – это одноканальная колонна с диаметром рабочего канала головной секции < 100 мм и 50–70 мм и 25 мм в следующих секциях. Данное положение подтверждает практика получения изотопа O^{18} методом дистилляции воды: для количественной наработки O^{18} этим методом используют батареи из одноканальных независимых колонн. Современный подход к организации работы этих аппаратов рассмотрен в работе [21].

Переход к укрупненному аппарату упрощает решение конкретных задач, например: теплоизоляция колонны, отбор полезного продукта, контроль и управление параметрами рабочего процесса, выбор конструкции испарителя и конденсатора, переход к энергосберегающим технологиям за счет применения абсорбционных тепловых насосов, снижение текущих расходов и т.д.. Использование колонны большой размерности считается проверенным способом снижения стоимости изотопной продукции [18].

Теоретически, батарею независимых одноканальных колонн разделения изотопов можно свести в многоканальную колонну большой размерности, выполненную по стандартной интегральной схеме с общими для всех каналов испарителем и конденсатором. Подобная интегральная компоновка сталкивается с проблемой работоспособности колонны, поскольку в каждом из каналов нужно обеспечить выполнение (сильного) критерия $j \equiv |m - M| \ll \varepsilon \cdot m$. Однако уже незначительное спонтанное перераспределение пара между каналами приведет к нарушению этого критерия для части каналов. Следовательно, в колонне разделения изотопов, выполняемой как многоканальная колонна в интегральной компоновке, необходимо решить (или обойти) задачу точного дозирования пара и флегмы при их подаче в рабочие каналы колонны. Одно из решений сформулированной проблемы предложено в патенте [1].

Блок–схема многоканальной колонны разделения изотопов, предложенной в [1], представлена на рис. 1, где показан головной участок установки разделения изотопов азота методом дистилляции жидкой двуокиси азота. Головной участок включает колонну изотопного обмена, состоящую из секции изотопного обмена, верхнего и нижнего узлов обращения потоков, узлов питания и отбора целевого продукта, а также стандартных вспомогательных устройств, опущенных на рис. 1.

Верхний узел обращения включает: буфер пара 2, конденсатор 3 и делитель потока флегмы 4 с раздаточными трубками 5. Устройство делителя флегмы 4 (рис. 1) подробно рассмотрено в прил. 1. Нижний узел обращения состоит из буфера пара 9 и испарителя 10. В нижний узел обращения потоков введен реактор 22, предназначенный для перевода незначительных объемов кубового остатка 11 (азотная кислота) в окислы NO. Колонна изотопного обмена 1 (рис. 1) собирается в вертикальном корпусе, соединенном с верхним и нижним буферами пара 2 и 9.

Колонна 1 выполнена по обычной схеме тарельчатой колонны с той разницей, что в ступени вместо тарелки используется рабочий модуль, состоящий из короткой многоканальной насадочной колонны с рабочими каналами 6 и газового смесителя 8 (рис. 1). Конструкция модуля рассмотрена в приложениях 2 и 3. На рис. 1 показана проходная схема питания колонны (поз. 15–19, 12, 13 и 21). Колонна размещается при цехе азотнокислотного производства. Сырье (двуокись азота) отбирается на участке 15 основного производства и в виде пара подается в среднюю часть насадочной колонны очистки 16. Очищенные по агрессивным примесям пары двуокиси азота отбираются из верхней части колонны 16 и прокачиваются через буфер пара 2 между входом 12 и выходом 13. Разубоженное сырье (и кубовый остаток 20 колонны 16) возвращаются на участок 21 основного производства, что делает процесс безотходным.

Очистка сырьевой двуокиси проводится в верхней части колонны 16, работающей как скруббер, орошаемый жидкой двуокисью азота, получаемой в конденсаторе 18. В скруббере жидкая двуокись азота поглощает из паров $N_2O_4-NO_2$ агрессивные примеси H_2O и HNO_3 . Т. к. давление паров воды и азотной кислоты при нормальной температуре мало, то (даже с учетом ограниченной растворимости воды и азотной кислоты в жидкой двуокиси азота) жидкая двуокись эффективно поглощает эти примеси из паров двуокиси азота. При высоте ~ 1 м скрубберного участка колонны 16 в режиме с рабочей температурой ~ 20 °C достигается очистка сырья, например, до расчетных содержаний H_2O и $HNO_3 < 0,01$ масс. % .

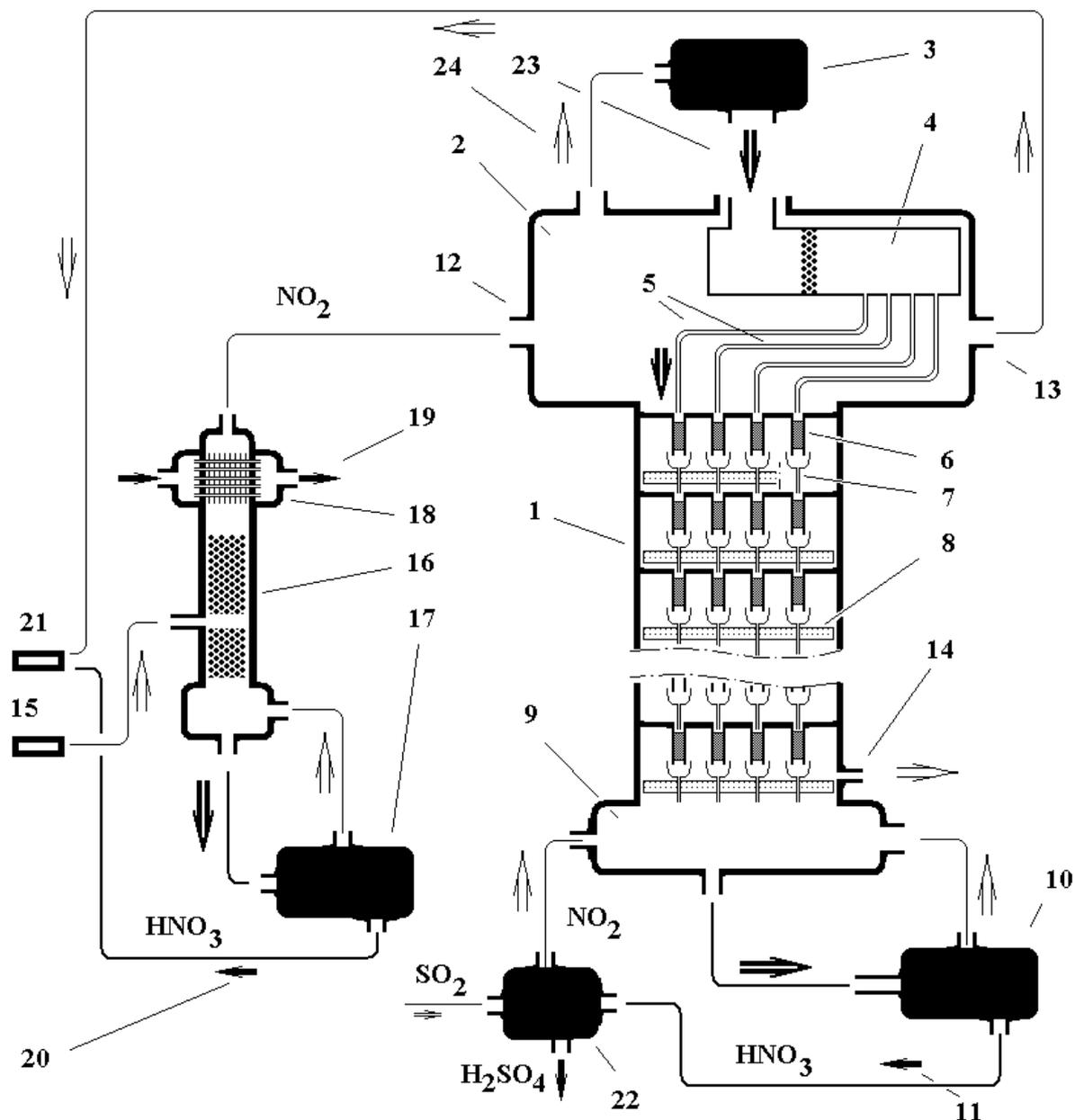


Рис. 1. Схема получения изотопа ^{15}N дистилляцией жидкой двуокиси азота : 1 – колонна изотопного обмена; 2 – верхний буфер; 3 – конденсатор; 4 – делитель потока флегмы; 5 – раздаточные трубки; 6,7 и 8 – элементы рабочего модуля: 6 – рабочий канал с насадкой; 7 – проходная трубка; 8 – газовый смеситель; 9 – нижний буфер; 10 – испаритель; 11 – кубовый остаток (HNO_3); 12 и 13 – ввод и вывод исходного и разубоженного сырья; 14 – отбор целевого продукта; 15 – участок отбора NO_2 на основном производстве; 16 – колонна очистки сырьевой NO_2 ; 17 и 18 – испаритель и конденсатор; 19 – теплоноситель; 20 – возврат кубового остатка колонны 16; 21 – участок возврата разубоженного сырья в основное производство; 22 – реактор восстановления азотной кислоты; стрелки 23 и 24 – флегма и пар

Рис. 1 поясняет рабочий процесс колонны. Флегма, полученная в конденсаторе 3, приходит на вход делителя 4 и по раздаточным трубкам 5 равными долями подается на орошение каналов 6 верхнего модуля колонны. Порция флегмы, поступившая по трубкам 5 в некоторый канал 6 верхнего модуля, стекает по насадке этого канала, приходит в приемный стакан проход-

ной трубки 7 и далее по трубке 7 поступает на орошение соответственного канала 6 нижележащего модуля. Данная порция флегмы проходит сверху вниз поочередно каналы 6 и проходные трубки 7, лежащие на одной вертикальной оси, и через буфер 9 поступает в испаритель 10, где конвертируется в пар, возвращаемый в колонну. Таким образом, колонна построена как набор вертикальных параллельных каналов, составленных из трубок 6 и 7, в которых проходит движение флегмы, разбитой на равные потоки.

Пар из испарителя 10 возвращается в буфер пара 9 и далее самопроизвольно распределяется по каналам 6 нижнего модуля колонны. Таким образом, в насадочных объемах трубок 6 организован противоток восходящих потоков пара и нисходящих потоков флегмы. По построению колонны изотопный обмен пар–флегма проходит в насадочных объемах каналов 6. На уровне смесителя 8 (рис. 1) флегма и пар не контактируют, поскольку флегма здесь стекает по трубкам 7, тогда как пар движется в рабочем объеме смесителя 8.

С верхних выходов каналов 6 данной ступени пар поступает в газовый смеситель гомогенного типа 8 вышележащей ступени. Рабочий объем смесителя 8 представляет собою систему наклонных каналов, причем соседние каналы имеют различную азимутальную ориентировку (прил. 3). В смесителе поток пара разбивается на парциальные восходящие потоки. Встречные сдвиги парциальных потоков по горизонтали вызывают перемешивание пара и выравнивание его состава по ширине. По изложенному в последних двух абзацах алгоритму восходящий поток пара последовательно проходит ступени колонны и поступает в конденсатор 3.

Основная идея конструкции состоит в том, чтобы простыми средствами добиться в каждой ступени колонны максимально точного совпадения рабочих параметров каналов 6 (рис. 1): совпадения расходов флегмы и пара в каналах, высоты рабочего (мокрого) столба насадки в канале 6, а также совпадения состава пара на входе и выходе из рабочих каналов ступени. В приложениях 1–3, показано, что в обсуждаемой колонне достигается весьма точное дозирование флегмы по рабочим каналам 2 ступени (рис. 3). Напротив, дозирование пара имеет ограниченную точность. Решающий момент состоит во введении в конструкцию ступени газового смесителя 15 (рис. 3), обеспечивающего однородный состав пара на входе в каналы 2. Можно отметить, что газовый смеситель исправляет недостаток обычных тарельчатых колонн, состоящий в плохом выравнивании состава пара по ширине.

3 Моделирование ступени и расчет колонны

В данном разделе рассмотрено математическое описание многоканальной колонны, предложенной в [1]. Выписано уравнение канала, изложен расчет короткой многоканальной колонны ступени 14 (рис. 3), а также колонны в целом.

Вводится понятие идеальной ступени: по определению, рабочие каналы 2 (рис. 3) идеальной колонны 14 идентичны и имеют совпадающие гидродинамические режимы. Расчетные характеристики идеальной ступени служат нулевым приближением теории. Исследуются условия, при выполнении которых действительная и идеальная ступени имеют близкие рабочие характеристики. Принимается, что в силу конструктивных особенностей колонны (см. приложения 1–3) основной вклад в отклонение характеристик ступени от идеальных вносит перераспределение пара между каналами ступени. Численные оценки практических характеристик колонны приведены для варианта колонны с двуокисью азота $\text{NO}_2 - \text{N}_2\text{O}_4$.

3.1 Обозначения, дополнительные условия и лемма 1

При формулировке уравнений теории принимается соглашение, по которому количество общего азота и целевого изотопа измеряется в единицах “моль N” (моль атомов, или г–ат общего азота) и “моль ^{15}N ” (г–ат изотопа ^{15}N). Кислород рассматривается как “немой” компонент системы. В силу соглашений расходы флегмы и пара измеряются в однородных единицах “моль атомов N/сек”. Расходы целевого изотопа измеряются в единицах “моль атомов ^{15}N /сек”. Концентрация целевого изотопа определена как атомная доля ^{15}N в общем азоте.

