

66
К-30

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
Б С С Р

БЕЛОРУССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМЕНИ С.М.КИРОВА

На правах рукописи

Кацашвили Виталий Гаврилович

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ЭЛЕМЕНТНОЙ СТУПЕНИ КОНТАКТА
С ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ ФАЗ В ЗАКРУЧЕННОМ ПРЯМОТОКЕ

(05.Г7.08 - 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 - 1974

06
К-30

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
Б С С Р

БЕЛОРУССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМЕНИ С.М.КИРОВА

На правах рукописи

Кацашвили Виталий Гаврилович

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ЭЛЕМЕНТНОЙ СТУПЕНИ КОНТАКТА
С ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ ФАЗ В ЗАКРУЖЕННОМ ПРЯМОТОКЕ

(05.17.08 - Процессы и аппараты химической
технологии)

3549ap

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

Минск - 1974

БИБЛИОТЕКА БТИ
ИМЕНИ С. М. КИРОВА

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

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент А.И. ЕРШОВ

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор И.А. АЛЕКСАНДРОВ,
кандидат технических наук Г.А. ФАТЕЕВ.

Ведущее предприятие: ЛЕННИХИМАШ (Ленинградский научно-
исследовательский и конструкторский
институт химического машиностроения).

Автореферат разослан "15" окт 1974 г.

Защита диссертации состоится "20" нояб 1974 г.
в 10⁰⁰ час. на заседании Совета Белорусского технологического
института имени С.М.Кирова (220630, г.Минск, ул. Свердлова,
ГЗа, корп. 4).

Просим Ваши отзывы по автореферату в двух экземплярах
направлять в адрес Ученого Совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Ученый секретарь Совета
кандидат технических наук

(Е.А. Грушевская)

Все возрастающие требования к качеству продуктов и тенденция к увеличению производительности массообменной аппаратуры привели к созданию принципиально новых ступеней контакта. Сравнительный анализ различных контактных устройств, в основу которого положена величина удельного съема продукции, показывает, что большими преимуществами обладают аппараты с прямоточным движением контактирующих фаз.

Еще большая интенсификация взаимодействия фаз в прямотоке достигается закручиванием потока. В связи с этим в последнее время предложены и исследуются тарелки элементного типа, на которых контакт фаз организуется в коротких трубах со статическим закручивателем на начальном участке. Такие ступени контакта, не имеющие принципиальных ограничений по диаметру, позволяют достичь значительной скорости газа, считая на полное сечение аппарата, при этом эффективность может быть весьма высокой. Применение центробежной сепарации позволяет резко уменьшить унос и сократить межтарельчатое расстояние.

В закрученном потоке, в отличие от осевого, максимум осевой скорости смещен к стенке трубы, в то время как в центре трубы появляется зона обратных токов. Максимум вектора полной скорости, также локализованный вблизи границы раздела фаз, превосходит вектор осевой скорости в 1,5 - 3 раза, что приводит к значительной турбулизации как газовой фазы, так и жидкой пленки и увеличению поверхности контакта за счет интенсивного волнообразования.

Целью данной работы является исследование гидродинамики и массообмена в отдельном элементе с закрученным восходящим прямотоком фаз, а также на элементной ступени контакта.

Общая задача исследования разделена, словно на внутреннюю и внешнюю. К внутренней задаче отнесено исследование работы отдель-

ного элемента, как самостоятельной конструктивной и массообменной подсистемы, взаимодействие фаз внутри которой зависит от структуры пленочного течения, продольного рассеяния вещества в пленке, её толщины, скорости газа и количества жидкости, проходящей через элемент. К внешней задаче отнесены вопросы, связанные с гидродинамической обстановкой на ступени и её эффективностью, которые определяются эффективностью отдельных элементов, распределением жидкости по отдельным элементам и по ступени в целом (байпас, проскоки, циркуляция), а также распределением газа по элементам. Эти, внешние по отношению к элементу, факторы практически не оказывают влияния на гидродинамику элемента, что и позволило условно разграничить задачи.

Диссертация состоит из введения, 3-х глав, списка цитированной литературы и приложения с основными экспериментальными результатами. Литературные данные приводятся в начале каждой главы и привлекаются в отдельных случаях для более подробного анализа и обсуждения результатов.

В первой главе рассматриваются вопросы, связанные с исследованием гидродинамических характеристик пленочного течения в двухфазном кольцевом закрученном потоке. Кратко прослежено развитие исследований пленочных течений, включая теоретические. Несмотря на большую важность аналитических решений, они не предсказывают многих особенностей волнового течения жидкости, особенно при больших плотностях орошения и высоких скоростях газа и имеют на данном этапе ограниченное применение. Несколько подробнее рассматриваются течения в кольцевом осевом потоке и закрученные пленочные течения. Отмечается, что особенности движения газа в двухфазном закрученном потоке изучены более полно, в то же время недостаток информации, необходимой для понимания физи-

ческой сущности пленочного течения, сдерживает разработку методов расчета и применение перспективных скоростных контактных устройств.

