

66
ЖК23
БЕЛОРУССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМЕНИ С.М.КИРОВА

На правах рукописи

ЖАЛКОВСКИЙ Владимир Иванович

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ РАБОТЫ КОНТАКТНОЙ
СТУПЕНИ С ПРЯМОУГОЛЬНО-ЦЕНТРОБЕЖНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

(05.17.08 – Процессы и аппараты химической
технологии)

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Минск 1979

Работа выполнена в Белорусском технологическом институте имени С.М.Кирова.

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор ЕРШОВ А.И.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор НИКОЛАЕВ Н.А.,

кандидат технических наук, старший научный
сотрудник САВЕЛЬЕВ Н.И.

Ведущая организация: Ленинградский научно-исследовательский
и конструкторский институт химического машиностроения
(ЛенНИИХИММАШ).

Защита состоится "14" марта 1979 г. в 10 час.
на заседании специализированного совета К 056.01.03 по при-
суждению ученой степени кандидата наук в Белорусском техно-
логическом институте имени С.М.Кирова по адресу: 220630,
г.Минск, ул.Свердлова, 13а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорус-
ского технологического института имени С.М.Кирова.

Автореферат разослан "29" января 1979 г.

Ученый секретарь
специализированного совета

ДЗЮБА Е.Д.

I. Общая характеристика работы

Актуальность проблемы. Решение задач, поставленных ХХУ съездом ИХС, по повышению количества и качества продукции отраслей химической промышленности требует увеличения производительности существующих колонных аппаратов и создания новых агрегатов большой единичной мощности. Одним из путей увеличения пропускной способности колонны, одновременно с интенсификацией процесса массообмена, является осуществление взаимодействия фаз в закрученном потоке.

В последнее время на основе закрученного потока предложены принципиально новые конструкции скоростных контактных ступеней. В Белорусском технологическом институте им. С.М. Кирова разработаны и исследуются варианты ступеней элементного типа. Однако широкое применение таких ступеней в промышленности сдерживается недостаточной изученностью характеристик работы, отсутствием рекомендаций по конструктивным и технологическим параметрам, незавершенной методикой инженерного расчета.

Цель работы. Целью работы является создание высокопроизводительного массообменного аппарата с взаимодействием фаз в закрученном потоке и разработка методики его инженерного расчета.

Для достижения поставленной цели выполнены комплексные исследования гидродинамики и массопередачи на контактной ступени с прямоточно-центробежными элементами и проведен сравнительный анализ эффективности взаимодействия фаз при принципиально разных вариантах распределения жидкости, позволивший оценить влияние гидродинамической структуры потока жидкости на основные рабочие характеристики, а также выявить конструкции технологичные в изготовлении и устойчивые в работе.

Научная новизна. 1. Установлены гидродинамические режимы работы и закономерности переноса массы на контактной ступени элементного типа с циркуляцией, без циркуляции и частичной циркуляцией жидкости.

2. Предложена рециркуляционно-секционная математическая модель для определения эффективности элементной ступени с учетом перемешивания в жидкой фазе и установлена адекватность описания. Выполнен математический анализ влияния пере-

5213ар

мешивания в жидкой фазе на эффективность элементной ступени.

3. Разработана методика расчета основных гидродинамических и массообменных параметров контактной ступени с прямо-точно-центробежными элементами.

4. Предложена на уровне изобретения конструкция нового массообменного аппарата, обладающего более низким гидравлическим сопротивлением по сравнению с существующими аппаратами подобного принципа действия.

Практическая ценность. По результатам исследований осуществлено внедрение контактной ступени с прямоточно-центробежными элементами на Гродненском ПО "Азот", в производстве капролактама. Получен экономический эффект от внедрения в размере 165,4 тыс. рублей в год. Результаты опытно-промышленных испытаний показали, что ступени устойчиво работают в широком диапазоне нагрузок по фазам, обладают высокой производительностью и эффективностью, и, следовательно, могут быть рекомендованы для перспективного внедрения в ряде других производств.

Автор защищает: результаты экспериментальных исследований гидродинамики и массопередачи на контактной ступени с прямоточно-центробежными элементами; инженерный метод расчета гидравлического сопротивления, удельного расхода жидкой фазы через элемент, капельного уноса жидкости и коэффициентов массопередачи; математическую модель описания эффективности элементной ступени с учетом перемешивания в жидкой фазе; результаты теоретического анализа влияния перемешивания в жидкости на эффективность элементной ступени; результаты промышленных испытаний тарелок; конструкцию аппарата со ступенями улучшенных характеристик.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались и обсуждались на: Всесоюзном совещании по теории и практике ректификации нефтяных смесей (г.Уфа, 1975); УП молодежной научно-технической конференции "Научно-технический прогресс в химическом машиностроении" (г.Харьков, 1976); научно-технических конференциях Белорусского технологического института им.С.М.Кирова (1973-1978 гг.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 13 научных статей, получено авторское свидетельство СССР (№ 481291).

Объем работы. Диссертация изложена на 142 страницах ма-

шинописного текста и состоит из введения, четырех глав, описания практической реализации результатов исследований, выводов, списка использованной литературы (181 наименование) и приложения. Иллюстрационный материал содержит 56 рисунков и 4 таблицы.

