УДК 66.096.3

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ КАСКАДА ДЕПРОТИЗАЦИИ ТЯЖЕЛОВОДНОГО ЗАМЕДЛИТЕЛЯ

© 2017 г. Э. П. Магомедбеков, Д. Ю. Белкин*, И. Л. Растунова, А. Б. Сазонов, И. Л. Селиваненко, Н. Н. Кулов

Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва *Производственное объединение "Маяк", Озёрск eldar@rctu.ru

Поступила в редакцию 19.10.2016 г.

Представлены методика и результаты математического моделирования работы каскада насадочных ректификационных колонн для депротизации тяжелой воды. В основу модели положены результаты лабораторных испытаний регулярной рулонной ленточно-винтовой насадки, разработанной в РХТУ им. Д.И. Менделеева, и нерегулярной спирально-призматической насадки из нержавеющей стали. Показано, что использование рулонной ленточно-винтовой насадки в колоннах позволяет снизить объем разделительного оборудования при сохранении производительности каскада и степени разделения.

Ключевые слова: регулярная насадка, ректификация воды, депротизация, тяжелая вода **DOI:** 10.7868/S0040357117020051

введение

Тяжеловодный реактор — ядерный реактор, в котором роль теплоносителя и замедлителя нейтронов играет тяжелая вода (оксид дейтерия D_2O). Поскольку сечение радиационного захвата тепловых нейтронов ядрами дейтерия (5.2×10^{-4} б) значительно меньше, чем протонами (0.333 б), такой реактор имеет улучшенный нейтронный баланс, что позволяет использовать в качестве ядерного топлива природный уран или направить "лишние" нейтроны для наработки радионуклидов.

В процессе работы тяжеловодного реактора D_2O загрязняется другими изотопами водорода — легким водородом (протием, H) и тритием (T). Разбавление дейтерия протием приводит к ухудшению ядерно-физических свойств замедлителя. Поэтому для поддержания нормальной работы тяжеловодного реактора необходимо поддерживать концентрацию протия в замедлителе на уровне не более 0.5%.

Для очистки тяжеловодного замедлителя от протия (депротизации) предлагались самые разные методы разделения изотопов [1]. Общепризнанным на сегодняшний день является технология, использующая ректификацию воды. Несмотря на то, что энергетические затраты при ректификации сравнительно велики, данный метод обладает такими неоспоримыми преимуществами, как простота аппаратурного оформления, взрыво- и пожаробезопасность.

Математическое моделирование разделения изотопов водорода при ректификации воды с целью проведения проектных и проверочных расчетов (как одиночных колонн, так и разделительных каскадов, в том числе – в нестационарном состоянии) предпринималось в разные годы разными авторами [2-5]. Большинство предложенных моделей рассматривает общий случай многокомпонентной ректификации, что предполагает запись уравнений равновесия и материального баланса по каждому компоненту смеси в матричной форме, где размерность матрицы – число теоретических ступеней разделения (ЧТСР), и получение решения каким-либо итерационным методом. Один из недостатков данного подхода необходимость изначально задавать и далее варьировать до получения удовлетворительного результата множество таких параметров, как входящие и выходящие потоки, ЧТСР, флегмовое число и др. Кроме того, созданные на основе указанных моделей программы оперируют характеристиками контактного устройства (КУ) лишь одного типа (зачастую – даже неполным набором таких характеристик). Между тем при оптимизации разделительных каскадов возможность использования в разных колоннах различных контактных устройств играет ключевую роль.

Задачу депротизации тяжеловодного замедлителя можно рассматривать как задачу бинарной ректификации, так как коэффициент разделения α остается при фиксированной температуре прак-



Рис. 1. Коэффициент разделения изотопов водорода в системе вода–водяной пар по данным [6, 7]: *1* – при низком содержании дейтерия; *2* – при высоком содержании дейтерия.

