

66
В67

БЕЛОРУССКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ ИМЕНИ С.М.КИРОВА

На правах рукописи

66.011.3

ВОЛКОВ Владимир Константинович

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДВИЖЕНИЯ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ФАЗ
В РОТОРНЫХ МАССООБМЕННЫХ АППАРАТАХ

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 1993

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

Научный руководитель доктор технических наук, профессор А. И. ЕРШОВ.
Научный консультант кандидат технических наук, доцент В. А. МАРКОВ.
Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор И. М. ПЛЕХОВ, кандидат технических наук, доцент В. П. ИСАКОВ.


Ведущее предприятие - Гродненский институт азотной промышленности.

Защита состоится "30" июля 1993 г. в 14 час. на заседании специализированного совета К 056.01.03 при БТИ им. С. М. Кирова (220630, Республика Беларусь, г. Минск, ул. Свердлова, 13а) в ауд. 240 (корп. 4).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке БТИ им. С. М. Кирова.

Автореферат разослан "27" мая 1993 г.

Ученый секретарь
специализированного совета,
к. т. н., доцент


Е. В. ПЕРМИНОВ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В химической технологии для проведения тепло- и массообменных процессов в газожидкостных системах широко используют колонные аппараты с тарельчатыми и насадочными устройствами. Задача повышения их производительности решается в настоящее время, как правило, путем увеличения габаритных размеров, поскольку скорость газа (пара) на полное сечение ограничивается явлением уноса или захлебывания. При современных масштабах перерабатываемых продуктов такой путь практически исчерпал себя, т.к. наряду с большими затратами металла на изготовление аппаратов создает трудности при их монтаже и транспортировке к месту назначения.

В этих условиях определяющее значение приобретает поиск рациональных способов интенсификации процессов и создание высокопроизводительных аппаратов, в том числе и роторных с подводом энергии извне.

Согласно имеющейся информации по результатам исследований взаимодействия фаз во вращающихся потоках достигаются высокие значения коэффициентов тепло- и массообмена, что позволяет уменьшить размеры аппаратов и сократить капитальные и эксплуатационные расходы. Однако из-за сложности механизма явлений переноса в роторных аппаратах основы расчета их еще не разработаны. Поэтому исследование гидродинамических и массообменных характеристик роторных аппаратов является актуальной задачей.

Данная диссертация выполнена в Белорусском технологическом институте им. С. М. Кирова в рамках работы, проводимой согласно плану Министерства образования Республики Беларусь (тема ГВ № 9-91).

Цель работы. Установление закономерностей движения и взаимодействия фаз в роторных аппаратах, разработка совершенных конструкций и методов расчета основных характеристик, выдача рекомендаций по их проектированию и применению.

Научная новизна работы. На основе исследования диспергирования жидкости при ее истечении из отверстий распределительного устройства в роторном аппарате получено уравнение, позволяющее рассчитывать средний размер капель в зависимости от режимных и конструктивных параметров аппарата. С использованием метода статистического анализа установлены функции

распределения количества, поверхности и объема капель, а также характеристики этих распределений. В свою очередь известное распределение капель по размерам позволило описать траектории их движения с помощью дифференциальных уравнений. Их решение, проведенное численным методом, дало возможность получить упрощенную зависимость для определения допустимой скорости газа. Предложена формула для вычисления поправочного коэффициента к теоретическим расчетам траектории движения капель.

Проведенные исследования аэрогидродинамических и массообменных характеристик позволили получить зависимости для определения брызгоуноса, гидравлического сопротивления, объемного коэффициента массоотдачи и эффективности массообмена, в зависимости от режимных и конструктивных параметров роторных аппаратов.

Практическая значимость. По результатам исследования созданы конструкции роторных аппаратов, отличающихся улучшенными технико-экономическими характеристиками. Разработанная методика расчета характеристик роторных аппаратов используется в БТИ им.С.М.Кирова при проектировании ректификационных установок для разделения спиртов. Выполнены расчеты и разработаны проекты дисперсионно-пленочных и насадочных роторных аппаратов.