2. Объект исследования

Для исследований принят один из наиболее простых конструктивных вариантов ступени с периферийным подводом жидкости в элемент, по авторскому свидетельству № 257439 - бюлл. изобр. № II, 1969, в различных исполнениях (рис. I): а) с рециркуляцией жидкости; б) с секционированием жидкостного потока и в) без рециркуляции. Секционирование ступени выполнено в соответствии с авторским свидетельством № 401376 - с помощью воротников, свободно одеваемых на поперечные ряды элементов.

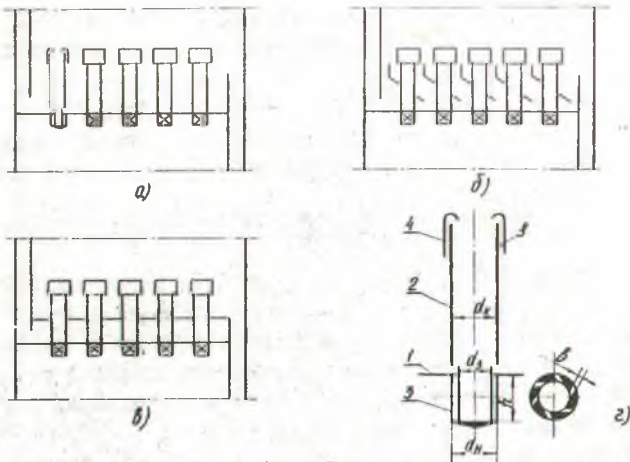


Рис. I

Основными рабочими узлами ступени являются (рис. I, г) закрепленные в подотте тарелки I контактные элементы, включающие в себя цилиндрические патрубки 2, тангенциальные закручиватели 3 и сепарационные колпачки 4. Газ, поступающий снизу колонны, распределяется по элементам тарелки и направляется через закручиватели в контактные патрубки для взаимодействия с жидкостью. Жидкость, поступающая в патрубки

через кольцевые щели в нижней части, под действием касательных напряжений со стороны закрученного потока газа перемещается в виде пленки по внутренней стенке и отводится в верхней части элементов с помощью сепарационных колпачков. Газ выходит через осевые отверстия колпачков.

Ступень с рециркулирующей жидкости (вариант в), отличающаяся наибольшей простотой в изготовлении и монтаже, принята в качестве основного исследуемого варианта. Две другие компоновки представляют также немалый интерес для практики.

В основной серии опытов контактные патрубки были внутренним диаметром 32 мм, длиной $4,5d$. С целью изучения закономерностей масштабного перехода, дополнительные серии опытов проведены на элементах с внутренним диаметром контактного патрубка 50, 85 и 102,5 мм.

Тангенциальные щели закручивателей в основной серии опытов приняты высотой, равной внутреннему диаметру контактного патрубка. Их количество равнолось шести, а суммарная площадь - свободной площади поперечного сечения контактного патрубка.

Ширина кольцевых щелей для подвода жидкости в наиболее узком сечении изменялась от 1 до 4 мм, для отвода (между внутренней стенкой патрубка и колпачком) от 0,5 до 8 мм.

3. Исследование гидродинамики контактной ступени с прямоточно-центробежными элементами

Гидравлическое сопротивление ступени. Ставилась задача исследования общего гидравлического сопротивления одно- и многоэлементной ступени, выражаемого коэффициентом сопротивления ξ , рассчитываемым по среднеосевой скорости газа в поперечном сечении камеры закручивателя. Первоначальным вариантом явилась одноэлементная ступень.

В целях сравнения с опытными данными других авторов, зависимость $\xi_{свх}$ от критерия крутки $m = F_{из} / F_3$ изучалась на элементе с $d_3 = d_k$ без сепарационного колпачка. Изменялись высота, ширина, количество тангенциальных щелей в толщине стенки камеры закручивателя. Диапазон изменения m составлял 0,38-3. Опытные точки в логарифмических координатах с незначительными отклонениями ложатся вблизи единой аппроксимирующей прямой. В широком диапазоне изменения m гидравлическое сопротивление неорошаемой ступени лучше опи-

связью степенной зависимостью, чем экспоненциальной, установленной ранее другими авторами.

Зависимость $f_{свх}$ от соотношения внутренних диаметров камеры закручивателя и контактного патрубка характеризуется минимумом гидравлического сопротивления при $d_3/d_k \approx 0,8$, что объясняется различным влиянием отдельных составляющих: сопротивления входа, расширения, выхода и трения. Заметного влияния диаметра контактного элемента на гидравлическое сопротивление ступени без орошения в диапазоне исследованных размеров не обнаружено.

Для расчета коэффициента гидравлического сопротивления одноэлементной несрошаемой ступени при оптимальном соотношении диаметров камеры закручивателя и контактного патрубка получена зависимость:

$$f_{свх} = 5,61 m^{-14} + f_{с.к.} \quad (1)$$

Для расчета коэффициента гидравлического сопротивления сепарационного колпачка рекомендована зависимость:

$$f_{с.к.} = 1,8 \left(\frac{2f}{d_k} \right)^{0,9} \quad (2)$$

Сопротивление орошаемой одноэлементной ступени изучалось на системах воздух-вода, воздух-водные растворы глицерина с вязкостью I-38 опз. В логарифмических координатах $f = f(L/G)$ обнаружено три режима с границами перехода при L/G в элементе 0,7 и 4. При перестроении опытных данных в координатах $\left(\frac{f}{f_{свх}} - 1 \right) - L/G$ с логарифмической сеткой точки с небольшим разбросом расположились вблизи единой прямой. Это позволило обобщить результаты по гидравлическому сопротивлению орошаемой одноэлементной ступени в виде единой расчетной зависимости:

$$f = f_{свх} \left[1 + a_1 (L/G)^{a_2} \left(\frac{\mu_{ж.н.}}{\mu_{ж.в.}} \right)^{a_3} \right] \quad (3)$$

Отклонение опытных точек от значений f , рассчитанных по формуле (3), не превышает $\pm 10\%$.