тически постоянным при любых соотношениях изотопных форм воды (H_2O , HDO и D_2O) в смеси и выражается через соотношение давлений насыщенных паров P° обычной и тяжелой воды [1]:

$$\alpha = \sqrt{P_{\rm H_2O}^{\circ} / P_{\rm D_2O}^{\circ}}.$$
 (1)

Содержание в тяжеловодном замедлителе трития в процентном отношении всегда пренебрежимо мало.

Наиболее полные и точные данные по давлению насыщенных паров различных изотопных форм воды содержатся в работах Ван Хука [6, 7]. На рис. 1 представлена рассчитанная по данным этих работ температурная зависимость коэффициента разделения в рассматриваемой системе в случае низкой и высокой концентрации дейтерия:

$$\alpha_{\rm HD} = P_{\rm H_2O}^{\circ} / P_{\rm HDO}^{\circ} , \qquad (2)$$

$$\alpha_{\rm DH} = P_{\rm HDO}^{\circ} / P_{\rm D_2O}^{\circ}.$$
 (3)

Различия величин α_{HD} и α_{DH} столь незначительны, что, как отмечалось выше, при моделировании можно пренебречь зависимостью коэффициента разделения от изотопного состава разделяемой смеси. Другой особенностью α в рассматриваемой системе является его быстрое уменьшение до единицы с ростом температуры, а значит, и давления. В связи с этим проведение ректификации при атмосферном давлении потребует большого объема разделительных колонн, так как необходимое ЧТСР быстро растет с уменьшением α . По этой причине ректификацию воды с целью разделения изотопов проводят при пониженном давлении. При этом гидравлическое сопротивление КУ колонны позволяет получить наперед заданное низкое давление лишь в верхней ее части. По мере приближения к кубу давление и температура будут расти, что отрицательным образом скажется на разделительной способности. Поэтому одно из требований, предъявляемых к КУ колонн для ректификации тяжелой воды, — малое гидравлическое сопротивление.

При моделировании процессов разделения в качестве оптимизируемой величины обычно выступает объем разделительной аппаратуры, определяющий такие технико-экономические показатели, как капитальные затраты на строительство каскада, его энергоемкость (интегральные потери тепла), а также общее количество перерабатываемого вещества внутри каскада. Последний показатель имеет существенное значение при изотопной очистке тяжеловодного теплоносителя, так как имеются ограничения по доступному количеству вещества, а обращение с ним изза радиоактивности трития небезопасно.

Сравнение различных вариантов каскадной схемы с использованием только ЧТСР и внутренних потоков в колоннах позволяет найти минимум условного объема разделительной аппаратуры. Для перехода к реальному объему необходимо рассмотреть характеристики контактного устройства, которое планируется использовать. При этом сочетание различных КУ в одном каскаде может привести к тому, что условный минимум не будет совпадать с реальным. Для устранения этого недостатка в рамках настоящей работы была создана модель изотопной очистки тяжеловодного замедлителя путем ректификации, учитывающая гидродинамические и другие характеристики контактных устройств.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА

Сведение задачи многокомпонентной ректификации к задаче бинарной позволяет использовать вычислительный метод "от ступени к ступени". В рамках этого метода температура T принимается постоянной в пределах одной теоретической ступени разделения (**TCP**). Величины потоков жидкости и пара в пределах одной **TCP** также постоянны, что обусловлено малостью изменений энтальпий, к которым приводит изотопное замещение в молекуле воды. Таким образом, уравнения теплового баланса колонны могут быть оставлены за рамками модели. Изотопные составы каждого из входящих и выходящих с *n*-й **TCP** потоков связаны соотношением материального баланса:

$$L_n x_n + G_{n+1} y_{n+1} = L_{n+1} x_{n+1} + G_n y_n,$$
(4)

где *L* и *G* – внутренние потоки жидкости и пара, *x* и *y* – атомные доли изотопа (для определенности – дейтерия) в жидкости и паре соответственно.