Исходя из цели наиболее полного исследования структуры пленочного течения в двухфазном закрученном потоке нами была выбрана индикаторная методика. В качестве индикатора применялся раствор хлористого калия. Входной сигнал осуществлялся в виде единично-ступенчатой функции — отсечкой подачи индикатора при помощи быстросрабатывающего клапанного переключателя. Остатки индикатора из подающей системы удалялись при одновременном включении вакуумной системы с регулируемой глубиной вакуума и скоростью откачки. Выбранная форма сигнала позволяет свести к минимуму динамические возмущения от самого сигнала и, что наиболее важно, существенно упрощает процедуру тарировки. Тарировка проводилась при дозированной подаче индикатора, осуществляемой с помощью тщательно оттарированного микроротаметра, с записью на ленте осциллографа зависимости "ток — концентрация". Отклик на возмущение получали в виде зависимости "ток — время". Учитывая, что проводимость пленки существенно зависит от нагрузки по жидкости и скорости газа, тарировку выполняли для каждого случая получения кривой отклика. Электронная схема состояла из стабилизатора напряжения, генератора высокочастотных колебаний, электронного усилителя, выпрямителя-демодулятора и осциллографа.

Исследование проводили на круглой трубе (рис. 1) диаметром $38,75 \pm 0,05$ мм и длиной 380 мм. Предварительная закрутка газовой фазы осуществлялась тангенциальным статическим закручивателем. Диапазон изменения режимных параметров составлял от 65,3 до 440,0 л/час по жидкости, что соответствует плотности орошения от 0,537 до $3,610 \text{ м}^3/\text{м. час}$, и нагрузке по газу от 76,8 до $117,5 \text{ м}^3/\text{час}$, что соответствует среднерасходной осевой скорости газа от 18,0

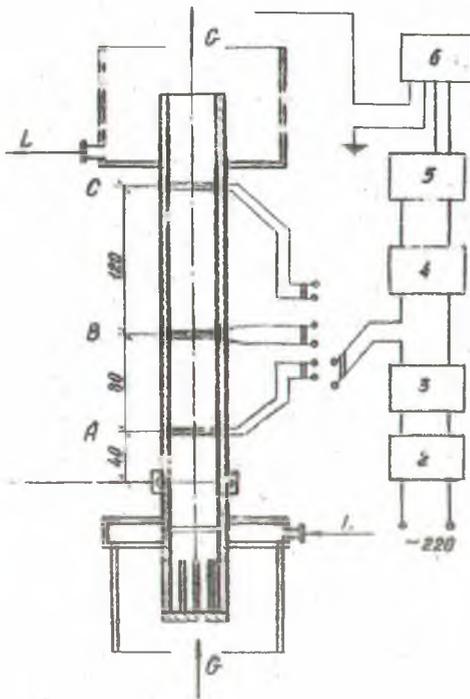


Рис. 1.

Исследуемое контактное устройство и принципиальная электронная схема. 1 - труба, 2 - стабилизатор напряжения, 3 - генератор Г-3-33, 4 - усилитель, 5 - выпрямитель-демодулятор, 6 - шлейфовый осциллограф Н-700, 7 - коллектор подачи индикатора.

входа. Эта серия и последующие полностью рандомизированные эксперименты осуществлялись по полному факторному плану 8×5 .

По полученным зависимостям $C = \varphi(\tau)$ находили кривые вымывания $C/C_0 = I(\tau)$, а затем рассчитывали функции распределения времени пребывания $F(\tau) = 1 - I(\tau)$ и функцию плотности распределения

до 27,5 м/сек, считая на полное сечение трубы. Такой диапазон обуславливался равномерным смачиванием периметра трубы, а также отсутствием уноса, пульсаций и зависания жидкости. Для получения корректных экспериментальных данных, воздух предварительно контактировал с водой на ситчатой тарелке диаметром 300 мм, насыщаясь и охлаждаясь до температуры воды, поступающей в элемент (разница в температура не превышала $0,5^\circ\text{C}$). Кривые отягаче получали в различных сечениях по высоте трубы на расстоянии 40, 120 и 240 мм от

$$f(\tau) = \frac{dF(\tau)}{d\tau} \quad (1)$$

Известными методами определяли статистические характеристики распределения, ограничиваясь такими конечными значениями τ_k , для которых было бы справедливо соотношение

$$\sum_{i=1}^n f(\tau_i) \Delta\tau = 1,000 - \Psi \quad (2)$$

при $\Psi \leq 0,005$.

Среднее время пребывания жидкости определялось как математическое ожидание функции распределения времени пребывания для каждого из трех участков:

$$\bar{\tau} = \nu_i = \sum_{i=1}^n \tau_i f(\tau_i) \Delta\tau \quad (3)$$

Изменение среднего времени пребывания от нагрузки по жидкости имеет экстремальный характер с минимумом в области средних L . Для тонких пленок (малые L) большее среднее время пребывания обусловлено влиянием стенки трубы, при больших L пленка становится толще, и сказывается замедляющее влияние сил тяжести.

Важной для практики геометрической характеристикой, позволяющей, в частности, определить параметры сепарационного устройства, является средняя толщина пленки, которая была определена для отдельных участков труб:

$$\bar{\delta}_{AB} = q \frac{\bar{\tau}_B - \bar{\tau}_A}{Z_{AB}}, \quad \bar{\delta}_{BC} = q \frac{\bar{\tau}_C - \bar{\tau}_B}{Z_{BC}} \quad (4,5)$$

Полученные значения $\bar{\delta}$ сравнивали с расчетными по эмпирическому уравнению (Собин В.М., Автореферат канд дисс., Минск, 1972), среднее отклонение при этом составляло 16 %.

Проанализирован профиль волн на поверхности пленки, записанный при большом усилении выходного сигнала и высокой скорости протяжки фотобумаги. На начальном участке поверхность пленки покрыта волнами сравнительно небольшой амплитуды и высокой частоты

(более 500 гц). На это колебание наложено другое с частотой 20 – 50 гц, но с меньшей амплитудой. В средней части трубы амплитуда и частота мелких волн уменьшаются, а амплитуда наложенных низкочастотных колебаний (20 – 50 гц) уже в 2 – 3 раза превосходит амплитуду волн высокочастотного спектра. В третьем, верхнем сечении, волны высокой частоты появляются реже, а амплитуда их становится еще меньше. Низкочастотные волны имеют большую амплитуду, в 3 – 7 раз превосходящую амплитуду волн высокой частоты.