Каналам 2 (рис. 3) короткой многоканальной колонны 14 присваиваются номера $i = 1, \dots, N$. Моделирование многоканальной колонны 14 проводится в приближении равных высот h_i рабочих (мокрых) участков каналов i . Для каналов заданной ступени вводится вертикальная координата l ; по соглашению

$$0 < l < h. \quad (1)$$

Точки $l = 0$ и $l = h$ отвечают нижнему и верхнему сечениям рабочего участка канала. Рабочий процесс каналов считается стационарным.

В теории массообмена в насадочных колоннах рассматриваются усредненные концентрации целевого изотопа в паровой и жидкой фазах [18]. Ступень построена на базе физически тонких каналов 2 (рис. 3); для них определены функции $x_i(l)$ и $X_i(l)$ – усредненные в сечениях l канала i концентрации целевого изотопа в жидкой и паровой фазах. Процедура усреднения уточняется при обсуждении соотношений (8). Далее функции $x_i(l)$ и $X_i(l)$ упоминаются как “усредненные концентрации” или “концентрации” (полная и краткая терминология).

Особенность ступени (рис. 3) состоит в том, что газовые смесители 15 выравнивают концентрации целевого изотопа ^{15}N в потоке пара по ширине колонны. Поэтому концентрации $X_i(l)$ в нижних, входных по пару сечениях каналов 2 колонны 14 (рис. 3) совпадают, что дает однородные, не зависящие от номера канала i граничные условия:

$$X_i(0) = X(0) = \text{Const}. \quad (2a)$$

Поскольку пар и флегма в каналах 2 (рис. 3) почти равновесны, то в нижних сечениях каналов i каждой ступени (с точностью до концентрационных напоров пар–флегма) выполнено

$$x_i(0) \cong X_i(0) = X(0). \quad (2b)$$

Следовательно, состав флегмы в нижних сечениях каналов 2 не зависит от номера канала i . В каналы заданной ступени флегма поступает с нижних выходов каналов i вышележащей ступени. Покидая канал, флегма “запоминает” последнюю концентрацию. Поэтому для верхних сечений каналов 2 из (2b) следует соотношение для концентраций $x_i(h)$ в жидкой фазе:

$$x_i(h) \cong x(h) = \text{Const}. \quad (2c)$$

Наконец, по аналогии с (2b), для верхних сечений каналов из (2c) следует соотношение

$$X_i(h) \cong X(h) = \text{Const}. \quad (2d)$$

Замечание к (2a) и (2d). В реальной колонне 14 (рис. 3) концентрационные напоры δX_i между паром и флегмой, измеренные в устьях каналов 2, имеют некоторый разброс. Поэтому условие (2d) требует уточнений. Для устьев каналов 2 (рис. 3) в сечениях $l = h$ и $l = 0$ определены действительные концентрационные напоры δX_i и среднее по каналам $\langle \delta X_i \rangle$ (скобки $\langle \dots \rangle$ означают усреднение по каналам i). Если стандартное отклонение δX_i от средней величины мало в смысле неравенства (2e)

$$\frac{\langle (\delta X_i - \langle \delta X_i \rangle)^2 \rangle^{1/2}}{X(0) - X(h)} \ll 1, \quad (2e)$$

то для функций $X_i(l)$ на верхних концах каналов 2 (рис. 3) можно принять однородные граничные условия (2d). Для сокращения текста, соотношение (2d) далее рассматривается как точное условие $X_i(h) = X(h) = Const$, что позволяет математически корректно получить (16) и критерий (21). Чтобы замкнуть анализ, следует проверить, что неравенство (2e) выполнено, если высота колонны выбрана в соответствии с критерием (21). Проверка проводится с помощью соотношений (14) и (15b); учитывается, что концентрационные напоры пар–флегма пропорциональны $\Lambda^{sc} dX(l)/dl$, где Λ^{sc} – высота единицы переноса (ВЕР). Проверка носит элементарный характер и в излагаемый текст не включена. Легко показать, что левая часть в (2e) имеет порядок величины $1/p$, где $p = h/\Lambda^{sc}$ – каноническая высота канала. В численном примере, рассмотренном при обсуждении критерия (21), $p \sim 40$. Таким образом, в типичных случаях соотношения (2d) выполнены с точностью $1/p \sim 3 \cdot 10^{-2}$.

По определению, в идеальной многоканальной колонне 14 (рис. 3) параметры каналов 2 совпадают. Таким образом, выполнены соотношения: $m_i = m$ и $M_i = M$, где m_i и M_i – действительные, m и M – номинальные расходы флегмы и пара в канале. Также совпадают действительные j_i^X и номинальные j^X расходы целевого изотопа в каналах ($j_i^X = j^X$).

В силу конструктивных особенностей в действительной колонне с высокой точностью совпадают расходы флегмы m_i в каналах 2 (рис. 3), а также высоты h_i рабочих (мокрых) участков каналов (прил. 1 и 2). Однако имеет место перераспределение пара между каналами 2 ступени (рис. 3) и действительные расходы пара M_i в канале i отклоняются от номинала M . При изготовлении ступени сопротивления потоку пара сухих каналов 2 (рис. 3) подгоняются под общий стандарт (прил. 2), но в рабочем режиме (при орошении каналов) однородность гидродинамических сопротивлений каналов потока пара нарушается.

Во–первых, при орошении появляются систематические поправки к гидродинамическому сопротивлению насадки. Во–вторых, насыпная насадка имеет неоднородную плотность. При орошении возникают вариации неоднородностей и некоторое перераспределение пара между каналами. Подобный дефект канала можно ослабить за счет статистических эффектов, укладывая насадку послойно. Например, в канале 2 (рис. 3) при характерной высоте 1 м насадку можно уложить слоями толщиной ~ 5 см; тогда число слоев q равно 20 и стандартное отклонение δM расходов пара M_i по каналам от номинала имеет априорную оценку

$$\frac{\delta M}{M} \sim 3 \frac{\delta H}{H} \frac{1}{q^{1/2}}, \quad (3)$$

где $\delta H \sim 0,1$ мм – толщина пленки, текущей по насадке, $H \sim 2$ мм – характерный поперечник канала, сформированного в насадочном объеме (например, при использовании насадки Левина размером $2 \times 2 \times 0,3$ мм). Согласно (3), достижимы численные величины $\delta M/M \sim 2 \cdot 10^{-2}$. При этом между параметрами $\delta M/M$ и ε выполнено соотношение $\delta M/M \gg \varepsilon$. Излагаемый ниже анализ и расчет колонны 14 (рис. 3) выявляет, что последнее соотношение приводит к конструктивным ограничениям при выборе высоты колонны 14 в виде критерия (21).

Колонна 14 (рис. 3) есть ансамбль связанных условиями (2) каналов, поэтому характеристики ступени формируются при усреднении индивидуальных характеристик каналов 2. Ниже из-

лагается расчет колонны 14, учитывающий эффекты усреднения. Конструкция ступени (см. прил. 1–3) позволяет принять условия, фиксирующие режим колонны 14, в виде

$$h_i = h = \text{Const}, \text{ а также} \quad (4a)$$

$$m_i = m, \quad M_i = M - \Delta M_i = M(1 - \xi_i), \quad (4b)$$

где $i = 1, \dots, N$ – номер канала, h_i и h – действительная и номинальная высота рабочего (мокрого) участка канала i (поз. 2, рис. 3), m и M – номинальные расходы флегмы и пара в канале ступени, ξ_i – набор случайных величин, описывающих неоднородность расходов пара по каналам i . Полный расход пара в колонне 14 (рис. 3) задан режимом конденсатора 3 (рис. 1); он не меняется при перераспределении пара по каналам ступени, что дает соотношение

$$\sum_{i=1}^n \xi_i = 0 \quad (5a)$$

Набор величин ξ_i (4b) определяет дисперсию $\langle \xi_i^2 \rangle$, а также “воспроизводимость” $\bar{\xi}$:

$$\langle \xi_i^2 \rangle = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \xi_i^2 \right), \quad \bar{\xi} = \max |\xi_i| \quad (5b,c)$$

Величины ξ_i и $\bar{\xi}$ рассматриваются как малые параметры модели.

В ступени, показанной на рис. 3, возникает коллективный эффект, который качественно характеризует лемма 1. Пусть g – некоторая характеристика канала 2 (например, потенциал разделения); g есть функция параметров $(h_i, M_i, m_i, \xi_i, \dots)$, фиксирующих состояние канала, причем выполнены условия (4) и заданы граничные условия (2a–2d). Пусть g_i – характеристика g действительного канала i . В силу перечисленных условий g_i есть функция ξ_i и только ξ_i , то есть $g_i \equiv g(\xi_i)$. Справедлива лемма 1.

Лемма 1. Пусть для каналов i короткой многоканальной колонны 14 (рис. 3) выполнены условия (2), (4) и характеристика ступени G есть усредненная по каналам величина $g_i \equiv g(\xi_i)$:

$$G = \frac{1}{N} \cdot \left(\sum_{i=1}^n g(\xi_i) \right) \equiv \langle g(\xi_i) \rangle. \quad (6)$$

Тогда при малых ξ_i $G \cong g(0)$, при этом старшая по ξ_i поправка к величине G на перераспределение пара пропорциональна дисперсии $\langle \xi_i^2 \rangle$, определенной (5b).

Доказательство. Так как $g_i \equiv g(\xi_i)$, то разложение $g_i \equiv g(\xi_i)$ по степеням ξ_i позволяет, используя (5a,b), представить G в виде

$$G = g(0) + \frac{\partial g}{\partial \xi} \cdot \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \xi_i \right) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 g}{\partial \xi^2} \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \xi_i^2 \right) + \dots \cong g(0) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 g}{\partial \xi^2} \cdot \langle \xi_i^2 \rangle \quad (7)$$

Смысл леммы 1 поясняет численный пример. Пусть достижима однородность расходов пара в каналах i с точностью $\sim 1\%$ ($|\xi_i| \sim 10^{-2}$), причем в разложении (7) можно опустить поправки третьего порядка по ξ_i . Тогда поправка к характеристике G на перераспределение пара имеет порядок $\langle \xi_i^2 \rangle \sim 10^{-4}$, что меньше величины $\varepsilon \sim 4 \cdot 10^{-3}$ (табл. 1). Опираясь на лемму 1, можно допустить, что существуют конструктивные варианты ступени (рис. 3), для которых эффекты перераспределения пара малы, а ступень почти эквивалентна идеальной. В п. 3.3 установлен уточняющий лемму 1 критерий (21). Выполнение критерия (21), обеспечивает близкие характеристики идеальной и действительной колонны 14 (рис. 3).

3.2 Уравнение канала

Теория насадочной колонны разделения изотопов изложена, например, в [18]. В теории массообмена в насадочных колоннах состояние пара и флегмы описывается усредненными концентрациями целевого изотопа в жидкой и паровой фазе, которые определяются по истинным локальным концентрациям x^* и X^* , описывающим флегму и пар. В задачах переноса величины x и X вводятся с помощью “усреднения по потоку”, определяемого равенствами (8а–8с). Пусть задан некоторый канал с потоком паровой фазы, Σ – выделенная площадка, целиком лежащая в канале, \vec{n} – единичный вектор, нормальный к площадке Σ , \vec{V} – поле скоростей пара, $(\vec{V} \cdot \vec{n})$ – скалярное произведение векторов \vec{V} и \vec{n} , ρ – плотность числа атомов общего азота в паровой фазе. Поток f общего азота через площадку Σ определен как интеграл

$$f = \int_{\Sigma} \rho \cdot (\vec{V} \cdot \vec{n}) d\Sigma \quad (8a)$$

Расход общего азота через площадку Σ определен как $|f|$. Поток f^X целевого азота через площадку Σ определен соотношением

$$f^X = \int_{\Sigma} \rho X^* \cdot (\vec{v} \cdot \vec{n}) d\Sigma, \quad (8b)$$

где X^* – истинная концентрация целевого изотопа в паровой фазе. Расход целевого азота через площадку Σ определен как $|f^X|$. Отношение

$$X = \int_{\Sigma} \rho X^* \cdot (\vec{V} \cdot \vec{n}) d\Sigma / \int_{\Sigma} \rho \cdot (\vec{V} \cdot \vec{n}) d\Sigma \equiv f^X / f \quad (8c)$$

определяет величину X – концентрацию целевого изотопа в паровой фазе, усредненную по потоку на площадке Σ . Аналогично определяется усредненная по потоку концентрация x целевого изотопа в жидкой фазе. Для физически тонкого канала i с потоками пара и флегмы соотношения (8а–8с) определяют функцию $X_i(l)$ (или $x_i(l)$) – концентрацию ^{15}N в общем азоте пара (или флегмы), усредненную по потоку пара (или флегмы) в сечениях l канала.