Потоки жидкости и пара, покидающие *n*-ю TCP, находятся в термодинамическом равновесии, т.е.

$$\frac{x_{n+1}(1-y_n)}{y_n(1-x_{n+1})} = \alpha(T).$$
 (5)

Потоки питания F, отбора сверху G_0 и отбора снизу B, а также концентрации дейтерия в этих потоках (x_F , y_0 и x_B соответственно) связаны соотношениями общего и покомпонентного материального баланса:

$$F = G_0 + B, \tag{6}$$

$$Fx_{\rm F} = G_0 y_0 + B x_{\rm B},\tag{7}$$

где *N* – ЧТСР (принята нумерация ТСР "сверху вниз").

Большое ЧТСР, необходимое для решения задачи разделения изотопов, приводит к необходимости каскадирования: использования последовательности нескольких колонн меньшей высоты и/или меньшего диаметра взамен одной колонны большего размера. Нетрудно видеть (рис. 2), что моделирование каскада со ступенчатым сокращением потоков в итоге сводится к моделированию одной колонны с промежуточными дефлегматорами и испарителями. При этом разбиение колонны на ступени каскада может производиться по одному из критериев: а) максимальная высота (если существенны ограничения по высоте) и б) перепад давления по высоте (когда повышение температуры кипения серьезным образом снижает эффективность разделения).

Величины внутренних потоков при расчете от ступени к ступени находятся согласно следующим рекуррентным соотношениям:

$$L_{1} = RG_{0}/\Theta$$

$$G_{1} = L_{1} + G_{0}$$

$$L_{n} = \sigma_{n,n-1}L_{n-1}$$

$$G_{n} = L_{n} + G_{0}$$

$$L_{f} = \sigma_{f,f-1}L_{f-1} + F,$$

$$G_{f} = L_{f} - B$$

$$L_{n} = \sigma_{n,n-1}L_{n-1}$$

$$G_{n} = L_{n} - B$$

$$(8)$$

$$(8)$$

$$(7)$$

$$(8)$$

$$(8)$$

$$(7)$$

$$(8)$$

$$(8)$$

$$(7)$$

$$(8)$$

$$(8)$$

$$(8)$$

$$(9)$$

$$(7)$$

$$(8)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

где R — флегмовое число в каскаде без сокращения потоков, f — номер TCP питания, $\sigma_{n, n-1}$ — коэффициенты кратности потока, в пределах одной колонны равные единице. При переходе от одной колонны к другой в исчерпывающей по дейтерию части каскада $\sigma_{n, n-1} > 1$, а в концентрирующей части $\sigma_{n, n-1} > 1$. Величина θ равна произведению всех коэффициентов кратности потока в пределах исчерпывающей части каскада.



Рис. 2. Трехступенчатый каскад с сокращением потоков в концентрирующей и исчерпывающей части.

Минимальное флегмовое число R с учетом зависимости коэффициента разделения от температуры может быть принято равным

$$R_{\min} = \frac{1 - \alpha_{\min} \left(y_0 / x_F \right) + \left(\alpha_{\min} - 1 \right) y_0}{(\alpha_{\min} - 1)(1 - x_F)}, \qquad (9)$$

где α_{min} — минимальное значение коэффициента разделения. Что касается коэффициентов кратности потока, то, как показывает теория разделительных каскадов, хорошим начальным приближением для минимизации объема может служить следующее условие: поток сокращается во столько раз, во сколько раз повышается концентрация выделяемого изотопа на предыдущей ступени каскада [1].

Для заданного контактного устройства высота колонны определяется (помимо ЧТСР) высотой h, эквивалентной при заданных условиях одной ТСР (**BЭTC**). В число этих условий в общем случае входят термодинамические (температура), гидродинамические (удельная нагрузка, или поток жидкости на единицу сечения колонны) и структурные параметры. Влияние последних описывается с помощью коэффициента масштабного пе-

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ том 51 № 2 2017

рехода (КМП) К. Падение давления на единице высоты, или удельное гидравлическое сопротивление Δp , также зависит от типа контактного устройства и от удельной нагрузки. Следовательно, для проведения расчета методом от ступени к ступени необходимо, прежде всего, задать тип контактного устройства каждой *m*-й колонны (по их числу в каскаде *M*) и выбрать приемлемую ве-