С увеличением скорости газа амплитуда низкочастотных волн значительно уменьшается, а частота несколько увеличивается, что, по видимому, обусловлено стабилизирующим действием возрастающих радиальных сил. Увеличение нагрузки по жидкости приводит к обратному результату, и при максимальных орошениях волновая картина принимает вид крупных пульсаций, а мелкие волны почти исчезают. Одновременно наблюдается заметное спрямление потока, приближение характера течения к осевому и начинается унос жидкости. В целом волнообразование носит нерегулярный характер и имеет статистический смысл и, в конечном счете, обуславливает величину межфазной поверхности.

Для оценки характера поперечной неравномерности для всех проведенных опытов были рассчитаны значения функции интенсивности

$$\lambda(\tau) = - \frac{d}{d(\tau)} \ln[I(\tau)], \quad (6)$$

показавшие, что некоторая часть жидкости в пленке движется значительно медленнее по сравнению с основной массой. При этом в начале кривых наблюдается небольшой максимум, более всего характерный для небольшого по объему поршневого слоя, вслед за которым значение функций интенсивности становится почти постоянным.

О величине продолжительного перемешивания частиц жидкости в потоке можно судить по значению дисперсии времени пребывания – второму

центральному моменту распределения. Рассчитанные значения дисперсии изменяются от 0,4 до 0,9 и позволяют отвергнуть предположение как о полном вытеснении, так и о полном перемешивании жидкости. Большие значения дисперсии вызваны значительной поперечной неравномерностью, что и подтвердилось функциями интенсивности.

Гидродинамическая модель пленочного течения и определение её параметров

Для описания гидродинамической обстановки в элементе нами предложена комбинированная модель, учитывающая продольное перемешивание и поперечную неравномерность в распределении потока жидкости. Схема распределения потоков по модели представлена на рис. 2.

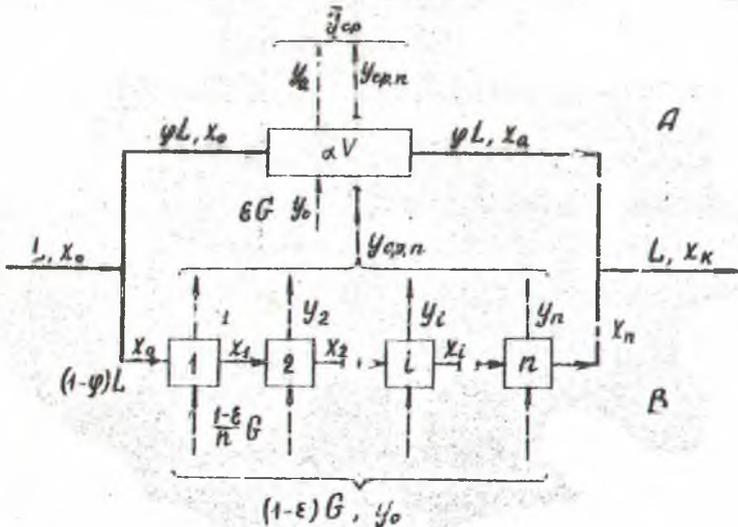


Рис. 2

Схема распределения потоков газа и жидкости в соответствии с предложенной моделью

Модель предполагает наличие в пленке двух параллельных зон, различающихся характером перемешивания: зоны поршневого течения А с долей потока жидкости через неё φ и зоны В, состоящей из n ячеек полного перемешивания, с долей потока через неё $(1-\varphi)$. Зона А занимает долю α от общего объема системы, V .

Данная модель выбрана на основании анализа функций распределения и функций интенсивности, а также представлений о характере волнового пленочного течения.

Среднее время пребывания жидкости в системе и в зонах А и В, соответственно:

$$\bar{t} = \frac{V}{L}, \quad \bar{t}_A = \frac{\alpha}{\varphi} \bar{t}, \quad \bar{t}_B = \frac{1-\alpha}{1-\varphi} \bar{t} \quad (7)$$

Передаточная функция системы имеет вид

$$W(p) = \varphi \exp(-p \frac{\alpha}{\varphi} \bar{t}) + (1-\varphi) \left(\frac{1-\alpha}{1-\varphi} \cdot \frac{1}{n} p \bar{t} + 1 \right)^{-n} \quad (8)$$

Оригинал уравнения (8) дает функцию плотности распределения времени пребывания

$$f(\theta) = (1-\varphi) \frac{n^n}{\Gamma(n)} \left(\frac{1-\varphi}{1-\alpha} \right)^{n-1} \theta^{n-1} \exp\left(-n \frac{1-\varphi}{1-\alpha} \theta\right) + \varphi \cdot \delta(\theta) \quad (9)$$

Интегральная функция распределения,

$$F(\theta) = (1-\varphi) \frac{n^n}{\Gamma(n)} \int_0^\theta \left(\frac{1-\varphi}{1-\alpha} \right)^{n-1} \theta^{n-1} \exp\left(-n \frac{1-\varphi}{1-\alpha} \theta\right) d\theta + \varphi \cdot \Delta, \quad (10)$$

где $\Delta = 0$ при $\theta \leq \alpha/\varphi$, $\Delta = 1$ при $\theta > \alpha/\varphi$.