Публикации. По основным результатам работы имеется девять публикаций, в том числе: одна статья, семь докладов, одно положительное решение по заявке на изобретение.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, списка литературы и приложений. Работа изложена на 154 страницах машинописного текста, иллюстрирована 63 рисунками, библиография включает 120 наименований публикаций отечественных и зарубежных авторов. Названия глав в диссертации и автореферате совпадают.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение. Обоснована актуальность диссертационной работы, дана краткая характеристика состояния проблемы, изложены основные результаты, которые выносятся на защиту.

1. Обзор конструкций роторных тепло-массообменных аппаратов и постановка задачи исследований

В данной главе предложена классификация роторных тепло-

массообменных аппаратов с учетом вида образуемой поверхности контакта фаз, направления их взаимного движения и конструктивных особенностей. Приведен краткий анализ особенностей работы этих аппаратов. Согласно анализу конструкций с различными типами контактных устройств и оценки их гидродинамических и массообменных характеристик следует, что весьма перспективными, с точки зрения создания промышленных образцов, являются аппараты с ротором, выполненным в виде набора консиальных отбортованных перфорированных цилиндров при перекрестном движении жидкости и газа, а также насадочным ротором с противотоком фаз. Показано, что без проведения комплексных исследований в настоящее время невозможна разработка основ расчета и проектирования нового массообменного оборудования.

В заключительной части главы сформулирована постановка задачи настоящей диссертационной работы.

2. Исследование дисперсного состава и траекторий движения капель в роторном аппарате под действием массовых сил

2.1. Исследование механизма диспергирования жидкой фазы в роторном аппарате

Из апробированных методов замера дисперсного состава капель в газожидкостных потоках для роторных аппаратов нами принят метод фотографирования, являющийся одним из наиболее доступных в настоящее время.

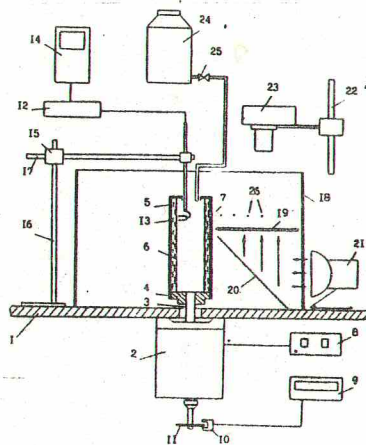


Рис.1. Схема экспериментальной установки:
 1 - горизонтальная плита;
 2 - электродвигатель; 3 - вал; 4 - ступица; 5 - цилиндр;
 6 - жидкостная пленка; 7 - отверстие; 8 - выпрямитель; 9 - датчик; 10 - фотоэлектрический датчик; 11 - диск датчика;
 12 - измеритель газосодержания; 13 - датчик; 14 - осциллограф; 15 - механизм перемещения датчика; 16 - штатив; 17 - микрометр; 18 - цилиндрическая обечайка; 19 - матовое стекло; 20 - зеркало; 21 - стробоскоп; 22 - фотоаппарат; 24 - емкость; 25 - вентиль; 26 - капли диспергированной жидкости.

Методика проведения эксперимента на специально созданной лабораторной установке (рис. 1) заключалась в следующем. В зависимости от толщины жидкостной пленки в распределительном цилиндре 5, датчик 13 устанавливался на соответствующем расстоянии от внутренней поверхности цилиндра. С внешней стороны на уровне отверстия 7 в стенке цилиндра крепился металлический шарик и производилась фокусировка фотоаппарата 23. С помощью выпрямителя 8 и тахометра 9 устанавливалась требуемая частота вращения, после чего открывался вентиль 25 и жидкость поступала внутрь цилиндра. Подача жидкости устанавливалась равной расходу через отверстие в цилиндре при заданной толщине жидкостной пленки. Включался стробоскоп 21 и путем изменения частоты вспышек достигался эффект остановки вращающегося цилиндра. Цилиндр "останавливался" таким образом, чтобы капли диспергированной жидкости находились в поле зрения через объектив фотоаппарата. Импульсный свет стробоскопа, проходя через прозрачную обечайку 18, отражался от наклонного зеркала 20 и проходил через матовое стекло 19. При этом на светлом фоне матового стекла были отчетливо видны темные капли диспергированной жидкости 26. Производилась фокусировка капель и одновременно масштабной сетки при том же фокусном расстоянии. По полученным фотографиям определялся истинный размер капель диспергированной жидкости с помощью масштабной сетки.