Исследования многоэлементной тарелки проведены в 3-ступенчатой колонке. У многоэлементной ступени появляются дополнительные потери из-за стесненных условий при распределении газа между элементами на входе, а также из-за встречных потоков газа на выходе из элементов.

Согласно результатам исследований, при $t/d_N > 1,3$ коэф-

коэффициент гидравлического сопротивления многоэлементной ступени равен среднему коэффициенту сопротивления отдельного элемента. При $t/d_n < 1,3$ его значение резко возрастает. Отношению $t/d_n = 1,3$ соответствует живое сечение равное $\approx 25\%$. Поскольку тарелки с $t/d_n < 1,3$ трудно изготовить в промышленности вследствие значительного ослабления полотна, для расчета гидравлического сопротивления ступени с $t/d_n \geq 1,3$ рекомендуются полученные выше зависимости, справедливые во всем интервале исследованных параметров.

Удельный расход жидкости через элемент. Изучение удельного расхода жидкой фазы через элемент выполнено на ступени с рециркулирующей жидкостью. Для ступени с секционированием жидкостного потока зависимости имеют подобный характер. На ступени без рециркуляции жидкости ее удельный расход кратен доле, пропорциональной числу элементов.

Опыты проводились при уровнях жидкости на тарелке 60, 70, 80 и 90 мм, образованных сливными перегородками разной высоты. В дополнительной серии опытов изменялись размеры подводящих щелей и вязкость жидкости. При обработке опытных данных установлена наилучшая сходимостъ с формулой, полученной в БТИ им.С.М.Кирова:

$$L = \varphi F \left[-\varphi A W_k + \sqrt{2gH + (\varphi^2 A^2 - C) W_k^2} \right]. \quad \text{м}^3/\text{с}, \quad (4)$$

где $A = \kappa F / F_k$; $C = \rho_2 / \rho_k (1 - \rho + \rho_{\text{ж}} + 2\kappa_L)$.

Значения коэффициентов, определенные с помощью ЭЕМ для условий опытов, равны: $\varphi = 0,72$; $\kappa = 0,64$; $C = 0,0016$.

Зависимость показала хорошую сходимость результатов, полученных как в основной, так и в дополнительной серии экспериментов. Расчет по формуле дает расхождение не более $\pm 8\%$.

Капельный унос жидкости. Исследование выполнено как на одно-, так и на многоэлементной ступенях. Ступень с одним элементом помещалась в прозрачную колонну диаметром 100 мм, многоэлементная - в колонны различного диаметра, в зависимости от шага размещения элементов. Изучалось влияние на унос удельных расходов фаз, размеров сепарационного колпачка, межтарельчатого расстояния (свободного пространства над элементами) и живого сечения ступени.

Определяющее влияние на величину уноса оказывает ширина затора между контактными патрубком и колпачком, с увеличением

которого доля первичного уноса уменьшается. Однако одновременно с этим появляется и растет вторичный унос. Оптимальная высота посадки колпачка достигается, когда сепарационный зазор в верхней части равен $\approx 1,5$ основного зазора между патрубком и колпачком.

Величина первичного уноса при оптимальной ширине зазоров может быть определена с помощью обобщенной зависимости вида:

- при $q < 2$

$$e_{\text{эл}} = 8,06 \cdot 10^{-3} q^{2,5} W_k^{-3,7}, \quad \text{м}^3/\text{с} \quad (5)$$

- при $2 < q < 3,7$

$$e_{\text{эл}} = 4,16 \cdot 10^{-4} q^{2,5} W_k^{-2,7}, \quad \text{м}^3/\text{с}. \quad (6)$$

Доля вторичного уноса существенно зависит от величины живого сечения ступени. На рис. 2 представлены графические зависимости межтарельчатого уноса со ступени, содержащей семь прямоочес-центробежных контактных элементов, расположенных по вершинам равносторонних треугольников, в зависимости от среднеосевой скорости газа в контактном патрубке и живого сечения ступени, при величине свободного пространства над элементами 47 мм и высоте сливной перегородки 80 мм. Пунктирной линией показан суммарный первичный капельный унос из элементов.

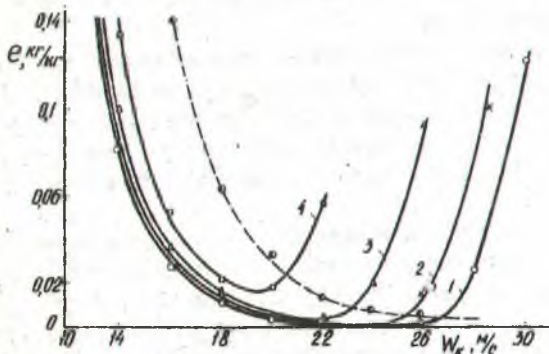


Рис. 2

1 - $f = 12,4\%$

2 - $f = 18,9\%$

3 - $f = 24,8\%$

4 - $f = 41,1\%$

Появление вторичного уноса наблюдается в области скоростей, где кривые на графике начинают загибаться вверх. Причиной возникновения его является частичный выход газа под сепарационный колпачок.