Параметры модели определялись из моментов распределения. Выражения для моментов находились из передаточной функции по методу Ван-дер-Лана:

$$\bar{v}_{k+1} = \alpha \left(\frac{\alpha}{\varphi} \right)^k + (1-\alpha) \left(\frac{1-\alpha}{1-\varphi} \right)^k \prod_{j=1}^k \left(1 + \frac{j}{n} \right), \quad (11)$$

где $k = 1, 2, 3$;

\bar{v} - безразмерные начальные моменты.

Подставляя в левые части (11) значения моментов, рассчитанные по экспериментальным функциям распределения, получаем систему с тре-

мя неизвестными, реализованную численно методом Ньютона. (Все вычислительные операции, связанные с обработкой информации, проводились на ЭВМ "Минск-22").

Для исследованного диапазона работы элемента получены следующие значения: α — от 0,03 до 0,23; ψ — от 0,016 до 0,036. Параметры α и ψ имеют вполне определенный физический смысл; в частности, α характеризует относительную толщину поршневой зоны, δ_A , которая убывает с уменьшением нагрузки по жидкости и с увеличением скорости газа, подобно толщине непрерывной пленки δ_{\min} (см. ссылку на стр. 7). Для подавляющего большинства опытов $\delta_A < \delta_{\min}$, что позволяет определить положение зоны А внутри непрерывной пленки. Параметр ψ , характеризующий долю потока через зону А, во всех опытах имеет малые значения, что согласуется с представлением о том, что основная масса жидкости проходит в волновом слое. Полученные значения α , ψ и τ , а также среднего времени пребывания $\bar{\tau}$ были аппроксимированы в виде полиномов третьей степени по каждому из аргументов L , G и H , обуславливающих нагрузку по жидкости и газу и высоту трубы. Аппроксимация проводилась по многофакторной ранговой модели с выбором существенных факторов по критерию Фишера. Коэффициенты полиномов приведены в таб. I.

Проверка применимости модели проводилась сравнением функций интенсивности, рассчитанных по модели, и построенных по экспериментальным данным. Результаты сравнения для 120 опытов свидетельствуют о работоспособности предложенной модели.

В начале второй главы кратко рассматриваются литературные данные по эффективности контакта фаз при пленочном течении жидкости — теоретические решения и результаты экспериментальных исследований в кольцевых потоках. Подробно описываются методы описания эффективности контакта фаз, в частности, в условиях неавтоматности

течений.

Математическое описание эффективности контакта в закрученном прямотоке с учетом сложной гидродинамической структуры пленочного течения

Разработанная выше комбинированная гидродинамическая модель пленочного течения положена в основу описания эффективности контакта фаз. Газ поступает в зону контакта полностью перемешанным и распределяется по зонам А и В следующим образом: доля его потока $(I - E)$ равномерно распределяется в зоне В, так что на каждую гипотетическую ячейку полного перемешивания приходится $(I - E)G/n$; доля E поступает в зону А.

В соответствии с моделью получено выражение для эффективности по Мерфи в газовой фазе

$$E_{mg} = \frac{L}{mG} \left[\frac{1 - \psi \exp(-\lambda_B E_{VA}) - (1 - \psi)(\lambda_B E_{VA} + 1)^{-n}}{\psi \exp(-\lambda_A E_{VA}) + (1 - \psi)(\lambda_B E_{VA} + 1)^{-n}} \right] \quad (12)$$

и в жидкой фазе

$$E_{ml} = \frac{1 - \psi \exp(-\lambda_B E_{VA}) - (1 - \psi)(\lambda_B E_{VA} + 1)^{-n}}{1 - \frac{L}{mG} [1 - \psi \exp(-\lambda_A E_{VA}) - (1 - \psi)(\lambda_B E_{VA} + 1)^{-n}]} \quad (13)$$

Разработанная модель может отображать разнообразие варианты гидродинамической обстановки, в частности:

- 1) параллельно соединенные ячеечную и поршневую зоны, $\psi \neq 0, E \neq 0$;
- 2) параллельно соединенные зону полного вытеснения и полного перемешивания, $\psi \neq 0, E \neq 0, n = 1$;
- 3) чисто секционную зону, $\psi = E = 0$;
- 4) поток идеального вытеснения, $\psi = E = 1$;
- 5) поток полного перемешивания жидкости, $\psi = E = 0, n = 1$;
- 6) две параллельные поршневые зоны, $\psi \neq 0, E \neq 0, n \rightarrow \infty$.

Обе зоны в свою очередь, могут быть различных объемов, что обуславливает различное время контакта. Кроме того, модель может

отрицать просок жидкости без контакта с газом. Из уравнений (12) и (13) могут быть получены выражения для любого упрощенного случая.

Для подтверждения адекватности принятой гидродинамической модели реальному процессу проводили сравнение значений эффективности, рассчитанных по модели и экспериментально найденных при десорбции углекислого газа из водного раствора воздухом. Отбор проб производился в семи точках по высоте трубы через 10 мм, считая от места ввода жидкости, при помощи специальной проточной системы пробоотборников, исключающей десорбцию в пробоотборном тракте. Сравнение экспериментальных (таблица 2) и расчетных значений эффективности дало среднее отклонение 10,6 %, что является подтверждением необходимого условия адекватности предложенной модели реальному процессу. Достаточное условие адекватности было выявлено проверкой различных простых моделей (в том числе секционной, с общей дисперсией времени пребывания в качестве параметра), давших большее отклонение, чем принятая комбинированная модель.