личину удельной нагрузки L_m^* , после чего рассчитать сечение, КМП [8] и ВЭТС:

$$S_m = L_m / L_m^*, \tag{10}$$

$$K_m = 1 + \frac{1 - \eta}{\eta} \lg \frac{S_m}{S_h},\tag{11}$$

$$h_{m,n} = h\left(T_n, L_m^*, S_h\right) K_m.$$
⁽¹²⁾

В формуле (11) параметр η определяется степенью организации структуры потоков в колонне за счет использования данного контактного устройства [8], а S_h — величина опорного сечения, для которого известна ВЭТС *h* как функция температуры и удельной нагрузки. Расчет давления *P* на каждой TCP проводится с учетом найденного значения ВЭТС и гидравлического сопротивления насадки:

$$P_{m,n+1} = P_{m,n} + h_{m,n} \Delta p_{m,n} \left(L_m^*, P_{m,n} \right).$$
(13)

Объем разделительной части каскада находится суммированием объемов всех TCP:

$$V = \sum_{m=1}^{M} S_m \sum_{k=1}^{N_m} h_{m,k},$$
 (14)

где N_m – ЧТСР в *m*-й колонне, k – индекс, нумерующий ТСР в пределах одной колонны.

Блок-схема алгоритма расчета каскада изображена на рис. 3. В первом основном цикле производится расчет каскада без сокращения потоков. Разбиение на отдельные колонны может производиться как по величине гидравлического сопротивления, так и по предельной высоте (последний вариант на блок-схеме не указан). На втором этапе вводятся значения коэффициентов $\sigma_{n, n-1}$, отличные от единицы (рекомендуемые или произвольные), и производится расчет каскада с сокращением потоков (изменение формы каскада, в результате которого число колонн М может увеличиться). Алгоритм предусматривает вариант замены КУ при переходе от одной колонны к другой, а также изменение удельной нагрузки. Минимизация объема разделительной части осуществляется путем варьирования флегмового числа и коэффициентов кратности потока.

ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ

Верификация математической модели проводилась путем сравнения результатов расчета с экспериментальными данными, полученными на каскаде депротизации тяжеловодного замедлителя, функционирующего на Производственном объединении "Маяк". Каскад (рис. 4) состоит из пяти последовательно соединенных колонн (K1-K5), каждая из которых имеет собственные дефлегматор и кипятильник. Головные части колонн присоединены к общему вакуумному коллектору. Колонна К1 имеет концентрирующую и исчерпывающую части; подвод питания с концентрацией дейтерия 99.4 ат. % производится в среднюю часть колонны. Часть пара с верхней ТСР колонны К1 отбирается и смешивается с паром, выходящим из испарителя колонны *К2*. Другая его часть конденсируется в дефлегматоре колонны К1. В то же время часть пара из испарителя колонны K2 поступает в дефлегматор колонны К1. Аналогичным образом осуществляется связь между колоннами К2 и К3, и т.д. Отбор продукта (D_2O с концентрацией дейтерия не ниже 99.8 ат. %) производится в виде кубовой жидкости колонны К1, а отвальный поток воды с низкой концентрацией дейтерия (0.1 ат. % и менее) – виде флегмы колонны К5. Контактными устройствами в колоннах К1-К4 служат колпачковые тарелки (КТ). Колонна К5 заполнена спирально-призматической насадкой (СПН) Левина с размерами элемента $3 \times 3 \times 0.2$ мм.

Основные характеристики разделительного оборудования каскада представлены в табл. 1.

При фиксированных (задаваемых техническим регламентом) значениях потоков жидкости, величины отбора и коэффициентов кратности потока, а также давления в нижней части каждой колонны осуществлялся подбор таких значений ВЭТС, чтобы наилучшим образом описать изменение концентрации дейтерия по ступеням каскада. При этом принималось, что профиль падения давления в тарельчатых колоннах K1-K4 – линейный (т.е. полагали, что Δp не зависит от давления), а в насадочной колонне K5 описывается корневой зависимостью, так как согласно [1] гидравлическое сопротивление СПН обратно пропорционально давлению:

$$\Delta p = a/P, \tag{15}$$

откуда следует

$$P_{n+1} = \sqrt{P_n + 2ah_n}.\tag{16}$$

Результаты расчета (концентрации дейтерия, ЧТСР, а также соответствующие значения ВЭТС) приведены в табл. 1. При выбранных значениях ВЭТС в тарельчатых и насадочных колоннах наблюдается хорошее согласие между теорией и экспериментом, что свидетельствует об адекватности выбранной модели расчета. Можно также



Рис. 3. Блок-схема алгоритма расчета каскада.