С увеличением живого сечения ступени первичный унос рас-

тет незначительно. Граница же появления вторичного уноса заметно смещается в сторону меньших скоростей газа. Зависимости межтарельчатого уноса с одно- и многоэлементной ступени одинакового живого сечения практически повторяют друг друга.

Величина суммарного первичного уноса из элементов на многоэлементной ступени, при отсутствии вторичного уноса, выше полного межтарельчатого уноса. Визуально наблюдалось, что часть уносимых из элементов капель оседает на внутренних стенках колонны и днище верхней тарелки, с которых жидкость стекает назад на ступень.

Опытные данные по межтарельчатому уносу со ступени, содержащей семь прямоточно-центробежных контактных элементов при скоростях газа до появления вторичного уноса, обобщены в виде расчетной зависимости

$$e_r = e_m n (1 - 130 W_a^{0.25} H_0^{0.25}), \quad \text{м}^3/\text{с} \quad (7)$$

Граница появления вторичного уноса определяется зависимостью

$$W_k^{0.15} = 10 + 32.5 q \cdot 10^{-0.15} \quad (8)$$

Диапазон рабочих нагрузок. На системе воздух-вода при атмосферном давлении ступени с рециркулирующей жидкостью и секционированием потока вступают в работу при среднеосевой скорости газа в контактных патрубках 9-11 м/с. Причем, верхнее значение скорости соответствует большему диаметру элементов. Максимально-допустимой является среднеосевая скорость газа в контактных патрубках ≈ 30 м/с.

При скорости газа > 30 м/с работа ступени нарушается вследствие того, что давление центробежных сил на стенке контактного патрубка превосходит по величине давление, создаваемое столбом жидкости на тарелке. При этом газ начинает выходить через кольцевой зазор для подвода жидкости в слой на тарелке.

На ступени без рециркуляции жидкости с герметичной установкой промежуточного полотна решающее влияние на устойчивую работу оказывает расход жидкой фазы. При оптимальных нагрузках по жидкости нижний предел нагрузок по газу здесь совпадает с таковым для двух предыдущих вариантов, а верхний может быть расширен. При установке промежуточного полотна с зазором у стенок часть жидкости перетекает на тарелке, минуя контактные устройства, что снижает эффективность рабо-

ты ступени.

Принимая ограничения по живому сечению $\leq 25\%$, по гидравлическому сопротивлению $\Delta P \leq 350$ мм вод.ст., по уносу $E \leq 0,1$ кг/кг, при величине свободного пространства над элементами 100 мм и более, предельные среднесрезовые скорости газа в контактных патрубках составят: нижняя - 10 м/с, верхняя - 28 м/с (в сечении аппарата, соответственно, 2,5 и 7 м/с). Соотношение максимальной и минимальной нагрузок по газу равно 2,8. С учетом плотности газа диапазон рабочих нагрузок может быть определен на основе предложенных ранее рекомендаций.

4. Математическая модель определения эффективности элементной контактной ступени

Известные математические модели не совсем адекватно описывают процесс массопередачи на элементной ступени контакта вследствие несоответствия принятой и реальной гидродинамической структуры потока жидкости.

Основой для установления закономерностей движения жидкости на контактной ступени с прямоточно-центробежными элементами при рециркуляции явились опыты с красителем, в ходе которых выявлено наличие частичного обратного тока жидкости от элемента к элементу. Учитывая это обстоятельство, для математического описания эффективности элементной ступени принята рециркуляционно-секционная модель с обратным потоком жидкости (рис. 3).

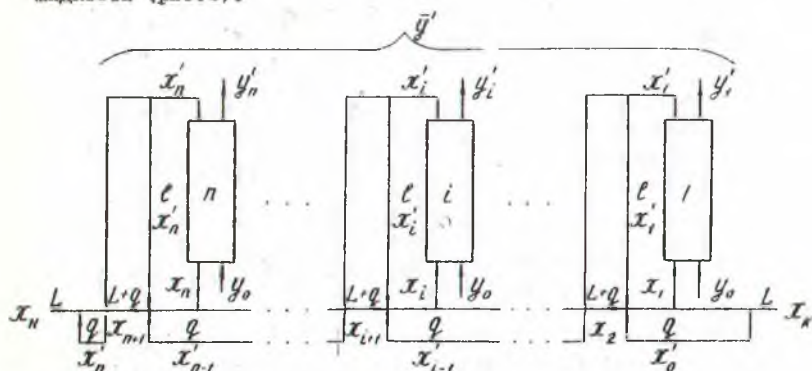


Рис. 3

Допускается, что число элементов в поперечных рядах одинаковое, газ поступает на ступень контакта полностью перемешанным и равномерно распределяется по сечению колонны. Жидкость поступает во все патрубки также в равном количестве, что достигается отсутствием градиента на тарелке. Линейность равновесной зависимости в пределах ступени и равенство эффективности всех элементов принимается по аналогии с другими авторами. Ступень делится в направлении движения жидкости на n секций, число которых соответствует числу элементов в рядах вдоль потока. Степень перемешивания учитывается параметром $\rho = q/L$, а циркуляции - параметром $K = \ell/L$. Бойпас в модели исключается, поскольку он не обнаруживается опытным путем. Проскок в явном виде не вводится, но появление его учитывается при составлении уравнений баланса. В пределах секции газ с жидкостью взаимодействуют в прямотоке. В целом на тарелке движение фаз перекрестное.