Эффективность контакта фаз при пленочном течении по фиксированной поверхности существенным образом зависит от плотности орошения, с увеличением которой быстро уменьшается. При малых и средних плотностях орошения эффективность достаточно велика, и в этих случаях длина контактной трубы может быть разумно ограничена. Оптимальной длиной контактного элемента является длина, равная 4 - 5 диаметрам трубы.

В третьей главе рассмотрен ряд вопросов, связанных с экспериментальным исследованием и математическим описанием работы элементной ступени контакта. Приводятся результаты экспериментального исследования эффективности элементной тарелки и даются рекомендации по усовершенствованию её конструкции.

Исследование работы элементной прямоточной ступени контакта

В отличие от единичных контактных элементов под ступенью здесь понимается такое устройство, которое соответствует по своим функциям барботажной тарелке и включает в себя полотно, слив-

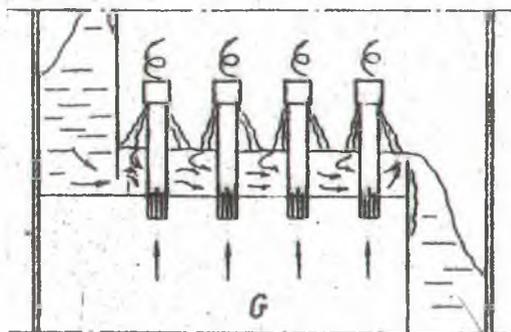


Рис. 3.

Элементарная ступень контакта.

наиболее приемлемым является щелевой тангенциальный закручиватель. Для больших диаметров элементов целесообразнее лопастной закручиватель.

При исследовании работы прямоточной ступени был выбран метод математического моделирования, включающий предварительное исследование гидродинамики, с помощью индикатора, составление гидродинамической модели ступени, получение и проверку уравнений для эффективности.

Влияние неоднородной структуры истоков и продольного перемешивания фаз на эффективность контакта наиболее полно учитывается с помощью комбинированных гидродинамических моделей. Составляя модель структуры потока, как комбинацию из ряда параллельных и по-

ливых устройства и элементы, состоящие из закручивателя для газовой фазы, узла подвода жидкости, зоны контакта и узла сепарации (рис.3).

При малых диаметрах, с точки зрения простоты изготовления и энергетических потерь, при условии достижения равной степени крутки

следовательных зон с различным характером и степенью перемешивания в каждой. практически возможно отразить любую гидродинамическую обстановку на ступени. Расчетное выражение для эффективности контакта обычно получают при последовательном определении концентраций потоков от зоны к зоне с учетом материальных балансов смешения потоков. Этот метод весьма трудоемок и иногда невыполним из-за сложности преобразования уравнений.

Этап получения расчетных выражений значительно упрощается при использовании модели функции распределения (МФР), для этого необходимо знать, по крайней мере, изображение по Лапласу функции распределения времени пребывания. При использовании комбинированных моделей изображение легко получается, исходя из предположения, что система представляет собой совокупность элементарных звеньев (зон) с известным переходным процессом в каждом, т.е. как передаточная функция системы, и параметры, характеризующие отдельные зоны, естественно включаются в зависимость.

Вопрос о применимости МФР при использовании комбинированных моделей решался нами непосредственно получением расчетных выражений эффективности по двум упомянутым методам. Были рассмотрены несколько комбинированных моделей, включая и рассмотренную выше для описания работы элемента. Результаты проведенных преобразований показали, что оба способа дают одинаковые результаты при условии, что в передаточные функции отдельных зон подставляются параметры T , λ и E_v для соответствующих зон. Однако, метод с определением концентраций несколько удобнее, так как позволяет оперировать непосредственно с эффективностями отдельных зон, не задаваясь заранее характером движения потоков в этих зонах, т.е. оставляет возможность варьирования уже при полученном выражении для эффективности всей ступени.

В данной работе решалась задача математического описания эффективности элементной ступени на основании гидродинамической модели с проверкой её адекватности реальному процессу без допущений о полном перемешивании жидкости как по всей ступени, так и в пределах отдельных конструктивных секций. Поскольку все элементы выполняются одинаковыми, то справедливо предположить, что газ распределяется равномерно по элементам и перед входом полностью перемешивается за счет значительной его турбулизации при закрутке. При разработке модели принято обычное допущение о линейности равновесной зависимости в пределах изменения концентраций на ступени.

Контакт фаз происходит, в основном, внутри элементов, поэтому вполне вероятно, что на ступени могут возникнуть байпасирующие потоки по всей длине или мимо отдельных элементов. Часть жидкости, контактировавшей с газом и возвратившейся после сепарации в межэлементное пространство на тарелке, может снова попасть в тот же элемент, из которого она вышла, т.е. осуществляется циркуляция жидкости через элементы. С учетом сказанного, предложена комбинированная модель, распределение потоков в соответствии с которой показано на рис. 4. При выводе расчетного выражения для описания эффективности использован метод МФР. Полученное уравнение имеет вид:

$$E_{ml} = \frac{1-a}{1-\frac{a}{\lambda}(1-a)} \quad (14)$$

где

$$a = \beta + (1-\beta) \left[\frac{k}{1-\beta} + \frac{(1-\beta-k)^2 \bar{C}_L(\lambda_i E_{vi})}{(1-\beta)[1-\beta-k+\varphi-\psi \bar{C}_L(\lambda_i E_{vi})]} \right]^N$$

$$\lambda = \frac{mG}{L}$$

$$\lambda_i = \frac{mG}{NL(1-\beta-k+\varphi)}$$

$\bar{C}_L(\lambda_i E_{vi})$ - изображение по Лапласу функции распределения времени пребы-