отметить огромное различие ВЭТС (на порядок величины) для тарельчатой и насадочной колонн. Вместе с тем результаты расчета показывают, что даже одинаковые по своей конструкции и условиям эксплуатации тарельчатые колонны K3 и K4 на практике работают с разной эффективностью: ЧТСР в K3 заведомо больше, чем в K4 (в противном случае концентрация дейтерия в потоках

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ том 51 № 2 2017



Рис. 4. Принципиальная схема каскада депротизации тяжеловодного замедлителя Производственного объединения "Маяк".

между этими колоннами оказывается около 60%, что далеко от наблюдаемого значения).

АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫЙ КАСКАД

Одним из способов уменьшения объема описанного выше каскада депротизации может стать замена колпачковых тарелок в колоннах К1-К4 рулонной ленточно-винтовой насадкой (РЛВН) [9]. Характеристики РЛВН были определены ранее в РХТУ им. Д.И. Менделеева; подробное описание методики эксперимента и основные результаты можно найти в работе [10]. Значение ВЭТС для этой насадки в колонне диаметром 120 мм составляет около 18.2 см при давлении 20 кПа и удельной нагрузке 5280 кг/(ч м²). Влияние удельной нагрузки на ВЭТС для РЛВН практически отсутствует. Не отмечено и влияния давления на величину ВЭТС, что объясняется отсутствием лимитирующего диффузионного сопротивления со стороны обеих фаз: увеличение коэффициента диффузии в жидкости с ростом температуры ее кипения компенсируется уменьшением этой величины для паровой фазы. Путем сравнения ВЭТС в колоннах диаметром 60 и 120 мм получено значение параметра $\eta = 0.83$, откуда согласно (11) и (12) определяются КМП и ВЭТС для колонны любого диаметра. Так, для колонны диаметром 500 мм расчет дает h = 23.5 см, что как минимум вдвое меньше, чем ВЭТС в тарельчатой колонне.

На рис. 5 показана зависимость гидравлического сопротивления РЛВН от удельной нагрузки и давления. Можно видеть, что даже при нагрузке более 5000 кг/(ч м²) в области давлений пара более 30 кПа гидравлическое сопротивление этой насадки незначительно: не более 4 кПа/м. Аппроксимация зависимости гидравлического сопротивления (кПа/м) от давления (кПа) и удельной нагрузки (кг/(ч м²)) эмпирическим уравнением

$$\Delta p = a \frac{L^{*(b_0 + b_1 P)}}{P^{c_0 + c_1 P + c_2 P^2}}$$
(17)

дает для РЛВН следующие значения параметров: $a = 4.12 \times 10^{-5}$, $b_0 = 1.414$, $b_1 = 8.6 \times 10^{-3}$, $c_0 = 0.336$, $c_1 = 2.274 \times 10^{-2}$, $c_2 = -4.724 \times 10^{-5}$. Результаты аппроксимации представлены линиями на рис. 5.