Частоту вращения цилиндра изменяли от 700 до 2300 мин⁻¹, диаметр отверстия от 0,0013 до 0,003 м.

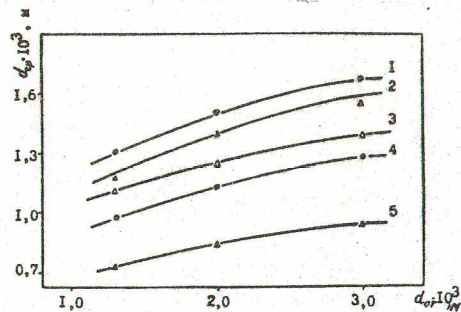


Рис. 2. Зависимость $d_{10} = f(d_0)$.
1 - $n = 1000$ мин⁻¹; 2 - 1300; 3 - 1600; 4 - 2000; 5 - 2300.

На рис. 2 изображена зависимость среднего диаметра капель жидкости от диаметра отверстия в стенке цилиндра для различных чисел оборотов. Как следует из рис. 2 диаметр капель диспергированной жидкости укрупняется с увеличением размера отверстия и становится меньше с повышением частоты вра-

щения цилиндра.

Согласно результатам обработки экспериментальных данных зависимость среднего диаметра капель от размера отверстия и числа оборотов (окружной скорости) хорошо аппроксимируется выражением:

$$d_{10} = 0,089 \left(\frac{\pi n d_0}{30} \right)^{-0,64} \times \left(\frac{d_{0r}}{D_0} \right)^{0,31} \quad (1)$$

где d_{10} - средний диаметр капель диспергированной жидкости, м; n - частота вращения диспергирующего цилиндра, мин⁻¹; d_{0r} - диаметр отверстия в цилиндре, м; D_0 - наружный диаметр диспергирующего цилиндра, м.

Погрешность аппроксимации составляет не более 7,4 %.

При статистической обработке опытных данных получены функции распределения и плотности приведенного размера

$$F_k(t) = \frac{4,5}{\gamma[(3,5+K)/4,5]} \int_0^t x^{2,5+K} \cdot \exp(-x^{4,5}) dx, \quad (2)$$

$$f_k(t) = \frac{4,5}{\gamma[(3,5+K)/4,5]} t^{2,5+K} \cdot \exp(-t^{4,5}), \quad (3)$$

которые описывают с достаточной степенью точности распределения количества ($K = 1$; $\gamma = 1$), поверхности ($K = 2$; $\gamma = 0,9126$) и объема ($K = 3$; $\gamma = 0,8857$), капель жидкости, распрысканной в роторном аппарате.

2.2. Совершенствование узла диспергирования жидкости в роторном массообменном аппарате

При проектировании роторных аппаратов с диспергированием жидкой фазы в приосевой зоне необходимо обеспечить равномерное истечение жидкости из всех отверстий по высоте диспергирующего цилиндра и отсутствие перелива через торцевую отбортовку. Исходя из данных условий, нами была предварительно выполнена оценка влияния режимных и конструктивных параметров роторного аппарата на распределение жидкостной пленки по высоте цилиндра и ее толщину. В результате чего получены зависимости для определения минимально допустимой частоты вращения диспергирующего цилиндра, необходимого числа отверстий перфорации при заданной нагрузке по жидкости, толщины жидкостной пленки.