Рассматривается один продольный ряд элементов, счет которых ведется с конца ступени, что не влияет на вычисления и позволяет освободиться от излишних допущений. Осуществляется последовательное нахождение концентраций.

Расчетное выражение для эффективности ступени по газовой фазе получено в виде

$$E_{\text{гв}} = \frac{y' - y_0}{y^*(x_k) - y_0} = \frac{1}{\lambda} (\Delta_H - 1), \quad (9)$$

где $\Delta_H = (1 + \rho) \Delta_{n+1} - \rho V \Delta_n$; $V = \frac{1}{1 + \lambda' E_V}$; $\lambda' = \frac{m \Delta B}{\Delta L}$; $\Delta L = q + \ell$;

Δ_n, Δ_{n+1} - разности концентраций для i -й и $(i + 1)$ -й секций, определяемые суммированием ряда в зависимости от числа секций.

Выражение (9) отражает рассмотренные ранее другими авторами различные частные случаи. Например, при $n = 1$, т.е. в случае полного перемешивания жидкости получаем

$$E_{\text{гв}}^{n=1} = \frac{E_V}{1 + \lambda' E_V}, \quad (10)$$

где $\lambda = \frac{\Delta L}{L/n}$ - коэффициент циркуляции, равный для $n = 1$ степени циркуляции K .

При $\rho = 0$, т.е. в случае отсутствия перемешивания выражение приводится к виду

$$E_{\text{гв}} = \frac{1}{\lambda} \left[\left(1 + \frac{\lambda' E_V}{1 + \lambda' E_V} \right)^n - 1 \right] \quad (11)$$

В случае $\rho = 0$ и $K = 0$, получаем $E_{\text{от}} = 0$. При $z \rightarrow \infty$ $E_{\text{от}}$ становится равной E_v .

При числе секций на ступени $n = 5$, для которой определяется адекватность модели, выражение (9) приводится к виду

$$E_{\text{от}} = \frac{1+\rho}{\lambda} \left\{ \left(a - \frac{\theta}{\beta} \right) \left[(a^2 - \theta)^2 - a^2 \theta \right] - a \theta (a^2 - 2\theta) \right\} - \frac{\rho \beta}{\lambda} \left[a \left(a - \frac{\theta}{\beta} \right) (a^2 - 2\theta) - \theta (a^2 - \theta) \right] - \frac{1}{\lambda}, \quad (12)$$

где $a = \frac{1+2\rho+K(1-\beta)}{1+\rho}$, $\theta = \frac{\rho\beta}{1+\rho}$.

Для обчета уравнения (9) исходными условиями введен коэффициент распределения ε , позволяющий варьировать параметрами ρ и K без изменения расхода жидкости через элемент ΔL . Коэффициенты циркуляции K и перемешивания ρ при этом соответственно выразились через ε :

$$K = \frac{\varepsilon \Delta L}{L} = \frac{\varepsilon \tau}{n} \quad (13)$$

$$\rho = \frac{(1-\varepsilon) \Delta L}{L} = \frac{(1-\varepsilon) \tau}{n} \quad (14)$$

Расчет выполнен на ЭВМ "Минск-22М" для $n = 2; 5$ и 10 . Коэффициент λ принимался равным $0,2; 1$ и 5 .

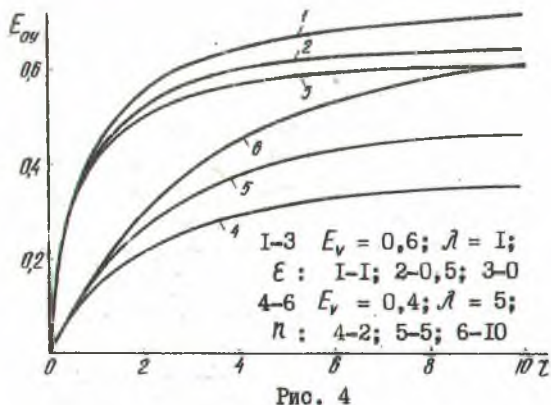


Рис. 4

На рис. 4 приведена зависимость эффективности ступени с рециркуляцией жидкости от коэффициента циркуляции τ , согласно расчету по формуле (9). При $\varepsilon = 1$ (кривые 1-3), отража-

шем вариант $Q = 0$, т.е. когда перемешивание отсутствует, эффективность ступени наибольшая. С уменьшением ε эффективность падает (кривые располагаются ниже). Понижение эффективности с уменьшением ε особенно наглядно проявляется при малых n и несколько сглаживается при больших.

С увеличением числа секций n (кривые 4-6) эффективность

ступени повышается и при больших γ она может превосходить эффективность отдельной секции. С уменьшением λ кривые сближаются и при $\lambda = 0,2$ они уже практически сливаются в одну линию.

Для проверки адекватности модели использовались полученные в достаточно полном объеме опытные данные по эффективности взаимодействия фаз при десорбции CO_2 воздухом из водного раствора, а также по степени циркуляции жидкости через элементы. Для перехода с эффективности по газовой фазе на эффективность по жидкой и наоборот использовались известные из литературы соотношения.