вания жидкости в отдельном элементе, при $P = \frac{\Delta i E_{vi}}{T_i}$

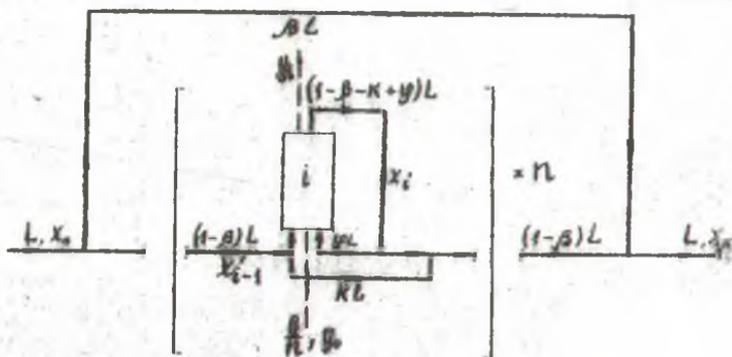


Рис. 4.

Схема распределения потоков в соответствии с моделью тарелки.

Для инженерных расчетов гораздо удобнее пользоваться не локальной эффективностью, а эффективностью отдельных элементов, ибо эта величина проще поддается измерению и расчету. Исходя из связи её с локальной эффективностью, в (14) введена эффективность отдельного элемента по жидкой фазе, полученное выражение имеет вид:

$$E_{ml} = \frac{1-\beta}{1-\frac{\beta}{\lambda}(1-\beta)} \quad (15)$$

где

$$\beta = \beta + (1-\beta) \left[\frac{K\varphi E_x \lambda + (1-\beta)(1-\beta-k)[E_x N(1-\beta-k+\varphi)+\lambda] - (1-\beta-k)^2 E_x \lambda}{(1-\beta)(\varphi E_x \lambda + (1-\beta-k)[E_x N(1-\beta-k+\varphi)+\lambda])} \right]^{1/n}$$

Зависимость (15) учитывает байпас жидкости от начала к концу ступени (β), проскок жидкости мимо отдельных элементов (K) и её циркуляцию через зоны контакта в элементах (φ).

Экспериментальные исследования эффективности контакта проводили при десорбции углекислого газа на ступени с четырьмя последовательно расположенными элементами диаметром 20 мм.

В указанном выше диапазоне изменения режимных параметров были поставлены два полных факторных эксперимента 6×5 и 5×5 (в дополнительной серии был изменен узел подвода жидкости). В каждом опыте измеряли расход жидкой фазы через элементы и концентрации жидкости на входе и выходе ступени и элементов.

Для оценки гидродинамической обстановки на ступени в жидкой фазе нами проведен эксперимент по вымыванию электролита с получением кривых распределения времени пребывания для всех исследованных режимов. С этой целью применили специально изготовленный усилитель для записи выходного сигнала непосредственно на потенциометр. Подача индикатора осуществлялась возле приемной планки, электроды-датчики смонтированы непосредственно на сливной планке, у её верхнего края. Расчет дисперсии времени пребывания показал, что на ступени не наблюдается ни полное вытеснение, ни полное перемешивание жидкости. Кроме того, характер кривых свидетельствует об отсутствии байпасирующих потоков от начала к концу ступени. Последнее объясняется тем, что тарелка представляла собой узкий прямоугольный лоток (с размерами 70×300 мм), в котором возможность полного байпасирования затруднена. Однако, для круглых тарелок наличие байпаса представляется вполне вероятным.

Расход жидкости через элемент во всех опытах был гораздо меньше общей нагрузки по жидкости и составлял $(0,173 - 0,570)$. Следовательно, часть жидкости проскакивает, по крайней мере, мимо некоторых элементов. Для определения параметров φ и K использовали результаты замеров концентраций по тарелке. Во всех исследованных режимах значения φ не превышали $0,05$, (в среднем $0,007$), т.е. доля циркулирующей жидкости была незначительной.

Подставляя найденные значения φ и K в уравнение (15) при $\beta = 0$, рассчитывали значения эффективности по модели. Сравнение

их с замеренными в опытах дало среднее отклонение 14,3 и 19,9 % для основной и дополнительной серий, соответственно. Поскольку значения Ψ очень малы, то возможно определение параметра K из соотношения

$$K = 1 - \frac{\xi_0}{\xi} \quad (16)$$

при этом ошибка не превышала 8 % по сравнению с определением K по результатам замеров концентраций. Соответственно, можно упростить расчетное уравнение (15), считая $\varphi = 0$, $\Psi = 0$. Для этого случая

$$E_{ml} = \frac{1 - \left[1 - \frac{(1-K)E_x \lambda}{NE_x(1-K) + \lambda} \right]^N}{1 - \frac{1}{\lambda} \left\{ 1 - \left[1 - \frac{(1-K)E_x \lambda}{NE_x(1-K) + \lambda} \right]^N \right\}} \quad (17)$$

Сравнение расчетных по (17) и экспериментальных значений эффективности дало среднее отклонение 16,6 и 21 % для основной и дополнительной серий, соответственно. Очевидно, что учет Ψ мало повышает точность, а определение значения этого параметра связано с дополнительными замерами концентраций и усложняет расчеты. Поэтому применение для расчетов уравнения (17) более оправдано.

Предложенный и проверенный метод определения эффективности ступени отличается простотой, необходимой для инженерных расчетов, и полученные зависимости могут быть рекомендованы для расчета промышленных проектируемых элементных ступеней контакта.