Реальное распределение жидкостной пленки по высоте диспергирующего цилиндра исследовалось на установке, изображенной на рис. 1. Полный отбортованный перфорированный цилиндр со

где $K = \frac{3}{4} \frac{\rho_2}{\rho_{жс} \alpha}$;

ψ - коэффициент сопротивления.

Для случая, когда скорость газа по осям x, y можно принять равной 0, в выражения (5) следует подставлять значения абсолютной скорости частицы $|\vec{v}| = v_x^2 + v_y^2 + (w - v_x)^2$

где w - скорость газового потока относительно оси z ; v_x, v_y, v_z - проекции абсолютной скорости на соответствующие оси.

Решение уравнений (5) выполнено численным методом Рунге-Кутты-Фельберга для различных режимных и конструктивных параметров. При этом принимались следующие начальные условия: начальные скорости частиц относительно подвижных координатных осей n, s, ℓ равны 0, начальные координаты $n = s = \ell = 0$.

Чтобы оценить влияние указанного распределения скоростей $w(r)$ на траекторию движения расчеты проведены при $w(r) = 0$, $w(r) = \omega r$, а также при $w(r)$ согласно выражению

$$w(r) = \frac{1}{R_H^2 - R_B^2} \left(\frac{R_H^2 \cdot R_B^2}{r} \omega - r \omega, R^2 B \right) \quad (6)$$

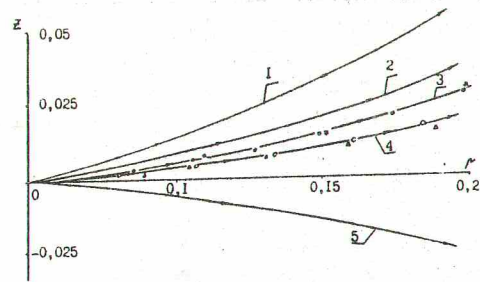


Рис. 4. Траектории движения частиц жидкости в плоскости $z-r$,
 1 - $w_z = 3$ м/с, $s = \dot{n} = 0$ м/с, $n = 960$ мин⁻¹, $w(r) = 0$, $\alpha = 0,3 \cdot 10^{-3}$ м;
 2 - $w_z = 5$ м/с, $s = \dot{n} = 0$ м/с, $n = 960$ мин⁻¹, $w(r) = 0$, $\alpha = 0,5 \cdot 10^{-3}$ м;
 3 - $w_z = 5$ м/с, $s = 2$ м/с, $\dot{n} = 0$, $n = 960$ мин⁻¹, $w(r) = 0$, $\alpha = 0,5 \cdot 10^{-3}$ м;
 * - $\rho = 1000$ кг/м³; * - $\rho = 1400$ кг/м³; 4 - $w_z = 5$ м/с, $s = \dot{n} = 0$ м/с, $n = 960$ мин⁻¹, $\alpha = 0,7 \cdot 10^{-3}$ м; о - $w(r) = \omega(r)$, $\Delta - w(r) = 0$;
 5 - $w_z = 0$, $s = \dot{n} = 0$ м/с, $n = 480$ мин⁻¹, $\alpha = 1,0 \cdot 10^{-3}$ м.

На рис. 4 показаны траектории движения частиц в плоскости, откуда следует, что плотность частиц не оказывает существенного влияния на их траекторию, также как и наличие неравномерности скоростей газового потока по радиусу. С увеличением составляющей скорости \dot{s} по оси s и частоты вращения высота подъема уменьшается. Повышение газовых нагрузок приве-

дит к увеличению высоты подъема частиц.

Решение уравнений (5) дало возможность связать скорость газового потока, при которой отклонение траекторий движущихся частиц между цилиндрами от горизонтальной плоскости не превышает $0,5 \cdot 10^{-2}$ м, с влияющими на движение факторами в виде зависимости:

$$w = 3,96 \cdot 10^5 \alpha^{2,1} (\omega R_B)^{0,5} L^{-1,1} \quad (7)$$

где L - расстояние между цилиндрами, м.