Выполненные расчеты показали, что при использовании в модели в качестве эффективности секции опытной величины эффективности отдельного элемента, расчетные значения эффективности ступени получаются ниже экспериментальных. Такие результаты позволили предположить наличие на ступени дополнительной зоны массообмена. С целью проверки предположения поставлен эксперимент, когда подводы жидкости в элементы заглушались и она перетекала только по полотну тарелки. При этом, вследствие массообмена через свободную поверхность (зеркало жидкости), эффективность ступени по жидкой фазе в процессе десорбции CO_2 воздухом из водного раствора оказалась равной в среднем 0,2.

Установленный факт позволил обоснованно ввести в модель дополнительную ячейку межэлементного массообмена. Эффективность секции была представлена состоящей из двух последовательно составленных ячеек — чисто элемента и межэлементной зоны. В этом случае расхождение экспериментальных и вычисленных с учетом межэлементного массообмена численных значений эффективности ступени не превышает $\pm 14,0\%$. Адекватное описание эффективности элементной ступени с помощью математической модели позволяет при экспериментальном исследовании процесса массообмена ограничиться определением эффективности отдельного элемента, или, с учетом известных зависимостей перехода к эффективности, коэффициента массопередачи для отдельного элемента.

5. Экспериментальное исследование эффективности взаимодействия фаз на контактной ступени с прямоточно-центробежными элементами

Изучалась эффективность взаимодействия фаз в процессе де-

сорбции CO_2 воздухом из водного раствора и абсорбции NH_3 водой из аммиачно-воздушной смеси. Для исследований принята одиночная ступень, что позволило исключить влияние уноса. Опыты проведены на лотковой тарелке различного исполнения, содержащей пять прямоточно-центробежных контактных элементов, расположенных на оси с шагом 55 мм.

5.1. Закономерности массопередачи при диффузионном сопротивлении в жидкой фазе

Ступень с рециркуляцией жидкости. Данный вариант характеризуется условиями идеального перемешивания жидкости на тарелке. Изучалась эффективность ступени в целом, отдельных элементов, локальная эффективность контакте фаз в различных зонах элемента, распределение концентраций CO_2 в жидкости на тарелке и влияние концентрации CO_2 в жидкости на эффективность. Удельное орошение составляло: на ступени I, $3,33 \pm 0,33 \text{ м}^3/\text{мч}$ (отнесено к ширине слива), в элементе $-0,8 \pm 0,3, 5 \text{ м}^3/\text{мч}$ (в расчете на периметр контактного патрубка).

Эффективность ступени, представленная на рис.5 кривой а), для сливной перегородки высотой 80 мм и нагрузки по жидкости $5,33 \text{ м}^3/\text{мч}$, с увеличением скорости газа остается практически постоянной и равняется при средних нагрузках по газу $\approx 0,74$. С увеличением плотности орошения к.п.д. падает, а высота сливной перегородки растет. Эффективность отдельного элемен-

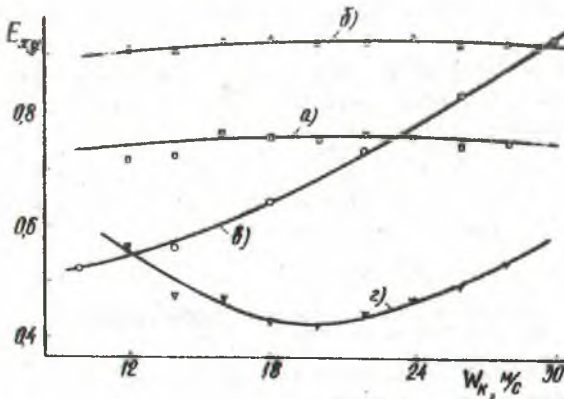


Рис.5.

а) и г) — ступень с рециркуляцией жидкости;
 б) — с секционирование жидкостного потока;
 в) — без рециркуляции;
 а)–в) — опыты при десорбции CO_2 воздухом;
 г) — при абсорбции NH_3 водой.

та на ступени с рециркуляцией жидкой фазы от скорости газа увеличивается, асимптотически приближаясь к единице.

Установлено, что преобладающая доля массообмена протекает в пленочной зоне, в зоне же сепарации она составляет в среднем 10-20%. У входа жидкости на тарелку имеет скачок концентраций, подтверждающий наличие перемешивания. По высоте слоя изменение концентраций незначительное. С увеличением содержания CO_2 в жидкости до концентраций 0,9-1 г/л эффективность элемента несколько повышается. При более высоких концентрациях она остается постоянной, что не противоречит выводам других авторов.

Ступень с секционированием жидкостного потока. Целью секционирования является уменьшение перемешивания жидкости на тарелке. Условия проведения опытов оставались аналогичными предыдущим. В случае секционирования жидкостного потока эффективность ступени (рис.5, кривая δ) повышается. Данные приведены при нагрузке по жидкости $5,33 \text{ м}^3/\text{мч}$. Характер кривых во всем диапазоне нагрузок по газу не изменяется.