Усовершенствование конструкции прямоточных элементных ступеней контакта

Существующие узлы подачи жидкости в элемент через кольцевую щель и 1 отверстия в стенке трубы имеют существенный недостаток, заключающийся в том, что в случае закрученного потока при увеличении скорости газа поступление жидкости в элемент уменьшается

и затем прекращается вовсе, так как внутри элемента вблизи стенки образуется зона высокого давления. В таких случаях прибегают к созданию высокого уровня жидкости на тарелке, однако, эта мера лишь отодвигает момент прекращения подачи жидкости в сторону больших скоростей газа, когда внутреннее давление уравнивается гидростатическое давление столба жидкости. Поддержание высокого слоя жидкости требует увеличения длины элементов, что, в свою очередь, ведет к увеличению внутреннего давления.

Целесообразным является такое решение узла подачи жидкости, при котором рост скорости газа вызывал бы увеличение подачи жидкости, т. е. подача её в зону пониженного давления. В связи с этим нами предложена принципиально новая конструкция закручивающего устройства и узла подачи жидкости, предназначенная для применения в трубах средних и больших диаметров (рис. 5). Жидкость поступает в



Рис. 5.
Контактное устройство.

центральную часть элемента, образуя дополнительную зону контакта с сильным диспергированием, что позволяет увеличить эффективность контакта. Затем, вследствие центробежных сил, жидкость попадает на стенки элемента и дальнейший контакт происходит в кольцевом закрученном потоке. Узел подачи выполнен в виде наклонных полых лопастей с открытыми внешними торцами и верхней частью, через которые жидкость поступает внутрь элемента. Наклон лопастей обеспечивает закрутку газового потока. По данной конструкции получено положительное решение на авторскую заявку.

Другое разработанное и защищенное авторским свидетельством решение касается конструктивного оформления ступени в целом. Как показало исследование, байпас и проскок отрицательно сказываются на эффективности контакта. Для устранения этих явлений предложено секционирование тарелки с помощью специальных воротников, надеваемых на стальные элементы, ряды элементов или на все элементы. Такое секционирование устраняет байпас и проскоки жидкости, снижающие эффективность контакта. Кроме того, возможно полностью устранить не всегда желаемую циркуляцию жидкости через элементы.

В В О Д Ы

1. Результаты исследования гидродинамики пленочного течения в двухфазном закрученном прямотоке показали, что движение пленки жидкости не соответствует режиму полного вытеснения или полного перемешивания, а осложнено продольным перемешиванием и поперечной неравномерностью в распределении потока.

2. По результатам исследования гидродинамики предложена комбинированная модель для описания эффективности элемента и показана её адекватность реальному процессу.

3. Анализ известных методов получения расчетных выражений для эффективности контакта позволил уточнить условия применения модели функции распределения при описании работы ступеней контакта с помощью комбинированных гидродинамических моделей.

4. Толщина пленки, установленная с помощью индикаторной методики в зависимости от режимных параметров, позволяет рассчитать конструктивные размеры сепарационных устройств.

5. На основании проведенного исследования гидродинамики и теплообмена в закрученном прямотоке рекомендована оптимальная длина контактного элемента в пределах 4-5 диаметров трубы.

6. Исследование работы элементной ступени контакта дало возможность предложить математическое описание эффективности ступени, учитывающее сложную гидродинамическую обстановку – байпас, проскоки и циркуляцию жидкости через элементы. Расчетное выражение хорошо описывает экспериментальные данные по эффективности и удобно для применения в инженерной практике.

7. Для практической реализации оптимальных условий работ элементных контактных ступеней с взаимодействием фаз в закрученном потоке предложена усовершенствованная конструкция элементов с совмещенным узлом подъема жидкой и газовой фаз и конструкция секционированной элементной ступени, позволяющая повысить эффективность контакта. Разработанные конструкции защищены авторскими свидетельствами.

Обозначения

- C – текущая концентрация, г/л;
- C_0 – начальная концентрация, г/л;
- T – время размерное, сек;
- Q – плотность орошения, м³/м.час;
- Q_0 – расход жидкости через элемент на ступени контакта, л/час;
- T_0 – постоянная времени, сек;
- E – локальная эффективность;
- N – число конструктивных секций (рядов элементов по ходу жидкости);
- Z – расстояние вдоль оси трубы, м;
- θ – время безразмерное.

Таблица I

Коэффициенты аппроксимирующих полиномов для α , ψ , $\frac{1}{h}$ и τ .

Аргумент	$\alpha(\bar{\Delta} = 8,99 \%)$	$\psi(\bar{\Delta} = 2,5 \%)$	$\frac{1}{h}(\bar{\Delta} = 4,65 \%)$	$\tau(\bar{\Delta} = 3,85 \%)$
L	$3,254 \cdot 10^2$	-	$9,764 \cdot 10^2$	$-5,927 \cdot 10^3$
G	3,498	$3,071 \cdot 10^{-1}$	-	-
H	$1,116 \cdot 10^{-1}$	$1,292 \cdot 10^{-2}$	-4,187	-
LG	-	$3,609 \cdot 10^3$	-	-
GH	-	-	-	$1,897 \cdot 10^1$
H ²	-	-0,164	-	-
L ³	$7,316 \cdot 10^{10}$	$-0,218 \cdot 10^8$	-	$6,288 \cdot 10^{-11}$
G ³	-	$-4,120 \cdot 10^2$	$3,307 \cdot 10^3$	-
LGH	$6,426 \cdot 10^5$	-	-	-
L ² G	$-5,321 \cdot 10^8$	-	-	-
L ² H	-	$1,100 \cdot 10^6$	-	-
LH ²	$-7,338 \cdot 10^4$	$8,609 \cdot 10^2$	-	-
GH ²	-	-	$5,461 \cdot 10^3$	-
G ² H	-	$7,967 \cdot 10^1$	-	-
A ₀	0,201	$-0,263 \cdot 10^{-1}$	0,964	0,791