С целью проверки правильности теоретических расчетов нами экспериментально изучено влияние конструктивных параметров и режима работы аппарата на траекторию движения капель в роторном аппарате под действием массовых сил. О траектории движения приближенно можно судить, фиксируя отдельные ее точки. При проведении эксперимента известна была точка вылета капель и фиксировалось место их попадания на неподвижную стенку корпуса при известном расстоянии между точкой вылета и корпусом.

Согласно полученным результатам разница между расчетным и фактическим отклонениями от горизонтали оказалась существенной. В связи с чем потребовалось проведение дополнительной серии опытов, чтобы приблизить условия проведения эксперимента к принятым при расчетах допущениям, основным из которых является допущение о шарообразности частиц и которое не выполняется при диспергировании жидкости в роторном аппарате. С этой целью капли жидкости были заменены твердыми шарообразными частицами, плотность которых близка к плотности воды и обеспечивались условия выброса частиц под действием центробежных сил близкими к условиям истечения жидкости через отверстие в стенке вращающегося цилиндра посредством специального питателя. Конструкция питателя и сама методика подробно изложены в диссертации.

В результате проведенных исследований установлено, что отклонение опытных данных от расчетных незначительно и объясняется погрешностью эксперимента. Это подтверждает правильность проведенного теоретического расчета движения дисперсной фазы. Но при использовании уравнений (5) для расчета реальных аппаратов потребовалось введение поправочного коэффициента:

$$K = 1,85 - 0,88 w - 0,8 \cdot 10^{-3} n + 136,9 d \omega + 0,6 \cdot 10^{-3} w \cdot n + 27,9 w d \omega + 7,7 \cdot 10^{-2} n d \omega \quad (8)$$

Среднее относительное отклонение расчетных величин по (5) с учетом (8) и экспериментальных значений не превышает 17%.

3. Исследование брызгоуноса и гидравлического сопротивления в роторных аппаратах

Экспериментальные исследования проводились на установке, изображенной на рис.5. При этом изучались конструкции дисперсионного и насадочного роторов. Устройство первого из них было описано выше. Ротор насадочного типа (рис.6) выполнен в виде кольцевой вращающейся насадки, располагающейся между двумя непроницаемыми дисками и жестко закрепленной на валу. Ширина верхнего диска равнялась толщине насадочного слоя. Между валом и насадкой установлен полый отбортованный цилиндр, диаметр которого меньше внутреннего диаметра кольцевой насадки, то есть предусмотрено кольцевое свободное пространство для выхода газа. Между верхним кольцевым диском и переливным устройством установлено лабиринтное уплотнение. В качестве насадки использовалась гофрированная сетка из коррозионностойкого металла.

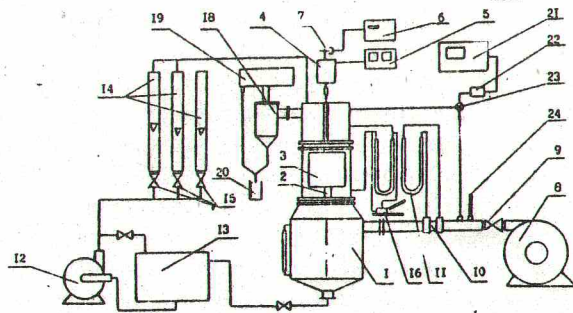


Рис.5. Схема экспериментальной установки. 1 - емкость; 2 - роторный аппарат; 3 - ротор; 4 - электродвигатель; 5 - выпрямитель; 6 - тахометр; 7 - датчик; 8 - газодувка; 9 - задвижка; 10 - диафрагма; 11 - дифманометр; 12 - насос; 13 - емкость; 14 - ротаметры; 15 - краны; 16 - микроманометр; 17 - дифманометр; 18, 19 - центробежный и объемный сепараторы; 20 - мерный стакан; 21 - гигрометр; 22 - датчик; 23 - трехходовой кран; 24 - термометр

Конструктивные параметры насадочного роторного аппарата были следующими. Диаметр аппарата 0,3 м, диаметр расположенного внутри диспергирующего цилиндра 0,05 м, внутренний диаметр вращающейся насадки 0,1 м, наружный диаметр 0,26 м. Высота насадочного слоя 0,15 м.