Ступень без рециркуляции жидкости. Ступень без рециркуляции жидкости характеризуется равенством концентраций на входе и выходе у всех элементов. Эффективность ступени в данном случае равняется эффективности отдельного элемента и изображена на рис.5, кривой ϵ . Согласно рисунку, эффективность ступени с увеличением скорости газа растет и при достижении верхних предельных нагрузок по газу может превосходить эффективность ступени при двух предыдущих вариантах распределения жидкости.

Коэффициенты массопередачи, отнесенные к суммарному объему контактных патрубков, могут быть определены с помощью следующих обобщающих зависимостей:

$$- \text{ для режима I } K_{жв} = 121,7 q^{0,37} W_k^{0,52}, \quad \text{I/ч} \quad (15)$$

$$- \text{ для режима II } K_{жв} = 7,67 q^{0,37} W_k^{1,54}, \quad \text{I/ч} \quad (16)$$

Графике перехода режимов описана уравнением

$$W_k^{кр} = 17 q^{0,115} \quad (17)$$

5.2. Закономерности массопередачи при диффузионном сопротивлении в газовой фазе

В случае диффузионного сопротивления переносу массы в газовой фазе эффективность ступени мало зависит от характера распределения жидкости. Поэтому, опытные данные приведены только для варианта с рециркуляцией жидкой фазы (рис.5, кривая γ). Первоначальное понижение эффективности с увеличением

скорости газа можно объяснить уменьшением времени контакта его сожидкостью в элементах. Последующий рост происходит за счет интенсификации массообмена в зоне сепарации элементов и межэлементном пространстве.

В целом эффективность ступени при абсорбции NH_3 водой оказалась меньше, чем при десорбции CO_2 воздухом и при средних нагрузках по газу составляет $\approx 0,44$. Характер распределения концентраций NH_3 в жидкости остается аналогичным предыдущему, обнаруживается лишь более сильное влияние плотности орошения.

6. Практическая реализация результатов исследований

Результаты исследования контактной ступени с прямоточно-центробежными элементами позволили осуществить ее внедрение в отделении циклогексана производства капролактама Гродненского ЦО "Азот".

Обследование производства капролактама показало, что после основной ректификационной колонны в побочной спиртовой фракции содержится много ценного промежуточного продукта циклогексанола (анола) и циклогексанола (анола). В целях более полного извлечения их из спиртовой фракции была дополнительно установлена колонна с 30-тью прямоточно-центробежными элементными ступенями контакта. После внедрения колонны содержание анола и анола в спиртовой фракции уменьшилось в среднем с 54,3 до 14,4%, что позволило вернуть в производство около 160 кг/ч дорогостоящего продукта. Экономический эффект от внедрения составил 165,4 тно.рублей в год.

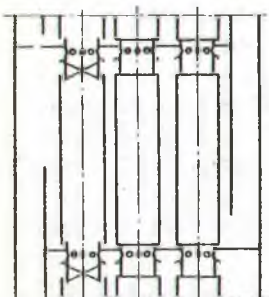


рис.6

По результатам исследования разработан также на уровне изобретения массообменный аппарат с взаимодействием фаз в закрученном потоке (рис.6), отличающийся более низким гидравлическим сопротивлением по сравнению с аппаратами подобного принципа действия. Снижение гидравлического сопротивления достигается за счет совмещения по высоте соосно расположенных элементов, в результате чего не расходуется энергия на

расширение газа при выходе его из элементов нижележащей ступени.

пени и на переформирование потока на входе элементов выходящей. Осуществляемый через отверстия в переточных патрубках выше закручивателей возврат газа из межэлементного пространства позволяет снизить до минимума капельный унос жидкости.

В ы в о д ы

1. Развитие химической промышленности неразрывно связано с созданием совершенного оборудования, включая и массообменную колонную аппаратуру для процессов абсорбции и ректификации.

2. В настоящее время для широкого практического применения представляют интерес исследования по установлению перспективной конструкции скоростной контактной ступени элементного типа из трех возможных вариантов: с рециркуляцией жидкой фазы, с секционированием потока и без рециркуляции.

3. В зависимости от нагрузок по жидкости и газу установлены различные гидродинамические режимы и диапазон устойчивой работы элементных контактных ступеней. Нижним пределом, определяемым провалом жидкости, является среднесредняя скорость газа в контактных патрубках 9-11 м/с при атмосферном давлении, а верхний предел, определяемый вторичным уносом, достигается при скорости газа в патрубках 28-29 м/с.

4. В процессах с диффузионным сопротивлением переносу массы в жидкой фазе эффективность ступеней с рециркуляцией жидкости и секционированием потока практически не зависит от нагрузки по газу, а ступени без рециркуляции резко меняется. Максимальной эффективностью в широком диапазоне нагрузок по газу обладает ступень с секционированием жидкостного потока.

5. В процессах с диффузионным сопротивлением переносу массы в газовой фазе эффективность ступеней слабо зависит от характера распределения потока жидкости и в рабочем диапазоне скоростей ниже, чем в процессах с диффузионным сопротивлением переносу массы в жидкости.

6. Для математического описания эффективности элементной контактной ступени с учетом перемешивания в жидкой фазе предложена рециркуляционно-секционная модель с частичным обратным потоком жидкости, адекватно описывающая процесс массообмена и позволяющая рассчитывать эффективность ступени при известном значении эффективности отдельной секции.

7. Опытные-промышленные испытания и внедрение контактных

ступеней с прямоточно-центробежными элементами на Гродненском ЮО "Азот" показали их устойчивую работу в широком диапазоне нагрузок по фазам и позволили рекомендовать данные конструкции для внедрения на других производствах.