Низкое гидравлическое сопротивление РЛВН в сочетании с высокой пропускной способностью делает ее перспективной для использования в колоннах альтернативного каскада: меньшего объема, с меньшей высотой колонн, но с той же производительностью и разделительной способностью. При проведении проектных расчетов альтернативного каскада значения отбора, коэффициентов кратности потока и давления в верхней части колонн принимали равным значениям в каскаде Производственного объединения "Маяк" (табл. 1). Кроме того, неизменными принимали все характеристики последней колонны каскада (заполненной СПН). Варьировали величину удельной нагрузки в колоннах с РЛВН и максимальное давление в нижней части до получения минимального

Konouun	<i>K</i> 1	K)	K3	KA.	<i>K</i> 5		
Колонна	<u> </u>	KZ	K.J	Λ7	KJ		
КУ	KT	KT	KT	KT	СПН		
<i>D</i> , м	0.7	0.5	0.265	0.265	0.121		
<i>Н</i> , м	40.75	41	41	41	10		
<i>Р</i> ₀ , кПа	30	30	30	30	30		
<i>P</i> _{max} , кПа	66	66	73	64	55		
Δр, кПа/м*	0.88	0.88	1.05	0.83	2.5		
<i>L</i> , 10 ³ моль/ч	50	20	8	8	0.75		
σ	_	2.5	2.5	1	112.5**		
<i>L</i> *, кг/(ч м ²)	2600	2040	2900	2900	1175		
<i>x</i> _{<i>m</i>, 1} , ат. % (измерение)	98.58	93.65	48.05	8.89	<0.1		
<i>x</i> _{<i>m</i>, 1} , ат. % (расчет)	98.62	92.98	52.04	10.5	0.1		
<i>x_{m, Nm}</i> , ат. % (измерение)	99.81	98.58	93.65	48.05	8.89		
<i>x_{m, Nm}</i> , ат. % (расчет)	99.804	98.59	92.91	51.09	10.4		
<i>h</i> , см	45.3	58.6	48.2	54.7	5.9		
N _m	90	70	85	75	170		
<i>V</i> , м ³	15.672	8.05	2.261	2.261	0.115		
V_{Σ}, m^3		28.359					

Таблица 1. Технические и эксплуатационные характеристики разделительного оборудования каскада депротизации Производственного объединения "Маяк"

* Среднее значение.

** Флегмовое число L_1/G_0 .

общего объема разделительной аппаратуры. При расчете высот колонн полученные расчетные значения округляли в большую сторону до ближайшего кратного 1 м (т.е. принимали высоту царги с РЛВН равной 1 м).

Как показали проведенные расчеты, имеется возможность сократить число колонн в альтернативном каскаде (с пяти до четырех) за счет увеличения ЧТСР в каждой из трех колонн, заполненных РЛВН. При этом выигрыш в объеме разделительной аппаратуры (более чем в 4 раза по сравнению с каскадом Производственного объединения "Маяк") достигается за счет уменьшения ВЭТС в этих колоннах при увеличении пропускной способности. Таким образом, заполнение первых ступеней каскада (К1-К3) РЛВН позволяет минимизировать объем разделительной аппаратуры при одновременном уменьшении числа колонн. В то же время использование на последней ступени СПН 3 × 3 × 0.2 мм представляется оправданным, так как концентрирование протия от ~90 до 99.9 ат. % требует значительного числа ТСР, а сокращение потоков, имевшее место на предыдущих ступенях, достаточно

велико, чтобы стало возможным ограничиться колонной небольшого сечения.

Характеристики колонн альтернативного каскада, определенные по результатам расчета, представлены в табл. 2.

Как было отмечено в ходе оптимизации, снижение удельной нагрузки даже до 5000 кг/(ч м²) уже приводит к заметному росту диаметра колонн и объема в целом. С другой стороны, увеличение L^* вызывает рост гидравлического сопротивления, температуры кипения, ЧТСР и, как следствие, объема каскада. Отсюда можно заключить, что указанная в табл. 2 удельная нагрузка для РЛВН близка к оптимальной.

В заключение обсудим влияние давления в верхней и нижней частях колонн на объем разделительной части каскада. Прежде всего, отметим, что с повышением как первого, так и второго, снижается ЧТСР и, следовательно, растет объем. На первый взгляд может показаться, что существенно увеличить эффективность разделения можно путем снижения давления в вакуумном коллекторе. Однако, как показывает расчет, масштаб этого эффекта оказывается весьма незначительным: гидравлическое сопротивление насадки при малых



Рис. 5. Гидравлическое сопротивление РЛВН при давлении: $I - 10 \ \kappa \Pi a$, 2 - 20, 3 - 30, 4 - 40, 5 - 60, 6 - 80, $7 - 100 \ \kappa \Pi a$; точки — данные эксперимента, сплошные линии — аппроксимация уравнением (17).