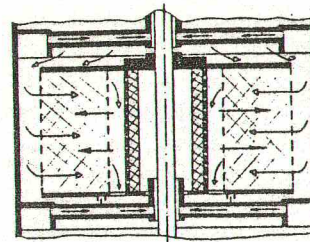


Рис.6. Схема роторного насадочного аппарата

брызгоуноса определялась по формуле

$$\rho = \frac{L_{un}}{L_{pod}} \cdot 100$$

где L_{un} - объем уносимой жидкости, $м^3/ч$; L_{pod} - объем поступающей в аппарат жидкости, $м^3/ч$.

На рис.7 изображены зависимости величины относительного брызгоуноса от скорости газа в дисперсионном аппарате для различных чисел оборотов, а на рис.8 - зависимости брызгоуноса от плотности орошения.

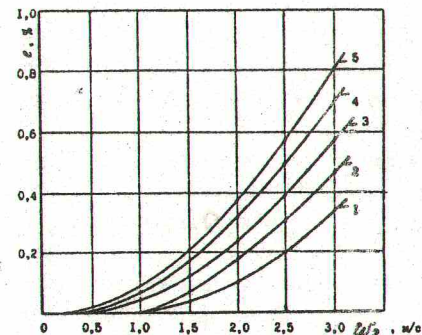


Рис.7. Зависимость величины относительного брызгоуноса от скорости газа в аппарате.

$\rho = 5,5\% \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$
1 - $n = 700 \text{ мин}^{-1}$; 2 - 1000;
3 - 1300; 4 - 1600; 5 - 1800.

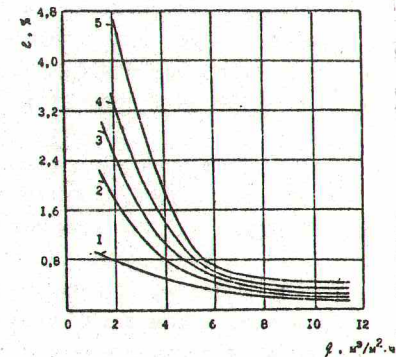


Рис.8. Зависимость величины относительного брызгоуноса от плотности орошения.

$w_2 = 3 \text{ м/с}$
1 - $n = 700 \text{ мин}^{-1}$; 2 - 1000;
3 - 1300; 4 - 1600; 5 - 1800.

Как следует из рис.7 величина брызгоуноса растет с увеличением скорости газа и числа оборотов ротора, что объясняется увеличением силы гидродинамического воздействия на капли со стороны газового потока и уменьшением размеров капель при диспергировании с повышением частоты вращения.

Согласно рис.8 при увеличении плотности орошения величина относительного брызгоуноса снижается. Это можно объяснить тем, что с увеличением плотности орошения увеличиваются толщины жидкостной пленки на внутренних поверхностях перфорированных цилиндров и стенке корпуса аппарата. Последнее приводит к снижению количества брызг, образующихся при ударе летящих с большой скоростью капель о поверхности пленок. Как показали расчеты, снижение брызгоуноса происходит до достижения жидкостной пленкой толщины ~ 3 мм. При дальнейшем увеличении ее толщины (плотности орошения) такого явления не наблюдается.

Результаты эксперимента обобщены в виде эмпирической зависимости, связывающей величину относительного брызгоуноса с указанными параметрами

$$e = 2,33 \cdot 10^{-5} \cdot W_2^{2,54} \cdot \varrho^{-1,48} \cdot n^{1,33} \quad (9)$$

Среднее относительное отклонение рассчитанных по (9) и опытных значений не превышает 15 %.