Наконец, усреднение по потоку истинных концентраций на площадках, полученных в пересечении плоскости l и граничных полосок, примыкающих к поверхностям раздела фаз, определяет функции $X_i^\Gamma(l)$ и $x_i^\Gamma(l)$ – усредненные концентрации целевого изотопа в газовой и жидкой фазах на границах пар–флегма. Определены концентрационные напоры $\delta X_i(l) = X_i(l) - X_i^\Gamma(l)$ между “ядром” и границей газового потока и $\delta x_i(l) = x_i^\Gamma(l) - x_i(l)$ между границей и “ядром” потока флегмы. Полное описание канала i дает набор функций

$$X_i(l), X_i^\Gamma(l), x_i(l) \text{ и } x_i^\Gamma(l) \quad (8d)$$

Концентрация целевого изотопа на поверхности раздела жидкой и паровой фаз испытывает скачок. В дистилляционной колонне граница пар–флегма квазиравновесна, поэтому величина скачка рассчитывается по равновесным коэффициентам распределения α [18,20]. В данном разделе обсуждается головная колонна дистилляционной установки разделения изотопов. В головной колонне справедлива оценка $x^\Gamma(l) \ll 1$, поэтому функции $x^\Gamma(l)$, $X^\Gamma(l)$ подчиняются упрощенному условию

$$X^\Gamma(l) = \alpha x^\Gamma(l), \quad (9)$$

где $\alpha = (1 - \varepsilon)$ – табличный коэффициент распределения целевого ^{15}N в системе флегма–пар.

Многоканальная колонна 14 ступени (рис. 3) выполнена на базе “стандартного” канала диаметром 25–70 мм с нерегулярной насыпной насадкой. Для подобных каналов эффекты поперечной неоднородности малы. Таким образом, канал 2 можно считать физически тонким (см. разд. 2). Уравнения изотопного обмена (см. [18]) для стационарного физически тонкого канала i насадочной колонны в приближении (9) сводятся к релаксационному уравнению первого порядка для функции $X^{\Gamma_i}(l)$ (или другой функции из набора (8d))

$$(m - M) X^{\Gamma_i}(l) + (\varepsilon + \xi_i) m X^{\Gamma_i}(l) + m \Lambda^{\text{sc}} \frac{d}{dl} X^{\Gamma_i}(l) = j^X_i, \quad (10)$$

где l – вертикальная координата (2), Λ^{sc} – линейный масштаб (высота единицы переноса, ВЕП); j^X_i – действительный расход целевого изотопа (молей атомов ^{15}N /сек) в канале i ; m и M – номинальные расходы (молей атомов N /сек) флегмы и пара в канале; $(m - M)$ – номинальный расход общего азота в канале. Знак “+” перед ξ_i в (10) следует из определения ξ_i по (4b).

Необходимо уточнить смысл величин, входящих в (10). Например, ξ_i есть “локальный” параметр (характеристика индивидуального канала), тогда как номинальный расход m флегмы в канале есть характеристика ступени в целом. Номинальные величины $m - M$ и j^X – константы, заданные режимом отбора продукта в конце каскада колонн, входящих в установку разделения изотопов. Если J_{fin} и J^X_{fin} – расходы общего азота и целевого изотопа на участке отбора продукта последней колонны каскада, то (как следствие законов сохранения) номинальные расходы общего азота $j \equiv m - M$ и целевого изотопа j^X в канале ступени подчиняются соотношениям

$$X_{\text{fin}} = J^X_{\text{fin}} / J_{\text{fin}}, \quad j \equiv m - M = J_{\text{fin}} / N, \quad j^X \equiv J^X_{\text{fin}} / N \quad \text{и} \quad j^X \equiv X_{\text{fin}} \cdot j, \quad (11)$$

где N – число каналов 2 ступени (рис. 3), X_{fin} – концентрация ^{15}N в отобранном полезном продукте. В силу (11) номинальные расходы j^X и j в каналах 2 (рис. 3) следует считать “глобальными” переменными установки разделения изотопов. Действительные расходы целевого изотопа j^X_i в каналах i ступени отклоняются от номинала j^X , но связаны соотношением

$$\sum_{i=1}^N j^X_i = J^X = N j^X \quad (12)$$

Уравнение (10) можно получить, опираясь на законы сохранения общего азота и целевого изотопа в стационарной задаче о массопереносе и изотопном обмене в канале дистилляционной колонны. В таком подходе линейный масштаб Λ^{sc} в (10) рассматривается как эмпирический подгоночный параметр, характеризующий используемую насадку. Для некоторых каналов с пуазейлевскими течениями пара и флегмы параметр Λ^{sc} в (10) вычисляется из первых принципов ([18], п. 2.9). Однако в практике разделения изотопов методом ректификации известны главным образом колонны с нерегулярными насадками (исключения составляют метод получения дейтерия низкотемпературной дистилляцией водорода в тарельчатой колонне и двухтемпературный метод получения тяжелой воды в колоннах с ситчатыми тарелками).

Параметр Λ^{sc} для каждого типа нерегулярной насадки измеряют в специально поставленных экспериментах ([18] гл. 2 и п. 2.12). Технические характеристики нерегулярных насадок обсуждаются в [18]. Насадки дистилляционных колонн разделения изотопов обычно характеризуются величиной ВЕП $\Lambda^{\text{sc}} = 20\text{--}30$ мм. Величина Λ^{sc} зависит от нагрузки, оцениваемой, например, по скорости пара U в канале. В интервале нагрузок $(U^{\text{min}}, U^{\text{max}})$, отвечающих рабочим режимам канала, параметр $\Lambda^{\text{sc}} = \Lambda^{\text{sc}}(U)$ обычно слабо зависит от скорости пара U . Насадки некоторых типов характеризуются функциями $\Lambda^{\text{sc}}(U)$, имеющими на интервале рабочих нагрузок $(U^{\text{min}}, U^{\text{max}})$ максимумы и минимумы [18].

Следует уточнить, что в насадочных колоннах разделения изотопов используют рабочие режимы со стационарными потоками флегмы и пара. Интервал нагрузок колонны изотопного обмена, обеспечивающих устойчивый стационарный гидродинамический режим, устанавливаются опытным путем. Вопрос устойчивости рабочего режима канала нетривиален. Например, испытания некоторых колонн разделения изотопов углерода методом низкотемпературной дистилляции жидкой окиси углерода СО выявили, что течение флегмы по насадке (при формально рабочей нагрузке) может терять устойчивость [14]. Неустойчивость проявляется как переход к волновому режиму течения флегмы по насадке, при котором “задержка” (масса флегмы в заданном объеме насадки) испытывает периодические колебания. Очевидно, использование нового рабочего тела (жидкой двуокиси азота) в колонне разделения изотопов потребует проведения исследования гидродинамических режимов каналов.

3.3 Разделительная способность ступени

Исходя из уравнения (10), можно провести расчет разделительной способности ступени, то есть короткой многоканальной колонны 14 (рис. 3). Чтобы упростить выкладки, принимается: ступень принадлежит головной колонне установки разделения изотопов; установка выполнена как достаточно длинный каскад колонн; в каскаде достигается обогащение полезного продукта до концентраций $X^{\text{fin}} \sim 1$.

Ступеням головной колонны (рис. 1) присваиваются номера $k = 1, \dots, K$; счет ведется снизу вверх; нижняя и верхняя ступени имеют номера 1 и K . Концентрация целевого изотопа в паровой фазе на входе пара в каналы ступени k обозначается как X^k . Концентрация ^{15}N в паровой фазе на выходе каналов верхней ступени колонны обозначается X^{K+1} . Целевой изотоп концентрируется во флегме, поэтому $X^k > X^{k+1}$. Разность ΔX^k концентраций, измеренных в нижнем и верхнем сечениях ступени k , определена соотношением

$$\Delta X^k = X^k - X^{k+1} . \quad (13a)$$

В силу определения (13a) $\Delta X^k > 0$. Для функций $X_{i, \Gamma}^k(l)$, входящих в (10) и описывающих каналы i ступени k , далее используется упрощенная запись $X_{i, \Gamma}^k(l) \equiv X_i(l)$. Для набора функций $X_i(l)$ выполнены однородные граничные условия (2a) и (2d)

$$X_i(0) = X^k = \text{const} , \quad X_i(h) \cong X^{k+1} = \text{const} . \quad (13b)$$

Из (10), (13a) и (13b) следует представление $X_i(l)$

$$X_i(l) = X^k - \Delta X^k \cdot \frac{1 - \exp(-\chi_i l / \Lambda^{\text{sc}})}{1 - \exp(-\chi_i h / \Lambda^{\text{sc}})} , \quad \text{где } \chi_i = \xi_i + \varepsilon + (m - M) / m . \quad (14)$$

Удобно ввести параметр j^X_i / m – расход целевого изотопа в канале i , нормированный на единичный расход флегмы в канале. Уравнение (10) позволяет решить “обратную задачу”: по известному решению (14) найти j^X_i . Расчет j^X_i в точке $l = 0$, дает соотношение

$$\frac{j^X_i}{m} = \chi_i X^k + \Lambda^{\text{sc}} \left. \frac{dX_i(l)}{dl} \right|_{l=0} . \quad (15a)$$

Производная в (15a) с помощью (14) приводится к виду

$$\Lambda^{\text{sc}} \left. \frac{dX_i(l)}{dl} \right|_{l=0} = - \frac{\Delta X^k}{p} \frac{\chi_i p}{1 - \exp(-\chi_i p)} , \quad \chi_i = \xi_i + \varepsilon + j / m , \quad (15b)$$

где j – номинальный расход общего азота в канале; $p = h/\Lambda^{sc}$ – каноническая высота канала (измеряемая в единицах Λ^{sc}). Усреднение (15а) по каналам ступени с учетом (5) и (15б) дает соотношение между параметрами ступени X^k , X^{k+1} и “глобальными” параметрами m , j и j^X

$$\frac{j^X}{m} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{j^{X_i}}{m} = \left(\varepsilon + \frac{j}{m} \right) X^k - F \cdot \frac{\Delta X^k}{p} \quad (16)$$

Согласно (11) и (12) “глобальный” параметр j^X – номинальный расход целевого изотопа в канале, X^k и ΔX^k определены в (13а,б). Формактор F ступени определен в (16) как среднее:

$$F = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{\chi_i p}{1 - \exp(-\chi_i p)} \right) \right] \quad (17)$$

Принимается, что зависимость ВЕП (Λ^{sc}) от расхода пара незначительна, поэтому каноническая высота канала p не зависит от номера канала i . Реальный интерес представляет расчет суммы (17) в приближении ($\bar{\xi}$ определено в (5с))

$$\varepsilon \ll \bar{\xi} \quad \text{и} \quad j/m \ll \varepsilon \quad (18a)$$

Действительно, для указанных в табл. 1 рабочих тел $\varepsilon \cong 4 \cdot 10^{-3}$. В то же время, по оценке (3), в воспроизводимость расходов пара в каналах i ступени лучшем случае имеет уровень $\bar{\xi} = \max |\xi_i| \sim 10^{-2}$. При предварительном анализе следует принять пессимистическую оценку, например $\bar{\xi} = 5 \cdot 10^{-2} \gg \varepsilon$. Приведенное рассуждение поясняет выбор первой из оценок (18а). Далее, из соотношений (11) и (12) следует $j^X = j \cdot X^{fin}$, что дает оценку

$$j/m \cdot X^k = j/m \cdot X^{fin} \cdot (X_k / X^{fin}) \ll j^X / m.$$

В стандартной теории j^X имеет представление $j^X / m = \theta \varepsilon X^k$, где θ – т. н. “коэффициент использования пара”. Величина θ определяется задачей оптимизации канала; обычно θ выбирается в интервале $0,5 < \theta < 0,8$. Из последних соотношений следует вторая из оценок (18а).

Величины ξ_i принадлежат (см. (5б), (5с)) интервалу $-\bar{\xi} < \xi_i < \bar{\xi}$. В простейшем варианте вероятность $P(\xi_i)$ обнаружить некоторое ξ_i описывается прямоугольной гистограммой

$$P(\xi_i) = \text{const при } |\xi_i| < \bar{\xi} \quad \text{и} \quad P(\xi_i) = 0 \quad \text{при } |\xi_i| > \bar{\xi}. \quad (18b)$$

Замена в (17) суммы интегралом позволяет получить модельную оценку формактора ступени $F = F(z)$ в виде

$$F(z) = \int_0^z \left(\frac{t}{\exp(t) - 1} + \frac{t}{1 - \exp(-t)} \right) \frac{dt}{2z}, \quad \text{где} \quad z = \frac{\bar{\xi} h}{\Lambda^{sc}} \quad (19)$$

Значения функции $F(z)$ на интервале $0 < z < 5$ приведены в табл. 2.

3.4 Расчет головной колонны

В приближении (18а,б) соотношения (16) принимают вид

$$\frac{j^X}{m} = +\varepsilon X^k - F(z) \frac{\Delta X^k}{p}, \quad \text{где} \quad z = \frac{\bar{\xi} h}{\Lambda^{sc}} \quad \text{и} \quad p = h / \Lambda^{sc} \quad (20)$$

Численная оценка $F(z)$ дана в табл. 2. Соотношения (11), (12), (19) и (20) определяют разностную схему, позволяющую по заданным “глобальным” параметрам отбора J^X и J и концентрации целевого изотопа X^{K+1} в верхнем буфере колонны (рис. 1) вычислить перепады концентраций ΔX^k и концентрации X^k для всех ступеней k колонны. После выбора высоты h колонны

14 ступени формфактор F вычисляется с помощью (19). Эффективность ступени тем выше, чем выше точность $\bar{\xi}$, с которой воспроизводятся расходы пара в каналах колонны 14 (рис. 3).