8. По результатам исследований разработана на уровне изобретения и рекомендована для практического применения элементная контактная ступень с улучшенными технико-экономическими характеристиками.

Условные обозначения

- $F_{ц}, F_3$ - площадь тангенциальных щелей и поперечного сечения камеры закручивателя выше щелей, м²;
 $\xi = \frac{2\Delta P_{гид}}{\rho W_2^2}$ - коэффициент гидравлического сопротивления "сухого" элемента (ступени);
 $\xi, \xi_{вх}$ - коэффициент гидравлического сопротивления орошаемого элемента и входа;
 L - весовой расход жидкости, кг/с; объемный расход жидкости через элемент, м³/с;
 G - весовой расход газа, кг/с;
 σ - удельный расход жидкости через элемент (плотность орошения), м³/м²; доля обратного потока;
 ζ - удельный расход жидкости на тарелку в расчете на ширину слива, м³/м²; доля рециркулирующего потока;
 e_m, e_r - доля первичного и межтарельчатого уноса жидкости со ступени, м³/с;
 n - число элементов на тарелке; число секций;
 W_a - скорость газа в сечении аппарата, м/с;
 H_0 - высота свободного пространства над элементами, м;
 E_m, E_v - эффективность ступени в целом и ζ -й секции по газу;
 $\Delta L, \Delta G$ - расход жидкости и газа, приходящийся на один контактный элемент.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Ершов А.И., Плеков И.М., Жалковский В.И. Скоростная контактная тарелка. - Пром-сть Белоруссии, 1975, №5, с.73.
2. Ершов А.И., Жалковский В.И. Прямоточно-центробежная тарелка. - Угль и нефть. машиностроение. - М.: ЦИНТИХимнефте-маш, 1975, №1, с.5-6.
3. Ершов А.И., Жалковский В.И., Плеков И.М. Элементная ступень контакта массообменных аппаратов высокой пропускной способности. - В сб.: Оборудование, его эксплуатация, ремонт и защита от коррозии в хим.пром-сти. - М.: НИИТЭХИМ, 1975, вып.6, с.5-8.

4. Жалковский В.И., Ершов А.И. Сравнительные исследования эффективности прямоточно-центробежных контактных тарелок. - В сб.: Эксплуатация, модернизация и ремонт оборудования. - М.: ЦНИТЭнефтехим, 1975, №3, с.17-18.

5. Жалковский В.И. Исследование работы прямоточно-центробежной тарелки элементного типа при рециркуляции жидкости. - Химия и хим.технология. - Мн.: Вышэйш.школа, 1974, вып. 7, с.177-181.

6. Исследование характеристик прямоточно-центробежной контактной тарелки /Ершов А.И., Плехов И.М., Жалковский В.И., Малышев Г.А. - Науч. труды /НИИхиммаш. - М., 1975, вып.72. Теплохимическая, теплообменная аппаратура, с. 70-86.

7. Жалковский В.И., Протасов С.К. Исследование гидродинамических закономерностей в прямоточно-центробежных контактных элементах. - Химия и хим.технология. - Мн.: Вышэйш. школа, 1975, вып.8, с.181-185.

8. Жалковский В.И., Ершов А.И. Исследование массопередачи на контактной ступени с прямоточно-центробежными элементами. - Химия и хим.технология. - Мн.: Вышэйш. школа, 1975, вып. 8, с. 190-195.

9. А.с. 481291 (СССР). Массообменный аппарат /Жалковский В.И., Ершов А.И., Плехов И.М. Оpubл. в Б.И., 1975, №31.

10. Ершов А.И., Жалковский В.И., Плехов И.М. Разработка и исследование тарелок с прямоточно-центробежными контактными элементами: Тезисы всес.совещ. по теории и практике ректификации нефтяных смесей. - Уфа, 1975, с. 301-303.

11. Жалковский В.И., Ершов А.И. Исследование массообменных характеристик прямоточно-центробежных контактных элементов. - Химия и хим.технология. - Мн.: Вышэйш. школа, 1975, вып. 9, с. 146-150.

12. Жалковский В.И., Ершов А.И. Математическое моделирование массообменной тарелки с прямоточно-центробежными контактными элементами. - Химия и хим.технология. - Мн.: Вышэйш. школа, 1976, вып.10, с. 160-165.

13. Жалковский В.И., Хотин Л.М., Ершов А.И. Разработка и исследование скоростной контактной ступени элементного типа: Экспресс информация /ЦИНТИхимнефтемаш, 1977, № 2, сер. ХМ-1, с. 3-4.

14. Ершов А.И., Протасов С.К., Жалковский В.И. Исследо-

вание уноса жидкости в колоннах с контактными твердками элементного типа. - Химия и хим.технология. - Мн.: Вышэйш.школа, 1978, вып. 13, с. 95-99.

Владимир

Владимир Иванович Жалковский

Исследование закономерностей работы контактной ступени с прямоточно-центробежными элементами.

Подписано в печать 23.01.79. АТ-01536. Формат 60x84/16.

Усл.печ.л. 1,11. Уч.-изд.л. 1,2. Тираж 100 экз. Заказ 46

Бесплатно.

Отпечатано на ротационте БТИ им.С.М.Кирова.

220630, Минск, Свердлова, 13.