При проведении химико-технологических процессов в системах газ-жидкость возникает необходимость расчета допустимой скорости газа в аппарате, исходя из величины допустимого относительного брызгоуноса. В связи с чем нами для дисперсионно-пленочных аппаратов получена расчетная зависимость вида

$$W_2 = 164 \cdot e^{0,36} \cdot \varrho^{0,53} \cdot n^{-0,65} \quad (10)$$

В роторном насадочном аппарате наиболее "опасной" зоной для уноса жидкости является кольцевое пространство между диспергирующим цилиндром и внутренней поверхностью насадки. Скорость газа здесь максимальная, а капли жидкости еще не достигли насадки, где им сообщается дополнительное вращательное движение и тем самым увеличивается действующая на них центробежная сила, препятствующая уносу жидкости из аппарата газовым потоком.

Как показали исследования (рис.9), структура потоков жидкой и газообразной фаз в данном случае близка к характеру движения фаз в роторном дисперсионном аппарате. Следовательно, допустимую скорость в аппарате можно определить с помощью уравнений (5), (7) и учетом величины поправочного коэффициента, вычисленного по формуле (8). При этом в уравнения нужно подставлять величину средней скорости-потока газа в кольцевом пространстве между диспергирующим цилиндром и внутренней поверхностью кольцевой насадки.

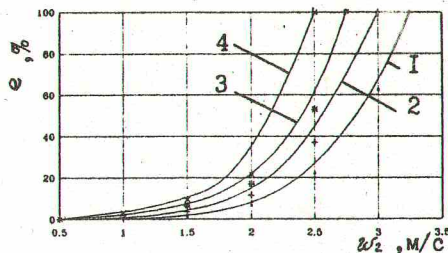


Рис.9. Зависимость величины относительного брызгоуноса от скорости газа (насадочный аппарат).

$$\varrho = 11,03 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч.}$$

1 - $n = 700$ мин⁻¹; 2 - 1000;
3 - 1300; 4 - 1600.

орошения $\varrho = 13,5 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч.}$ величина гидравлического сопротивления не превышает 40 Па.

Результаты исследований гидродинамики роторных насадочных аппаратов показали, что закономерности движения фаз в поле центробежных сил сильно отличаются от стационарных насадочных аппаратов.

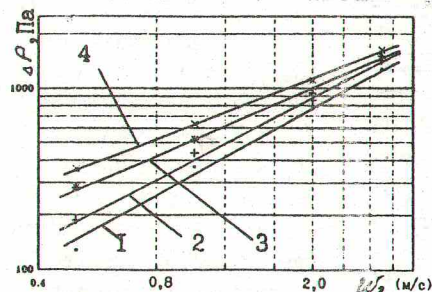


Рис.10. Зависимость $\Delta P_{гид} = f(W_2)$

$$\varrho = 0 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч.}$$

1 - $n = 700$ мин⁻¹; 2 - 1000;
3 - 1300; 4 - 1600.

При подаче орошения на насадку и дальнейшем его увеличении гидравлическое сопротивление вначале возрастает более резко, а затем стабилизируется и зависит от плотности орошения в значительно меньшей степени. Начальный участок определяет работу аппарата с момента подачи орошения на сухой контактный элемент до его полного смачивания.

Результаты исследований аппроксимированы следующими зависимостями:

Экспериментальными исследованиями установлено, что гидравлическое сопротивление роторного дисперсионного аппарата невелико, зависит в основном от скорости газа в аппарате и в меньшей степени от плотности орошения и числа оборотов ротора. Так, например, при скорости газа по сечению аппарата $W_2 = 3,5$ м/с и плотности

На рис.10 в логарифмических координатах изображена зависимость гидравлического сопротивления роторного аппарата от скорости газа при отсутствии орошения ("сухой" ротор), а рис.11 при орошении $\varrho = 7,68 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч.}$ При подаче орошения на насадку и дальнейшем его увеличении гидравлическое сопротивление вначале

- для "сухого" ротора

$$\Delta P_{\text{сух}} = 6,89 \cdot \omega_2^{1,09} \cdot n^{0,59} \quad (II)$$

- для орошаемого ротора

$$\Delta P_{\text{ор}} = 141,17 \cdot \omega_2^{1,1} \cdot \varrho^{0,025} \cdot n^{0,22} \quad (I2)$$

Разница рассчитанных по уравнениям (II), (I2) и определенных экспериментальных значений не превышает 7 %.