Таблица 2. Значения модельного формфактора $F(z)$ на интервале $0 < z < 5$

| z | 0.5 | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 3.0 | 4.0 | 5.0 |
|--------|-------|-------|------|-------|------|-------|------|
| $F(z)$ | 1.006 | 1.027 | 1.06 | 1.106 | 1.23 | 1.387 | 1.57 |

Соотношения (20) и табл. 2 показывают, что перераспределение пара между каналами колонны 14 снижает эффективность ступени. Из табл. 2 следует, что критерий

$$z \equiv \bar{\xi} \cdot p \equiv \frac{\bar{\xi} \cdot h}{\Lambda^{sc}} \leq 2 \quad (21)$$

имеет следствием оценку $1 < F(z) \leq 1,1$. Из соотношений (20) следует, что при выполненном критерии (21) перепад концентраций ΔX^k в действительной ступени (рис. 3) не более, чем на 10% ниже, чем в идеальной ступени с идентичными каналами 2. Таким образом, критерий (21) выделяет многоканальные короткие колонны, разделительная способность которых снижена относительно номинальной величины не более чем на 10%, что технически приемлемо.

Можно уточнить математический смысл формального критерия (21), отмечая, что (21), как следствие определения $p = h / \Lambda^{sc}$, эквивалентно соотношению

$$h \leq 2 \Lambda^{sc} / \bar{\xi}.$$

Уравнение (10) для канала i содержит индивидуальную длину релаксации $L_i = \Lambda^{sc} / |\chi_i|$, причем $L^{\min} = \Lambda^{sc} / \bar{\xi}$ есть наименьшая длина релаксации для каналов 2 (рис. 3). Выбор h по (21) ограничивает высоту колонны 14 (рис. 3) величиной порядка $L^{\min} = \Lambda^{sc} / \bar{\xi}$. С формальной точки зрения, выбор высоты колонны h по критерию (21) позволяет описывать характеристики “среднего” канала i разложениями по степеням $\xi_i / \bar{\xi} = \pm L_i / h$, в которых достаточно удерживать два–три члена. Т.о., критерий (21) обеспечивает выполнение условий леммы 1 и, как следствие, малые поправки к характеристикам ступени на перераспределение пара.

Критерий (21) имеет простой конструкторский смысл. Уравнение (10) определяет вертикальный размер $L_i = \Lambda^{sc} / \chi_i$. Физически L_i есть максимальная высота рабочего участка канала i при заданном χ_i . Одноканальная колонна описывается уравнением (10), где $\xi_i \ll \varepsilon$, поэтому параметр $h^0 = \Lambda^{sc} / \varepsilon$ рассматривается как характерная высота “стандартной” одноканальной колонны. В идеальной многоканальной колонне перераспределение пара отсутствует, каналы идентичны, поэтому ее высота также равна $h^0 = \Lambda^{sc} / \varepsilon$. При включении в исходной идеальной колонне перераспределения пара рабочий участок в канале i сжимается по высоте и занимает часть канала высотой $L_i = \Lambda^{sc} / \chi_i$. Его доля по высоте колонны составляет ε / χ_i . Поскольку $\varepsilon / \bar{\xi} \ll 1$, то значительная или даже большая часть насадки работает вхолостую. По логике конструктора неработающие участки каналов следует удалить. Эти соображения подводят к поиску критериев вида (21). Соотношение (21) можно выразить через характерную высоту одноканальной колонны h^0 и “переключатель” $\varepsilon / \bar{\xi}$:

$$h \leq 2 \frac{\Lambda^{sc}}{\bar{\xi}} = 2 \frac{\varepsilon}{\bar{\xi}} h^0.$$

Таким образом, оптимизация колонны 14 (рис. 3), вначале составленной из одноканальных колонн с высотой h^0 , выглядит как сжатие ее исходной высоты в отношении $\sim \varepsilon / \bar{\xi}$.

Критерий, по смыслу близкий (21), можно получить из “физических” соображений, отслеживая формирование расходов целевого изотопа в каналах колонны 14 (рис. 3). Удобно принять классификацию, в которой канал 1 “хуже” канала m , если $|\xi_1| > |\xi_m|$ (см. определения (4а)–(5с)). В колонне 14 выделим симметричную пару каналов с номерами 1 и m , удовлетворяющих условиям: $\xi_1 \cong \bar{\xi}$, $\xi_m \cong -\xi_1$. Очевидно, выбранные каналы 1, m относятся к группе наиболее “плохих” каналов, лежащих вблизи границ распределения по ξ_i .

Если колонна достаточно высокая, то рабочие участки “плохих” каналов находятся в их нижней или верхней части. Вычисление расходов j_1/m и j_m/m для симметричной пары каналов 1 и m удобно проводить, соответственно, в верхнем и нижнем сечениях, опуская в (15а) производные. Таким образом, сумма расходов $j_1/m + j_m/m$ получает оценку

$$(j_1 + j_m) / m \cong \varepsilon \cdot 2X_k - \bar{\xi} \cdot \Delta X_k. \quad (22a)$$

Выражение (22а) показывает, что в симметричных парах “плохих” длинных каналов имеет место обратный (снизу вверх) перенос целевого изотопа, определяемый тем, что в нижней части каналов содержится относительно обогащенное рабочее тело.

Пусть почти идеальный лучший канал i^* колонны 14 (рис. 3) оптимизирован, например, при выборе параметра относительного отбора $\theta_{i^*} \cong 1/2$. Тогда перепад концентраций ΔX_k между нижним и верхним сечением колонны 14 (рис. 3) имеет вид $\Delta X_k \cong 1/2 p \varepsilon X_k$, где p – каноническая высота канала 2. Таким образом, сумма в (22а) получает оценку

$$(j_1 + j_m) / m \cong (2 - 1/2 p \cdot \bar{\xi}) \varepsilon \cdot X_k, \quad (22b)$$

имеющую смысл при $p \geq 2$. Из (22b) следует, что при $p \cdot \bar{\xi} = 4$ симметричные пары наиболее “плохих” каналов работают вхолостую. Поэтому высоту колонны следует выбирать в области параметров, ограниченных условием $p \cdot \bar{\xi} < 4$. Точный расчет дает более строгий критерий (21).

Для конкретной оценки высоты h канала 2 (рис. 3) в (21) принимается $z = 2$, величина ВЕП $\Lambda^{sc} = 25$ мм. Для параметра $\bar{\xi}$ выбирается “пессимистическая” оценка $\bar{\xi} \leq 5 \cdot 10^{-2}$ (гидродинамическое сопротивление орошаемых каналов 2 (рис. 3) потоку пара воспроизводится с точностью $\sim 5\%$). В данном варианте из (21) следует

$$h = 2 \Lambda^{sc} / \bar{\xi} \cong 1 \text{ м}.$$

По изложенным оценкам колонна 14 имеет конструктивно приемлемую высоту $h \cong 1$ м. При $z = 2$ разделительная способность ступени 14 (рис. 3) и колонны в целом примерно на 10 % ниже, чем у идеального аппарата тех же размеров (табл. 3). Чтобы добиться совпадения характеристик реальной и исходной идеальной ступени, достаточно увеличить на 10 % число каналов 2 колонны 14 (рис. 3) либо число ступеней колонны 1 (рис. 1).

Колонна изотопного обмена (рис. 1) может состоять из 10–11 ступеней, представленных на рис. 3; тогда сумма высот колонн 14 (рис. 3) достигает ~ 10 м, что совпадает с высотой выполненных одноканальных колонн. С учетом суммы высот смесителей 15, вертикальный размер колонны на 30–50 % больше, чем у одноканальной колонны, однако остается в диапазоне высот ~ 10 –15 м, характерном для одноканальных колонн разделения изотопов.

4 Обсуждение

В 50–е годы прошлого столетия была разработана одноканальная насадочная колонна для получения изотопов кислорода методом дистилляции воды (КМДВ) [18]. В течение длительного времени рабочий канал колонны и другие ее элементы проходили тщательную отработку. Таким образом, КМДВ оценивается как доказанно работоспособный аппарат. В патенте [1] предложена многоканальная колонна разделения изотопов большой размерности, выполняемая на базе рабочего канала КМДВ. В данной работе рассмотрено применение колонны патента [1] для получения изотопа азота ^{15}N методом дистилляции жидкой двуокиси азота. Предлагаемая технология изотопа ^{15}N имеет три главные особенности:

- выделение целевого ^{15}N методом дистилляции жидкой двуокиси азота;
- реализация метода с помощью колонны разделения изотопов большой размерности;
- генерация тепловых потоков в конденсаторе и испарителе колонны разделения изотопов с помощью абсорбционной холодильной машины (теплового насоса); таким образом, колонна работает в связке с тепловым насосом.

Анализ, изложенный в настоящей работе, не выявляет явных технологических трудностей или чрезмерно сложных конструктивных элементов новой колонны, которые служили бы препятствием для реализации обсуждаемой технологии изотопа ^{15}N . Наибольший интерес представляют расчетные экономические показатели новой технологии, изложенные в приложении 4. В расчеты заложено, что в качестве теплового насоса, генерирующего тепловые потоки в дистилляционной колонне разделения изотопов, используется абсорбционная бромистолитиевая холодильная машина (АБХМ). В варианте с бесплатным отпуском потребляемого АБХМ низкопотенциального тепла расчетная стоимость целевого изотопа ^{15}N достигает исключительно низких значений ~ 10 долл/г–ат ^{15}N . Даже в варианте с оплатой низкопотенциального тепла и использованием дополнительной исчерпывающей колонны стоимость ^{15}N имеет приемлемую величину $\sim 15\text{--}20$ долл/г–ат ^{15}N . Возможно, новая технология решает проблему производства дешевого изотопа азота ^{15}N для нужд ядерной энергетики.

Теоретическая схема колонны, изложенная в разделе 3, не вызывает вопросов. Однако необходимо выполнить ряд контрольных экспериментов, после проведения которых может появиться уверенность, что при реализации “в металле” колонна будет иметь предсказываемые характеристики. В первую очередь, нужно выделить два эксперимента по измерению технических констант, по которым оценивается трудоемкость выполняемой колонны и доля капитальных затрат в стоимости целевого ^{15}N .

1. Необходимо в эксперименте обосновать реальную точность $\bar{\xi}$, с которой воспроизводится гидродинамическое сопротивление потоку пара орошаемого канала 2 (рис. 3) многоканальной колонны 14. Параметр $\bar{\xi}$ входит в критерий (21), устанавливающий предельную высоту короткой многоканальной колонны 14 (рис. 3). По предварительным оценкам воспроизводимость расходов пара в каналах ступени может иметь величину $\bar{\xi} \sim 5\%$, при этом высота короткой многоканальной колонны 14 (рис. 3) достигает ~ 1 м. Однако необходимо экспериментальное обоснование воспроизводимости $\bar{\xi}$, включая измерения дрейфа этой характеристики при длительной работе ступени.

2. Колонна может обеспечить низкую стоимость целевого изотопа ^{15}N при ресурсе насадки $\sim 10\text{--}20$ лет. Вплоть до настоящего времени насадки для работы в жидкой двуокиси азота не испытывались и опытные данные по ресурсу и стоимости подобных насадок отсутствуют. Ресурс колонны следует считать одним из критичных параметров предлагаемой технологии изотопа ^{15}N . Отсутствие насадки с ресурсом 10–20 лет может оказаться опровержением всей технологии или, по крайней мере, ухудшить ее показатели. Насадку для колонны с рабочим телом в виде жидкой двуокиси азота необходимо выполнять из металлов и сплавов, имеющих наивысшую стойкость в жидкой и парообразной двуокиси азота. Работа [19] содержит последние данные по группе металлов и сплавов, “совершенно стойких” до температур $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (имеющих скорость коррозии < 1 мкм/год) в жидкой двуокиси азота и красной дымящей азотной кислоте. В указанную группу входят сплавы системы FeCr17Ni10Si5, содержащие $\sim 5\%$ Si, сплавы системы W–Cr, Zr и ряд других металлов и сплавов. Полагая, что проволочная насадка (например с размерами $2^{\times}2^{\times}0.3$ мм) выполнена из подобных материалов, и опираясь на данные работы [19], можно предложить (очевидно оптимистическую) оценку ресурса насадки 20–30 лет. Эта оценка нуждается в опытной проверке. Следует учесть, что данные работы [19] получены на коротком временном интервале для квазистатических условий коррозии. Поэтому требуется натурное изучение коррозии кандидатных насадок в условиях реальной колонны, т. е. при имитации действительного гидродинамического режима орошения канала и при реальном содержании агрессивных примесей в жидкой двуокиси азота.

5 Приложение 1. Делитель потока флегмы

Устройство делителя потока флегмы показано на рис. 2. Делитель служит для точной дозировки расходов флегмы в рабочих каналах 2 (рис. 3).

В делитель входят: опорная плита 1 с верхними опорами 2, коробчатый несущий корпус 3 с нижними опорами 4, монтажная панель 5 и элементы 14 для установки рабочих элементов. Приемный узел включает: коробку 21 с плоским днищем (в которой условно различается длинная и короткая стороны), охранную крышку корпуса 20, один или несколько рассекателей 18, подводящую трубку 15, по которой флегма с выхода конденсатора 3 (рис. 1) поступает на вход делителя, а также входные патрубки трубок 6.