Таблица 2

Экспериментальные значения эффективности элемента для участков разной длины (от 40 до 280 мм)

$\frac{L, G, M^2}{\Lambda, AC}$	76,8	89,2	100,0	109,3	117,5	
I	1	2	3	4	5	6
65,3	0,192	0,201	0,272	0,340	0,352	
	0,328	0,359	0,441	0,575	0,590	
	0,406	0,503	0,634	0,673	0,690	
	0,501	0,565	0,675	0,725	0,780	
	0,598	0,651	0,730	0,760	0,805	
	0,704	0,720	0,790	0,801	0,830	
	0,775	0,808	0,825	0,835	0,870	

Таблица 2 (продолжение)

I	2	3	4	5	6
92,5	0,171	0,199	0,205	0,282	0,291
	0,264	0,327	0,396	0,448	0,471
	0,361	0,461	0,469	0,580	0,597
	0,467	0,516	0,580	0,676	0,712
	0,531	0,582	0,630	0,702	0,740
	0,625	0,643	0,673	0,722	0,785
	0,701	0,720	0,730	0,768	0,830
143,7	0,147	0,150	0,142	0,208	0,297
	0,240	0,261	0,280	0,420	0,417
	0,328	0,392	0,410	0,485	0,530
	0,390	0,340	0,451	0,565	0,580
	0,442	0,479	0,530	0,611	0,635
	0,520	0,536	0,559	0,654	0,693
	0,592	0,627	0,613	0,672	0,734
199,5	0,127	0,125	0,114	0,159	0,147
	0,204	0,241	0,225	0,363	0,369
	0,284	0,316	0,305	0,370	0,391
	0,333	0,383	0,390	0,460	0,510
	0,372	0,414	0,450	0,512	0,550
	0,429	0,453	0,485	0,556	0,621
	0,506	0,512	0,557	0,612	0,653
257,0	0,102	0,115	0,092	0,127	0,104
	0,175	0,225	0,189	0,300	0,335
	0,261	0,278	0,253	0,350	0,335
	0,291	0,305	0,323	0,400	0,419
	0,321	0,356	0,438	0,439	0,475
	0,373	0,388	0,405	0,502	0,551
	0,416	0,421	0,462	0,527	0,519
316,0	0,096	0,095	0,112	0,114	0,091
	0,165	0,195	0,180	0,240	0,290
	0,253	0,251	0,240	0,295	0,330
	0,249	0,284	0,312	0,365	0,370
	0,275	0,345	0,349	0,455	0,497
	0,305	0,323	0,342	0,498	0,425
	0,323	0,371	0,430	0,470	0,534
375,0	0,081	0,090	0,106	0,091	0,077
	0,151	0,183	0,275	0,212	0,250
	0,325	0,240	0,238	0,260	0,300
	0,207	0,278	0,275	0,315	0,330
	0,227	0,283	0,310	0,359	0,390
	0,262	0,322	0,340	0,420	0,455
	0,272	0,347	0,354	0,441	0,493
440,0	0,072	0,082	0,129	0,087	0,072
	0,162	0,174	0,189	0,195	0,230
	0,201	0,235	0,240	0,248	0,280
	0,185	0,270	0,275	0,278	0,291
	0,197	0,287	0,290	0,324	0,347
	0,237	0,308	0,322	0,322	0,408
	0,253	0,322	0,372	0,417	0,442

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. В.Г.Кацашвили, Г.И.Зорина, А.И.Ершов. Исследование гидродинамических и массообменных характеристик двухфазного закрученного потока. В сб. "III Всесоюзная конференция по теории и практике ректификации", часть II, Северодонецк, 1973.

2. В.Г.Кацашвили, Г.И.Зорина, А.И.Ершов. Математическое описание эффективности прямоточной контактной ступени с учетом степени продольного переешивания жидкости. "Общая и прикладная химия", вып. 6, Минск, "Высшая школа", 1974.

3. В.Г.Кацашвили, Г.И.Зорина, А.И.Ершов, И.М.Плехов. Комитет по делам изобретений и открытий. Авторское свидетельство СССР № 401376 "Контактная тарелка". Бюллетень изобретений, №41, 1973.

4. Г.И.Зорина, В.Г.Кацашвили. Комитет по делам изобретений и открытий. Положительное решение на авторскую заявку № Г760906 от 25 декабря 1973 г. "Контактное устройство".

5. В.Г.Кацашвили, Г.И.Зорина, А.И.Ершов. Исследование эффективности элементной ступени контакта. "Общая и прикладная химия", вып. 7, Минск, "Высшая школа", 1974.

6. В.Г.Кацашвили, Г.И.Зорина, А.И.Ершов. Исследование структуры пленочного течения и эффективности контакта в восходящем двухфазном закрученном потоке. (Статья депонирована в ВИНТИ, депон. № I468-74).

Содержание основных разделов диссертации докладывалось и обсуждалось на III Всесоюзной конференции по теории и практике ректификации. (Северодонецк, 1973) и на отчетных и научно-технических конференциях Белорусского технологического института им. С.М.Кирова в 1972-1974 гг. (6 докладов).

АТ 1457. Подписано к печати 10.VII.74 г.
Объём I п.л. Заказ 358. Тираж 150 экз.

Отпечатано на ротапринте БТИ им. С.М.Кирова,
г. Минск, ул. Свердлова, 13.