давлениях максимально, и в результате лишь несколько самых верхних TCP работают с повышенной эффективностью. Таким образом, оптимальное давление в верхней части колонн каскада депротизации — порядка 20–30 кПа.

Таблица 2. Технические и эксплуатационные характеристики разделительного оборудования альтернативного каскада депротизации

Колонна	K1	K2	K3	K4			
КУ	РЛВН	РЛВН	РЛВН	СПН			
<i>L</i> , 10 ³ моль/ч	50	20	8	0.75			
σ	-	2.5	2.5	112.5*			
<i>L</i> *, кг/(ч м ²)	5500	5500	5500	1175			
<i>D</i> , м	0.48	0.30	0.19	0.121			
<i>h</i> , см	22.7	21.3	19.7	5.9			
N _m	95	105	120	170			
<i>Н</i> , м	22	23	24	10			
<i>P</i> ₀ , кПа	30	30	30	30			
P _{max} , кПа	65	65	65	55			
<i>х_{m, 1}</i> , ат. %	98.59	82.79	9.81	0.1			
<i>х_{m, Nm}</i> , ат. %	99.804	98.56	82.72	9.73			
<i>V</i> , м ³	3.981	1.626	0.680	0.115			
V_{Σ}, m^3	6.402						

* Флегмовое число L_1/G_0 .

Снижение максимально допустимого давления в нижней части колонн приводит к необходимости увеличивать их общее число, снижая высоту каждой колонны в отдельности. Несмотря на то, что общий объем разделительной части при этом монотонно уменьшается, такая операция совершенно нецелесообразна с практической точки зрения: растет число аппаратов (в том числе теплообменных), увеличивается длина коммуникаций, повышается вероятность отказа, усложняется обслуживание разделительной установки и т.п.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан метод проведения проектно-проверочных расчетов каскадов колонн для разделения изотопов путем ректификации воды. В основу метода положена математическая модель контактного устройства с двумя заданными характеристиками: зависимостью гидравлического сопротивления от удельной нагрузки и давления $\Delta p(L^*, P)$ и зависимостью ВЭТС от сечения колонны, удельной нагрузки и температуры $h(T, L^*, S_h)$. Отличительной особенностью метода является возможность замены одного КУ другим непосредственно в ходе расчета каскада.

Проведена верификация расчетного метода путем моделирования действующего каскада депротизации тяжеловодного замедлителя на Производственном объединении "Маяк". Выданы предварительные технологические параметры для проектирования альтернативного каскада депротизации. Как показывают результаты расчета, использование РЛВН вместо колпачковых тарелок позволяет снизить объем разделительного оборудования более чем в четыре раза при сохранении разделительной способности и производительности каскада.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки в рамках соглашения о предоставлении субсидии № 14.580.21.0001 от 01.12.2014 г. "Разработка и создание эффективных аппаратов-разделителей для получения кондиционной (с концентрацией 99.8%) тяжелой воды на ФГУП "ПО "Маяк" (идентификатор проекта RFMEF158014X0001).

ОБОЗНАЧЕНИЯ

- В поток отбора из нижней части последней колонны каскада, моль/ч;
 - диаметр колонны, м;
 - питающий поток, моль/ч;

номер теоретической ступени разделения, на которую поступает питание;

поток пара, моль/ч;