Рассекатели 18 установлены в корпусе 21 параллельно длинной стороне и делят приемную коробку на входную камеру 16 и рабочий отсек 17. Рассекатель 18 выполнен, например, из двух перфорированных пластин, между которыми уложена насыпная насадка. В днище рабочего отсека 17 выполнены окна 19 (по числу рабочих каналов 6 колонны 1 на рис. 1), расположенные в один или нескольких рядов вдоль длинной стороны коробки 21. Окна 19 соединены с концами входных патрубков трубок 6.

Трубка 6 вводится входным и выходным патрубками в окно 19 и в соответствующее окно ячейки 12 и соединяется с окнами сваркой. Торцевой входной патрубок трубки 6 совмещен с верхней кромкой окна 19. Торцевой выходной патрубок (дополнительно помеченный на рис. 3 отметкой h_2) размещен выше плоскости разъема коробка 22 – крышка 20. После сборки делителя торцы 11 обрабатываются на плоскошлифовальном станке и выполняются в плоскости, параллельной плоскости опор 4. Во входном патрубке каждой трубки 6 на пробках 8 установлена калиброванная по гидродинамическому сопротивлению (т.е. по внутреннему диаметру и

длине) трубка 7. В выходном патрубке трубки 6 помещается патрон 9 с перфорированным дном, в который на $\sim 1/2$ высоты уложена насыпная насадка 10, например шарики.

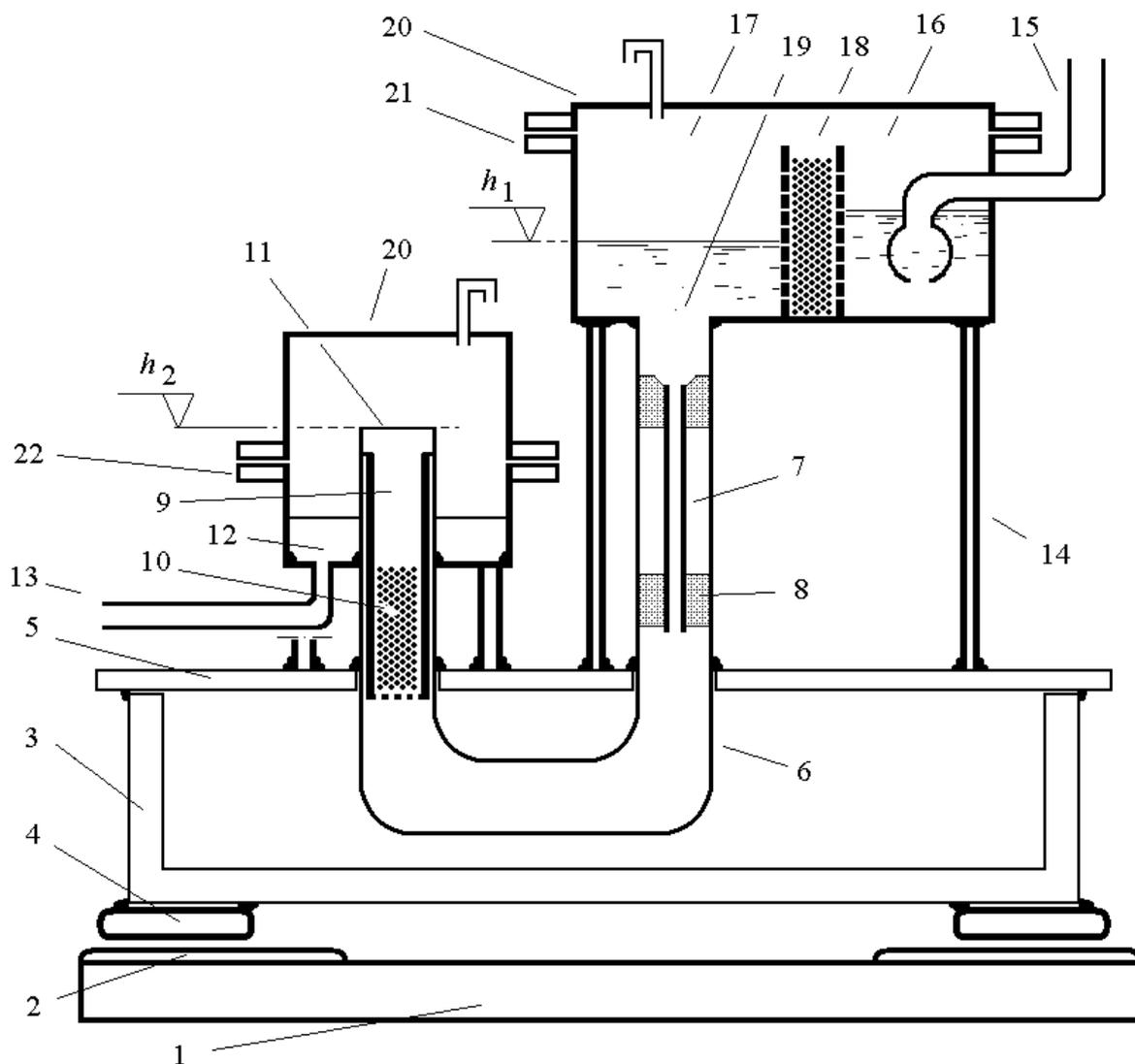


Рис. 2. Делитель потока флегмы

Раздаточный узел включает: коробку 22 (в которой также выделены длинная и короткая стороны), охранную крышку 20, выходные патрубки трубок 6 и набор раздаточных трубок 13. Днище коробки 22 разбито (например штамповкой) на заглубленные ячейки 12, расположенные в виде одного или нескольких рядов вдоль длинной стороны коробки 22. На дне каждой ячейки 12 выполнено окно под выходной патрубком трубки 6; в боковой части ячейки 12 выполнено отверстие, соединенное с входным концом раздаточной трубки 13. Выходные концы трубок 13 вложены в соответственные каналы 2 (рис. 3) верхней ступени колонны.

Работа делителя ясна из рис. 2. Флегма из конденсатора колонны по трубке 15 поступает в камеру 16, проходит рассекаль 18 (после которого в камере 17 создается однородное поле скоростей жидкости), распределяется по элементам 6 и перетекает к свободным торцам 11 выходных патрубков трубок 6. С торца 11 флегма стекает на дно ячейки 12 и приходит в раздаточную трубку 13, которая служит выходным каналом делителя. По трубкам 13 флегма переда-

ется на орошение соответствующих каналов верхней ступени колонны (см. поз. 1 и 2 на рис. 3). Конструкция делителя направлена на выравнивание расходов флегмы в трубках 13.

Ниже перечислены мероприятия, обеспечивающие точное дозирование флегмы в трубках 13 (рис. 2) и в рабочих каналах 6 (рис. 1) или 1 (рис. 3).

1. Верхние опоры 2 (рис. 2) обрабатываются на плоскошлифовальном станке и выполняются в одной плоскости. Нижние опоры 4 корпуса 3 выполняются по той же схеме. Промышленные плоскошлифовальные станки обеспечивают плоскостность ± 5 мкм/м (отклонение плоскости опор 2 или 4 от номинальной плоскости не превышает $\delta_1 = \pm 5$ мкм при расстоянии между крайними опорами 1 м).

2. После сборки делителя торцы 11 обрабатываются на плоскошлифовальном станке (при установке делителя опорами 4 на стол станка) и выполняются в плоскости, параллельной плоскости опор 4. Отклонение плоскости торцов от номинальной плоскости также не превышает величины $\delta_1 = \pm 5$ мкм при длине ряда торцов 1 м.

3. В первой (упрощенной) схеме монтажа на колонне делитель опорами 4 устанавливается на площадке 2 плиты 1, отnivelированные с помощью микронивелира. Точность микронивелирования достигает $\delta_2 = \pm 15$ мкм на базе 1 м (см. описание микронивелира МН – 3). В этом варианте ошибки п.п. 1–3 накапливаются, и случайное отклонение торцов 11 от расчетной горизонтальной плоскости может достигать $\delta_3 = \pm 30$ мкм/м. Во второй (улучшенной) схеме при монтаже делителя на колонне нивелируются торцы 11. В этом варианте ошибка положения торцов 11 относительно расчетной горизонтальной плоскости не превышает $\delta_3 = \pm 20$ мкм/м.

4. Расчетное гидродинамическое сопротивление дозирующей трубки 7 и отладочного патрона 9 выбирается из условия, чтобы при номинальном расходе жидкости в трубке 7 (рис. 3) разность вертикальной отметки уровня жидкости h_1 в отсеке 17 (рис. 2) и отметки торцов h_2 достигала величины $\Delta H = h_1 - h_2 \geq 100$ мм. Дозирующие трубки 7 калибруются по гидравлическому сопротивлению с точностью не хуже 5–10%. Патроны 9 заполняются насадкой на 1/2 высоты; длина патрона 9 и диаметр насадки 10 подбирается таким образом, чтобы исходное гидравлическое сопротивление патрона достигало ~ 20 –30 % номинального.

5. Диаметр торца 11 выбирается в интервале величин ≥ 30 мм. При данном диаметре и расчетном расходе флегмы в канале < 1 см³/с на торце 11 формируется ламинарный поток жидкости (т.к. число Рейнольдса $Re < 100$), при этом случайное отклонение расходов флегмы по каналам от номинальной величины управляется параметром $\delta_3 / \Delta H \sim \pm 0.00015 - 0.00030$ (определение δ_3 дано выше в п. 3), а также разбросом сопротивлений элементов 7 и 9.

6. Проводится финишная стендовая отладка делителя. Делитель устанавливается опорами 4 на эталонную горизонтальную площадку (либо на стенде нивелируются торцы 11). В трубку 15 подается жидкость – имитатор флегмы; расход жидкости в трубке 15 равен номинальному. Измеряется расход жидкости в каждой из трубок 13. Добавлением или удалением части насадки 10 в патронах 9 расход жидкости в трубках 13 подгоняется к общему стандарту.

Теоретически, изложенная методика изготовления и отладки делителя позволяет добиться на колонне совпадения расходов в выходных каналах делителя с относительной точностью $\sim 0,05$ %, во всяком случае с точностью не хуже 0,1 %. Рассуждения раздела 3 показывают, что при величине коэффициента обогащения $\varepsilon = 0,004$ указанная точность обеспечивает работоспособность колонны 14 (рис. 3).

6 Приложение 2. Контактная колонна рабочего модуля

На рис. 3 показана короткая многоканальная колонна 14 рабочего модуля. Колонна собирается из рабочих трубок 2 на базе несущей тарелки 7 и направляющей решетки 9 и устанавливается в верхней половине 8 разборного корпуса модуля. В трубки уложена насадка 3 из числа используемых в колоннах изотопного обмена, например, насадка Левина.

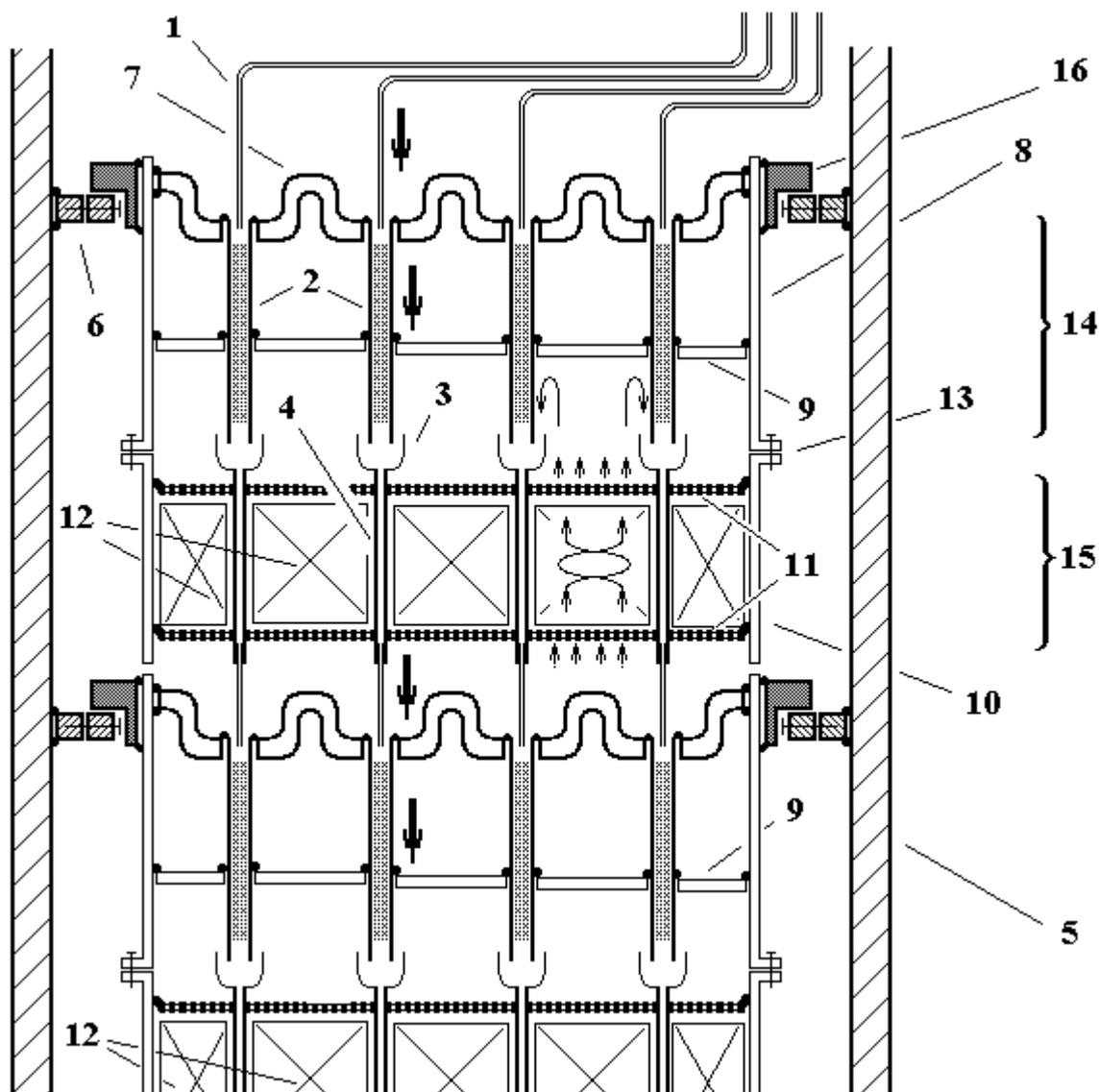


Рис. 3. Рабочий модуль колонны: 1 – раздаточная трубка; 2 – рабочий канал; 3 – стакан проходной трубки; 4 – проходная трубка; 5 – корпус колонны; 6 и 16 – опорные кольца; 7 – несущая тарелка; 8 и 10 – верхняя и нижняя секции корпуса модуля; 9 – направляющая решетка; 11 – дырчатые тарелки; 12 – насадочные рабочие элементы смесителя пара; 13 – фланцы; 14 – короткая многоканальная колонна модуля; 15 – смеситель пара модуля; тонкая и жирная стрелки – пар и флегма

Диаметр d рабочего канала 2 согласован с величиной коэффициента обогащения $\varepsilon \cong 0,004$ и принадлежит интервалу $d \sim 25-70$ мм. Фактически в качестве стандарта канала 2 принят ка-

нал, разработанный для колонн разделения изотопов кислорода методом дистилляции воды. Высота h столба насадки, уложенной в трубку 2, принимается в интервале $h \sim 1$ м (обоснование выбора дано в разд. 3).

Насадка выполняется из материала, “совершенно стойкого” в двуокиси азота (т.е. корродирующего со скоростью менее 1 мкм/год). В работе [19] опубликованы данные, по которым при температурах до 50 °С к группе материалов, “совершенно стойких” в жидкой и газообразной двуокиси азота, относятся: сплав 15X18Н12С4ТЮ, содержащий 18 % Cr и 4,5 % Si, сплав Ni–15 % Cr, содержащий 11 % Si, а также алюминий и обычный для ядерных технологий цирконий [19]. Разработанные в последние годы легированные иттрием фехралаи FeCrAlY, повидимому, также относятся к материалам, совершенно стойким в двуокиси азота до 50 °С. При изготовлении насадки можно использовать проволоку из указанных материалов диаметром 0,3 мм (300 мкм). Финишной операцией изготовления насадки может быть отжиг, направленный на отпуск напряжений и дефектов структуры, возникающих при навивке проволоки. Ожидаемый ресурс насадок, выполненных из подобных материалов, может достигать 20 лет. Опытные данные по ресурсу различных насадок в жидкой двуокиси азота в литературе не найдены.

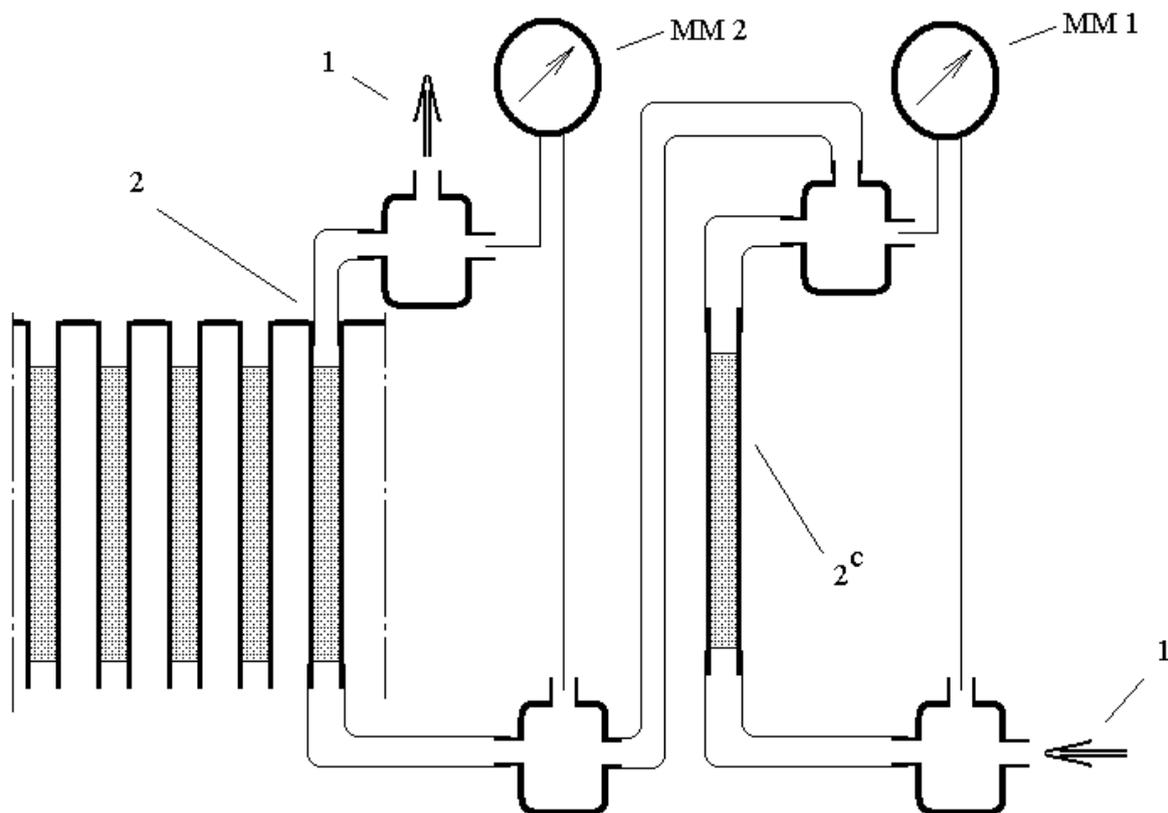


Рис. 4. Схема калибровки гидродинамического сопротивления рабочего канала колонны ступени: 1 – прокачка имитирующего газа; 2 и 2^c – калибруемый (рабочий) и эталонный каналы; MM1 и MM2 – микроманометры

При изготовлении короткой многоканальной колонны 14 предполагается ее финишная отладка, направленная на выравнивание гидродинамических режимов каналов 2. Для этого проводится калибровка гидродинамических сопротивлений сухих (или орошаемых) рабочих кана-

лов по эталонному каналу. Схема калибровки показана на рис. 4. После сборки колонны 14 и укладки насадки в трубки 2 проводится сравнение каналов 2 и эталонного канала 2^С. Испытуемый и эталонный канал включены в поток газа – имитатора пара последовательно. С помощью микроманометров ММ1 и ММ2 проводятся замеры перепадов давления ΔP , ΔP^C между концами испытуемого 2 и эталонного 2^С каналов при заданном расходе газа – имитатора пара. За счет добавления или отбора насадки в канале 2 его сопротивление подгоняется к стандарту канала 2^С.

Точность калибровки определяется чувствительностью дифференциальных манометров и величиной измеряемого перепада давлений ΔP . Скорость газа–имитатора в каналах 2 и 2^С может быть выбрана в интервале 0,5–1 м/сек. В подобном варианте перепад давлений на высоте насадочного столба $h \sim 1$ м достигает величины $\Delta P \sim 20$ –50 см вод. ст. Порог чувствительности дифференциальных микроманометров составляет 0,01 мм вод. ст. (см. описание микроманометра МКВК–250). Следовательно, теоретическая точность калибровки гидродинамических сопротивлений сухих каналов 2 (рис. 3) не хуже $\pm 0,01$ %. Практическая калибровка сопротивлений каналов, повидимому, может быть выполнена с точностью не хуже $\pm 0,1$ %, что соответствует ± 1 мм высоты h столба насадки, уложенной в канал 2. Изложенное в разд. 3 исследование работоспособности колонны показывает, что достаточно откалибровать гидродинамические сопротивления каналов 2 с точностью 1 %.

Для выравнивания вертикальных размеров рабочих (мокрых) участков каналов 2 (рис. 3) в конструкцию канала 2 можно ввести распределитель, обеспечивающий поступление флегмы на насадку равными порциями, например, в 5–10 точках, распределенных равномерно по верхней границе насадки.

7 Приложение 3. Газовый смеситель

В рабочий модуль колонны включен газовый смеситель 15 (рис. 3), предназначенный для выравнивания состава пара по ширине перед входом пара в рабочие каналы 2 ступени. Смеситель 15 собирается в отсеке 10 корпуса модуля на базе верхней и нижней дырчатых тарелок 11 и включает тонкие проходные трубки 4 со стаканами 3, а также насадочный смесительный элемент 12, выполненный в виде блока с горизонтальной верхней и нижней границами, перекрывающего просвет корпуса 10. На тарелках 11 и в блоке 12 выполнены установочные гнезда и каналы под трубки 4. Дырчатые тарелки 11 работают как рассекатели потока пара и служат для развязывания гидродинамических режимов смесителя и соседних колонн 14 (рис. 3). Смесительный элемент 12 (рис. 3) может выполняться в нескольких вариантах, например, в виде набора тарелок КРИМЗ, как блок структурированной насадки, лопаточный смеситель и т.д. Конструкция лопаточного смесителя, рабочий элемент которой выполнен на базе регулярной пакетной насадки, показана на рис. 5А–5Д.

Принимается, что трубная решетка колонны выполнена по квадратному шаблону. На рис. 5А показаны элементы смесителя: корпус 1, рассекатели 2 и 3, опорная решетка 5 с проходными окнами 6, а также рабочие элементы 7 и 8 в виде удлиненных прямоугольных блоков, уложенные на решетку 5 в коридорах между рядами трубок 4 в двух уровнях; в плане продольные оси блоков первого и второго уровней ортогональны. На рис. 5В и 5С показан вид с торца и сверху на блок 7. Блок 7 составлен из несущих и рассекающих полосок 9 и 10, лопаток 11 и

дистанционирующих щайб 13. Между полосками 9, 10 образуются плоские вертикальные каналы, в которых размещены наклонные лопатки 11 (показана одна установленная лопатка 11).