D

F

f

G

- *G*₀ поток пара, отбираемого из верхней части первой колонны, моль/ч;
- Н высота колонны, м;
- высота, эквивалентная теоретической ступени разделения, см;
- К коэффициент масштабного перехода
- *L* поток жидкости, моль/ч;
- *L** удельная нагрузка контактного устройства, кг/(ч м²);
- М число колонн в каскаде;
- т номер колонны;
- *N* общее число теоретических ступеней разделения;
- *N_m* число теоретических ступеней разделения в колонне;
- *n* номер теоретической ступени разделения;
- *Р* давление, кПа;
- P° давление насыщенного пара, кПа;
- *P*₀ давление в верхней части колонны, кПа;
- P_{max} давление в нижней части колонны, кПа;
- Δp гидравлическое сопротивление, кПа/м;
- *R* флегмовое число;
- S сечение колонны, м²;
- S_h сечение колонны с известной высотой, эквивалентной теоретической ступени разделения, м²;
- Т температура, К;
- *V* объем разделительной части колонны, м³;
- V_{Σ} суммарный объем разделительной части м³;
- х атомная доля дейтерия в жидкости;
- *x*_B атомная доля дейтерия в жидкости, отбираемой из нижней части последней колонны;
- *x*_F атомная доля дейтерия в питающем потоке;
- у атомная доля дейтерия в паре;
- *y*₀ атомная доля дейтерия в паре, отбираемом
 из верхней части первой колонны;
- α коэффициент разделения;
- η термодинамический критерий подобия процесса;
- θ произведение коэффициентов кратности потока в исчерпывающей части;
- σ коэффициент кратности потока.

ИНДЕКСЫ

- DH высокая концентрация дейтерия;
- HD низкая концентрация дейтерия;
- min минимальное значение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Andreev B.M., Magomedbekov E.P., Raitman A.A., Rozenkevich M.B., Sakharovsky Yu.A., Khoroshilov A.V. Separation of Isotopes of Biogenic Elements in Two-Phase Systems. Amsterdam: Elsevier, 2007. [Андреев Б.М., Магомедбеков Э.П., Райтман А.А., Розенкевич М.Б., Сахаровский Ю.А., Хорошилов А.В. Разделение изотопов биогенных элементов в двухфазных системах. М.: ИздАТ, 2003.]
- Kinoshita M. Computer-Aided Simulation Procedure for Water Distillation Columns // J. Nucl. Sci. Technol. 1984. V. 21. № 4. P. 299.
- Busigin A., Sood S.K. FLOSHEET A Computer Program for Simulating Hydrogen Isotope Separation Systems // Fusion Technology. 1988. V. 14. P. 529.
- Ahn D.H., Kim K.R., Chung H.S., Kim Y.E., Jeong I.J., Hong S.Y., Ko J.W. Computer Program Development for D₂O Upgrader Performance Management // J. Korean Nucl. Soc. 1990. V. 22. № 1. P. 1.
- Kalyanam K.M., Sood S.K., Fusca F., Busigin A. Heavy Water Upgrader Dynamic Simulation // Proceedings of the Annual Conference – Canadian Nuclear Society – Canadian Nuclear Association. 1997. V. 18. № 2. P. 15.
- Chan T.C., Van Hook W.A. Vapor Pressure Isotope Effects in Aqueous Systems. VIII // J. Solution Chem. 1976. V. 5. P. 107.
- 7. Van Hook W.A. Vapor Pressures of the Isotopic Waters and Ices // J. Phys. Chem. 1968. V. 72. № 2. P. 1234.
- 8. *Вертузаев Е.Д.* Расчет коэффициента масштабного перехода в промышленных насадочных ректификационных и абсорбционных колоннах // Химическая промышленность. 1982. № 8. С. 458.
- 9. Селиваненко И.Л., Суворкин К.Д. Регулярная ленточно-винтовая насадка. Пат. 139117 РФ. 2012.
- Magomedbekov E.P., Belkin D.Yu., Selivanenko I.L., Rastunova I.L. Characteristics of the mass transfer of structured rolled ribbon-screw packings in isotope exchange columns during vacuum water distillation // Theor. Found. Chem. Eng. 2016. V. 50. № 4. Р. 398. [Магомедбеков Э.П., Белкин Д.Ю., Селиваненко И.Л., Растунова И.Л. Массообменные характеристики регулярной рулонной ленточно-винтовой насадки в колоннах изотопного обмена при ректификации воды под вакуумом // Теорет. основы хим. технологии. 2016. Т. 50. № 4. С. 408.]