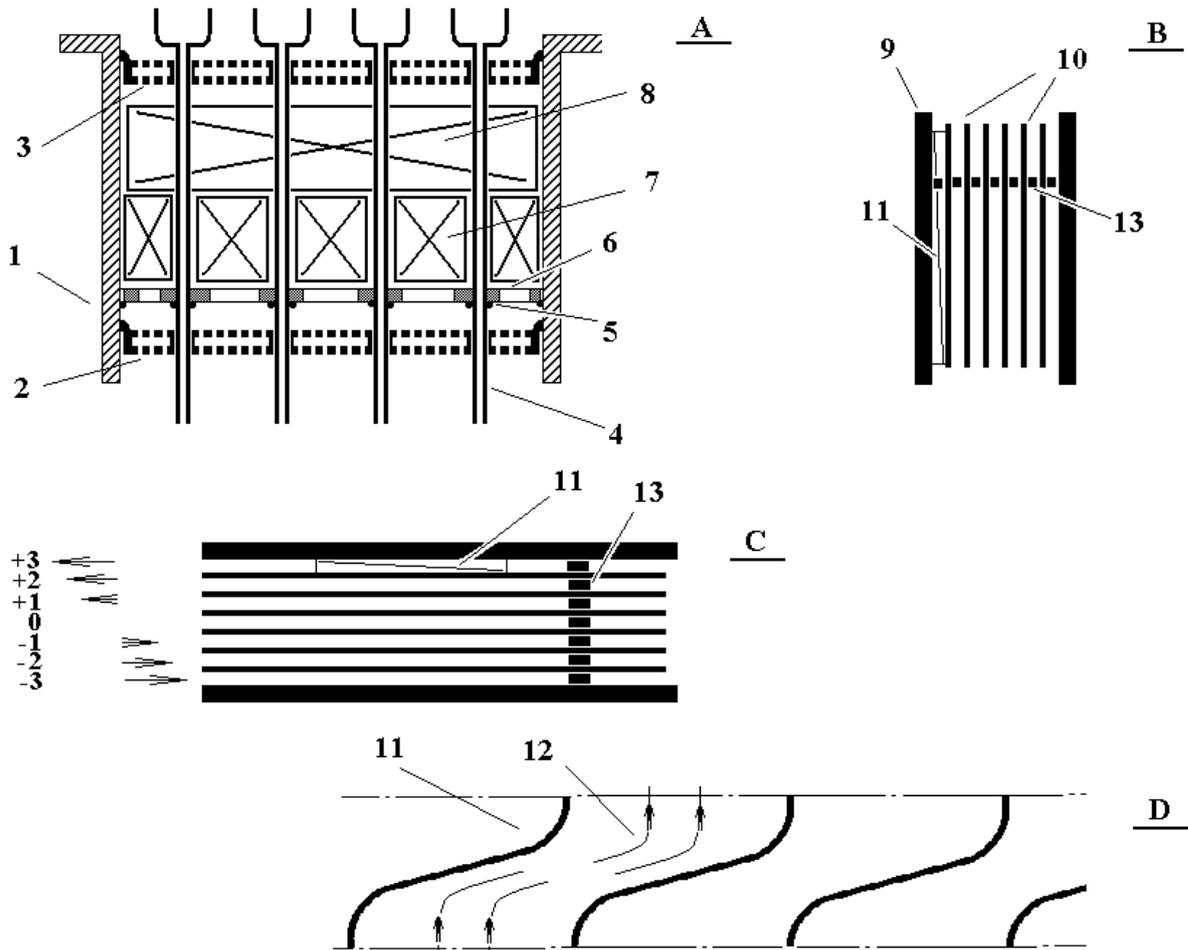


Рис. 5А–5D

Рис. 5D поясняет движение пара в рабочем элементе 7. Решетка, составленная из полосок 9, 10 и лопаток 11 рассекает восходящий поток пара на парциальные потоки 12; при проходе элемента парциальный поток испытывает горизонтальный сдвиг на расстояние, определяемое наклоном лопатки 11 и высотой блока. В соседних каналах лопатки 11 меняют наклон. Таким образом, смеситель обеспечивает крупномасштабное перемешивание пара по ширине. В плане продольные оси блоков 7 и 8 ортогональны (рис. 5А), что усиливает перемешивание. Вариант организации сдвигов парциальных потоков в блоке 7 показан на рис. 5С. Стрелки указывают направление сдвига, цифра при стрелке указывает величину сдвига (например в единицах периода трубной решетки колонны).

Рис. 6А–6С поясняют работу двухступенчатого смесителя в простейшем варианте, в котором элементы 7 или 8 на рис. 5А, обслуживающие данный ряд труб, имеют по две несущие пластины 9 и только одну рассекающую полоску 10 (рис. 5В). На рис. 6А определена ячейка смешения *abcd*. К ячейке отнесены элементы, проекции которых попадают на квадрат *abcd*, например, проекция рабочего канала 1 и линии 2, по которым пластины 9 и полоски 10 (рис. 5В, 5С) рассекают восходящий поток пара на парциальные потоки.

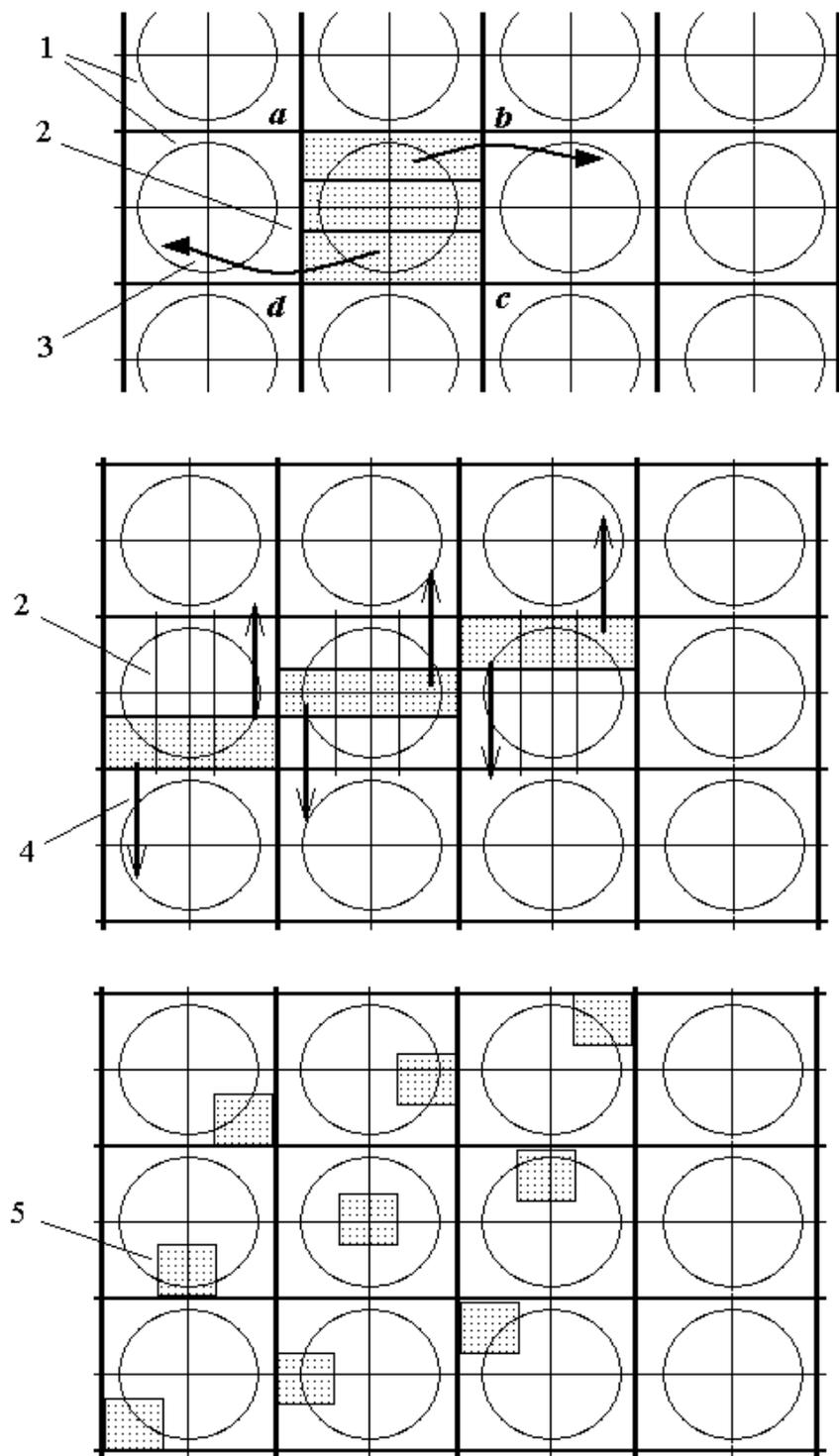


Рис. 6А, 6В, 6С

Серый квадрат на рис. 6А – сечение потока пара на входе в ячейку смешения. Стрелки 3 на рис. 6А показывают направление и величину сдвига парциальных потоков в смешительном блоке первого уровня (поз.7 на рис. 5). На рис. 6В заливкой и стрелками показано расщепление и сдвиг парциальных потоков в смесителе второй ступени (поз. 8 на рис. 5). В рассматриваемом примере пакетные смесители первого и второго уровня (поз. 7 и 8 на рис. 5А) расщепляют поток, поступающий на вход в ячейку *abcd*, на девять частей.

На рис. 6С показано состояние исходного парциального потока, поступившего в ячейку $abcd$ (рис. 6А), после прохода двух ступенях смесителя (поз. 7 и 8 на рис. 5А). Исходный поток расщеплен на 9 парциальных потоков 5, которые разведены по 9 соседним ячейкам.

Эффективность смесителя находится из следующих соображений. Потоки пара, поступающие в смесительные ячейки $abcd$ рис. 6А, имеют концентрации $X \pm \delta X_i$, где i – номер ячейки, δX_i – случайное отклонение концентрации от номинальной величины X . Как ясно из рис. 6С, характеристика потока на выходе произвольной ячейки $abcd$ смесителя определяются усреднением 9 случайных величин $X \pm \delta X_i$. Таким образом, среднеквадратичное отклонение концентраций на выходе из ячеек смешения в обсуждаемом примере снижается в 3 раза относительно исходной величины.

8 Приложение 4. Стоимость изотопа ^{15}N

В приложении оценивается стоимость изотопа азота ^{15}N , получаемого методом дистилляции жидкой двуокиси азота. Процесс проводится в многоканальной колонне разделения изотопов большой размерности, предложенной в [1]. Физическая энергоёмкость процесса оценивается по уравнению (10) или соотношению (20). Принимается, что выполнен критерий (21), тогда характеристики идеальной и действительной колонн совпадают с точностью $\sim 10\%$. Поэтому можно использовать уравнение (10) для идеальной колонны, приведенное к виду

$$j^X - X(l)j = \theta \varepsilon m X(l), \quad (23)$$

где θ – коэффициент относительного отбора. Т.к. рассматривается головная колонна, то верны оценки: $X(l) \ll 1$ и $X(l) \cdot j \ll j^X$. Учитывая требование экономии пара, коэффициент θ принимается равным $\theta = 0,8$. Параметр m/j^X есть удельный расход пара в головной колонне, нормированный на 1 г–ат полученного ^{15}N . Из (23) следует оценка удельного расхода холода/тепла W^* , кДж/(г–ат ^{15}N), в конденсаторе/испарителе колонны

$$W^* = \frac{\Delta H}{2} \frac{m}{j^X} \cong \frac{\Delta H}{2} \frac{1}{\theta \varepsilon x^0}, \quad (24a)$$

где: $\Delta H = 38,56$ кДж/моль – энтальпия парообразования жидкой двуокиси азота N_2O_4 при нормальных условиях; $\varepsilon = 1 - \alpha = 0,0038$ – коэффициент обогащения; $x^0 = 0,00366(9)$ – атомная доля ^{15}N в природном азоте [20]. Численно $W^* = \sim 20 \cdot 10^5$ кДж/(г–ат ^{15}N). Параметр W^* фиксируется при выборе рабочего тела. В данном случае он задан табличными физико–химическими константами двуокиси азота и атомной долей целевого изотопа ^{15}N в природном азоте.

Принимается, что для генерации и компенсации тепловых потоков в испарителе и конденсаторе колонны разделения изотопов используется тепловой насос, т.е. парокompрессионная или абсорбционная холодильная машина. Работа теплового насоса в связке с колонной разделения изотопов показана на рис. 7.

Эффективные (оплачиваемые) удельные затраты энергии W^{eff} на получение изотопа в колонне, обслуживаемой тепловым насосом, выражаются формулой, в которую входят удельный расход тепла W^* (24a) и “холодильный коэффициент” $\phi < 1$:

$$W^{\text{eff}} = \phi W^*. \quad (24b)$$

Рабочая температура дистилляционной колонны с двуокисью азота принадлежит интервалу $\sim 21^\circ\text{C}$. Для такой колонны нужен тепловой насос, генерирующий тепловые потоки при темпе-

ратурах “конденсации и кипения” ~ 5 и 35 $^{\circ}\text{C}$ или ~ 10 и 30 $^{\circ}\text{C}$. Парокомпрессионные холодильные машины, разработанные под температуры кипения и конденсации ~ 5 $^{\circ}\text{C}$ и ~ 35 $^{\circ}\text{C}$, имеют холодильный коэффициент $\phi \sim 0,16-0,2$. Согласно (23а) и (23б) тепловой насос – парокомпрессионная холодильная машина обеспечивает эффективную энергоемкость получения изотопа ^{15}N $\sim 4 \cdot 10^5$ кДж/(г-ат ^{15}N) и стоимость энергозатрат $\sim 10-15$ долл/г-ат ^{15}N при цене электроэнергии 0,1 долл/кВт-час. С учетом прочих затрат стоимость изотопа при данном выборе теплового насоса может достигать ~ 30 долл/г-ат ^{15}N .

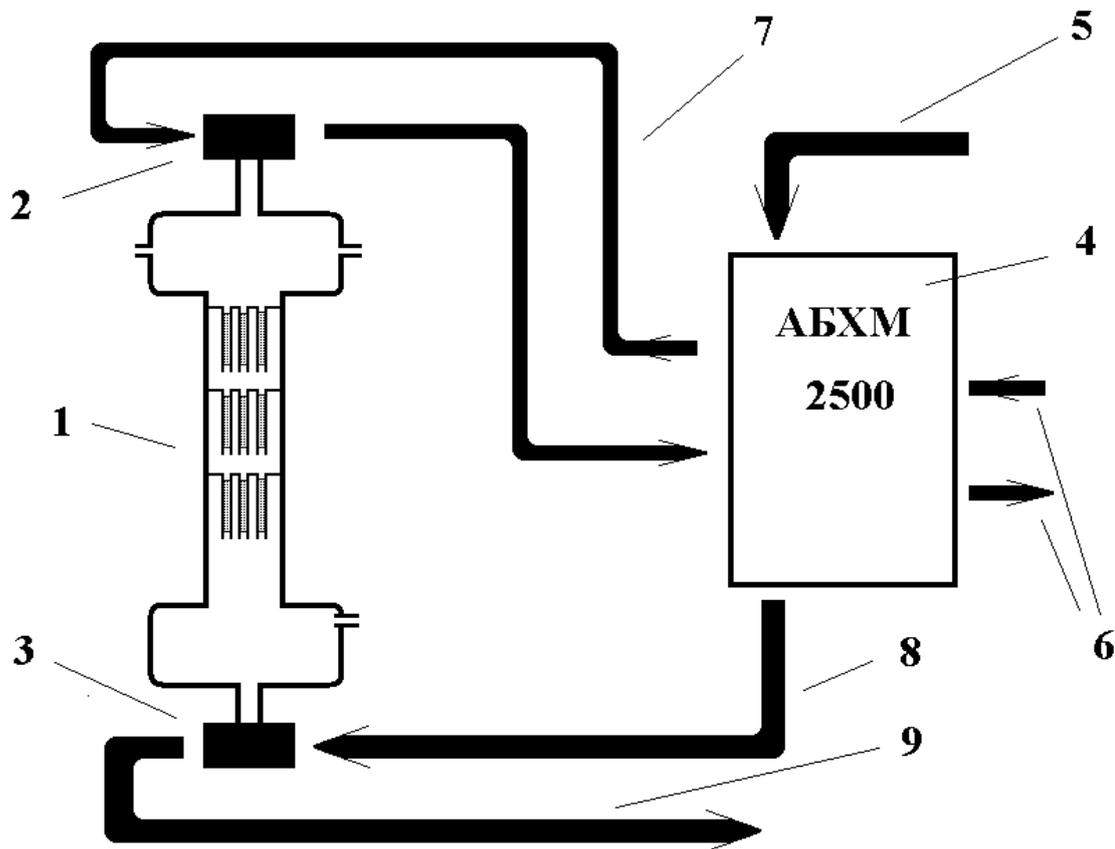


Рис. 7. Тепловая схема колонны, обслуживаемой тепловым насосом. 1 – колонна изотопного обмена; 2 и 3 – конденсатор и испаритель колонны; 4 – абсорбционная бромистолитиевая холодильная машина; 5 – подача низкопотенциального тепла; 6 – тепловой контур градирни; 7 – подача холода в конденсатор; 8 – подача тепла в испаритель; 9 – сброс отработавшего тепла.

Более экономичны тепловые насосы в виде водоаммиачной или бромистолитиевой абсорбционной холодильной машины. Большие абсорбционные холодильные машины имеют холодопроизводительность ~ 1000 кВт и больше и выполняются с ресурсом $\sim 20-30$ лет до капитального ремонта. Абсорбционные холодильные машины используют при доступности больших количеств низкопотенциального тепла. Подобные машины особенно эффективны, если имеется возможность использовать сбросовое бесплатное низкопотенциальное тепло. В подобных вариантах оплачивается только электроэнергия, потребляемая вспомогательными насосами.

Промышленность выпускает водоаммиачные холодильные машины с температурой в кипятыльнике $- 25$ $^{\circ}\text{C}$ (см. описание холодильной машины АХМ-2/25). Эти машины характеризуются насосными затратами ~ 40 кВт на 1000 кВт холодопроизводительности. Таким образом,

мощность электродвигателей холодильной машины АХМ – 2/25 не превышает 4% от холодопроизводительности. Если для питания холодильной машины данного типа доступно неоплачиваемое сбросовое тепло, то эффективное (оплачиваемое) энергопотребление оценивается по (22b) при $\phi = 0,04$.

Как вариант, изотоп ^{15}N можно получать методом дистилляции двуокиси азота в колонне, обслуживаемой тепловым насосом в виде холодильной машины АХМ–2/25. Пусть для питания теплового насоса доступно сбросовое низкопотенциальное тепло, при этом оплачивается только электроэнергия, потребляемая вспомогательными насосами. В принимаемом варианте тепловой схемы колонны удельный расход электроэнергии составляет ~ 30 кВт–час/г–ат ^{15}N (стоимостный эквивалент ~ 3 долл/г–ат ^{15}N). Используя данные обзора [22], можно найти, что в менее выгодном варианте с оплатой низкопотенциального тепла стоимость удельных энергозатрат возрастает до 10–12 долл/ г–ат ^{15}N .

Рабочие температуры дистилляционной колонны с жидкой двуокисью азота (~ 21 °С) позволяют использовать в качестве теплового насоса абсорбционную бромистолитиевую холодильную машину (АБХМ). Этот вариант, позволяющий исключить в хозяйстве установки аммиак, привлекателен по соображениям безопасности.

Обзор условий применения и характеристик АБХМ новых поколений изложен, например, в работах [22,23]. Инженерные расчеты работы [22] учитывают снижение расходов в холодное время года. Приведенные в [22] данные позволяют оценить стоимость целевого ^{15}N , получаемого методом дистилляции двуокиси азота в колонне большой размерности, обслуживаемой бромистолитиевым тепловым насосом. Результат этих оценок для варианта, в котором используется неоплачиваемое сбросовое низкопотенциальное тепло, приведен в табл. 3.

Таблица 3. Расходы на целевой изотоп ^{15}N при масштабе производства ~ 600 кг ^{15}N /год

| Статья расходов | стоимость, долл. / ресурс, год | расходы, долл./год |
|-------------------------------------|--------------------------------|--|
| АБХМ 2500 кВт | 600 000 / 20 | 30 000 |
| Колонна изотопного обмена | 1 000 000 / 20 (?) | 50 000 |
| Электроэнергия (насосы) | – | $\sim 30 000$ |
| Низкопотенциальное тепло | – | бесплатно |
| Зарплата (7 – 10 сотрудников) | – | $\sim 400 000$ |
| ИТОГО | | $\sim 510 000$ |
| стоимость изотопа, долл/г–ат | | 13 долл/г–ат ^{15}N |

Согласно [22], машина АБХМ–2500 (холодопроизводительность $Q = 2500$ кВт) имеет ресурс 20 лет и стоимость в комплекте с градирней 600000 долл. США. Стоимость и ресурс установки разделения изотопов условно приняты равными 10^6 долл и 20 лет соответственно. Т.о., амортизационные отчисления составляют ~ 80000 долл/год (табл. 3). Расходы по оплате электроэнергии на питание вспомогательных насосов равны ~ 31300 долл/год [22]. Принимается, что установку обслуживает бригада из 7–10 специалистов с фондом заработной платы

~ 400 000 долл/год. Годовое производство целевого изотопа N^{year} , г-ат ^{15}N / год, оценивается по формуле

$$N^{\text{year}} = \frac{Q \tau}{W^*},$$

где: параметр $W^* = \sim 2 \cdot 10^6$ кДж/(г-ат ^{15}N) определен в (23а); $Q = 2500$ кВт – холодопроизводительность теплового насоса АБХМ–2500, обслуживающего дистилляционную колонну, $\tau = 3,15 \cdot 10^7$ – длительность года, сек. Численно $N^{\text{year}} = 4 \cdot 10^4$ г-ат ^{15}N /год, или 600 кг ^{15}N /год.

Стоимость целевого ^{15}N получает оценку (табл. 3)

$$510000 \text{ [долл/год]} / N^{\text{year}} \text{ [г-ат } ^{15}\text{N /год]} \sim 13 \text{ долл/ г-ат } ^{15}\text{N}.$$

При оплате низкопотенциального тепла, потребляемого тепловым насосом АБХМ 2500, текущие расходы возрастают на ~143600 долл/год [22]. В данном варианте расчетная стоимость целевого ^{15}N возрастает до ~ 16 долл/г-ат ^{15}N .

Можно отметить, что применение энергосберегающих технологий для генерации тепловых потоков в колонне разделения изотопов приближает стоимость получаемого ^{15}N к стоимости тяжелой воды, вырабатываемой двухтемпературным методом (стоимость тяжелой воды оценивается в ~ 3–4 долл/1 г-ат дейтерия при справочной цене тяжелой воды ~ 350 долл/кг) .

Литература

1. Солодов А.А. Установка для разделения изотопов. Патент РФ RU 2543877; от 10.032015.
2. Котельников Р.Б., Башлыков С.Н., Каштанов А.И., Меньшикова Т.С. Высокотемпературное ядерное топливо. Изд 2-е – М.: Атомиздат, 1978.
3. Ма Б.М. Материалы ядерных энергетических установок. Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1987.
4. Nadibi-Olschewsky N., Glatz J.-P., Boklund H., Leroy M.J.-F. The fate of nitrogen upon reprocessing of nitride fuels. // Journ. of Nucl. Mat. vol. 188, 1992, 244–248 p.
5. Устинов О.А., Суханов Л.П., Горбунов В.Ф., Рогозкин Б.Д., Черников М.А., Погорелко О.Н., Солодов А.А. Неводная технология регенерации нитридного топлива с использованием перекристаллизационных процессов. // Атомная энергия, т. 191, вып. 3, сент. 2006 г, с. 236–238.
6. Полуэктов П.П., Суханов Л.П., Солодов А.А., Устинов О.А., Горбунов В.Ф., Якунин С.А., Назарова В.В. Теоретическое обоснование выбора расплавных сред и возможности перекристаллизации в них нитридов урана и плутония без изменения их химической формы. – Отчет о НИР ВНИИНМ, № 10048, 2002 г, 54 с.
7. Полуэктов П.П., Суханов Л.П., Солодов А.А., Устинов О.А., Назарова В.В. Теоретическое обоснование процесса регенерации нитридного топлива азотированием – деазотированием и сплавлением с флюсом. – Отчет о НИР ВНИИНМ, № 10049, 2002 г, 27 с.
8. Полуэктов П.П., Суханов Л.П., Устинов О.А., Горбунов В.Ф., Куракулова М.А., Солодов А.А., Якунин С.А., Жериков В.И., Назарова В.В., Черников М.А. Выбор и исследование расплавных сред для регенерации нитридного топлива без изменения его химической формы. – Отчет о НИР ВНИИНМ, № 10157, 2002 г, 24 с.
9. Лопаткин А. В. Топливный цикл крупномасштабной ядерной энергетики России на принципах топливного и радиационного баланса и нераспространения. Автореферат диссертации. М.: НИКИЭТ, 2013 г, 45 с.

10. Wallenius Janne. Physics of americium transmutation. // Nuclear engineering and technology. Vol. 44, n 2, pp 199 – 206.
11. Khalil H., Lineberry M.J., Cahalan J.E., Willit J.L., Spencer B.W., Hayes S.L., Crowford D.C., Wade D.C. and Hill D.J.. Preliminary assessment of the BREST reactor design and fuel cycle concept // ANL – 00/22. 46 pp, may 2000.
12. Allen T.R. and Crowford D.C. Lead – cooled fast reactor systems and the fuel and material challenges // Science and Technology of Nuclear Installations, volume 2007, Article ID 97486, 11 pages. doi: 10.1155/2007/97486.
13. Троянов В.М., Лемехов В.В. Ядерное топливо для быстрых реакторов с естественной безопасностью, работающих в замкнутом топливном цикле. Проблемы выбора и обоснования. // Материалы конференции: V Региональный Общественный форум – диалог “Атомные производства, общество, безопасность 2012”. Томск, 29–30 ноября 2012 года.
14. Андреев Б.М., Зельвенский Я.Д., Катальников С.Г. Разделение стабильных изотопов физико – химическими методами. М.: Энергоатомиздат, 1982.
15. Андреев Б.М., Сахарновский Ю. А. Физикохимические методы. В кн.: Изотопы: свойства и применение. В 2 – х томах. Под ред. В.Ю. Баранникова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. –Т. 1, гл. 6, с. 250–255.
16. Апатин В.М., Климин С.Ф., Лаптев В.Б., Лохман В.Н., Огурок Н.–Д.Д., Пигульский С.В., Рябов Е.А. Лазерное разделение изотопов азота методом ИК + УФ диссоциации молекул аммиака// Квантовая электроника. т. 38, № 8, 2008, с. 775–782.
17. Толмачев А.М., Угоров Е.Н., Рахмадзе А.А., Крюченкова Н.Г. Термокаталитическое восстановление серной кислоты метаном. // Вестник московского университета. сер. 2 . ХИМИЯ, 1999. Т. 40, №2, с. 88–89.
18. Розен А.М. Теория разделения изотопов в колоннах. М.: Атомиздат, 1960.
19. Гурвич Л.Я., Жирнов А.Д. Коррозионная стойкость металлов в красной дымящей азотной кислоте. // Защита металлов, 1996 г, т. 32, № 1, с. 18–22.
20. Физические величины. Справочник. А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина и др. Ред. И.С. Григорьев, Е.З. Мейлихов и др. – М.; Энергоатомиздат, 1991.
21. Краскин В., Певцов В., Петров В. Автоматизация процесса промышленного разделения изотопов в каскаде высотных насадочных колонн. // Современные технологии автоматизации. Т. 4, 2004, с. 52–58.
22. Дячек П.И. Мельник Д.С. Перспективы использования абсорбционных холодильных машин. // Энергия и менеджмент, №2 (35), 2007; (<http://termo.by/ru/103/187/>).
23. Горщков В.Г. Российские абсорбционные бромистолитиевые преобразователи теплоты нового поколения – практика и перспективы применения. ООО “ОКБ Теплосибмаш”, Институт теплофизики СО РАН. // Материалы международной конференции : “Тепловые насосы в странах СНГ”, Алушта, 14–17 мая 2013;. (conf.esco.ua/reports/gorshkov.pdf).
24. Зо Йе Наинг. Разделение изотопов методом химобмена с термическим обращением потоков. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. РХТУ им. Д.И. Менделеева. Москва – 2014.