4. Исследование массообменных характеристик роторных аппаратов

Сравнительную оценку массообменных характеристик различных контактных устройств некоторые исследователи производят по величине коэффициентов массоотдачи в одной из фаз β_2 или $\beta_{жс}$, отнесенных к поверхности контакта. Однако, из-за отсутствия методов, позволяющих замерить концентрации на границе раздела фаз и точное определение поверхности контакта фаз весьма затруднительно, при проведении исследований пользуются условными величинами - коэффициентами массоотдачи отнесенными к единице рабочего объема β_V , или поперечному сечению β_S аппарата.

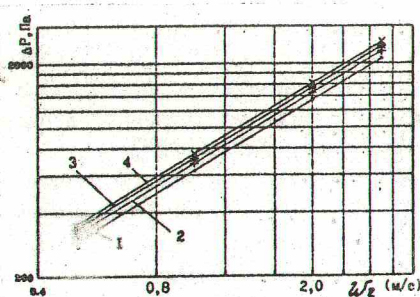


Рис. 11. Зависимость $\Delta P_{\text{ор}} = f(\omega_2)$

$\varrho = 7,68 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$.
1 - $n = 700 \text{ мин}^{-1}$; 2 - 1000;
3 - 1300; 4 - 1600.

системе массообменного процесса путем пересчета по формуле:

$$\beta = \beta_{ст} \left(\frac{D}{D_{ст}} \right)^2$$

где $\beta_{ст}$, $D_{ст}$ - коэффициенты массоотдачи и диффузии для стандартной системы; β , D - то же самое для конкретного процесса; n - показатель.

Значения n для случая определения коэффициентов массоотдачи в газовой фазе колеблются в пределах от 0,33 до

Для определения $\beta_{Vг}$ нами использована методика, основанная на адиабатическом испарении воды в воздушный поток. Она сейчас принята как стандартная для сравнительной оценки эффективности контактных устройств массообменных аппаратов, отличается низкой стоимостью реагентов и их экологичностью. При этом возможен переход к конкретной

0,5, что практически не сказывается на результатах расчетов.

Исследования по массообмену проводились на установке, изображенной на рис.5. Подвод воздуха и воды и регулирование их расходов осуществлялось также, как и при проведении гидродинамических испытаний. Относительная влажность воздуха измерялась гигрометром "Волна 1М", к датчику которого попеременно подавался воздух до поступления в аппарат и после аппарата. Температура фиксировалась термометром, установленным на линии подачи воздуха. По экспериментальным значениям φ_H , φ_K , t_{KH} рассчитывались величины влагосодержания d_H , d_K , d^* по формуле

$$d = 0,623 \cdot 10^{-3} \frac{\varphi \cdot P_H(t)}{P_{атм} - \varphi P_H(t)},$$

а также эффективность массопередачи

$$\eta = \frac{d_K - d_H}{d^* - d_H}$$

и величина объемного коэффициента массоотдачи в газовой фазе

$$\beta_{Vг} = \frac{G_2}{V_{ан}} \ln \frac{d^* - d_H}{d^* - d_K},$$

где G_2 - количество переданной массы, кг/с; $V_{ан}$ - объем аппарата, м^3 .

При исследовании роторного дисперсионного аппарата установлено, что объемный коэффициент массоотдачи растет с увеличением скорости газа и плотности орошения, т.к. при этом происходит турбулизация потоков взаимодействующих фаз и интенсификация массообменного процесса. Эффективность массообмена с увеличением скорости газа снижается за счет сокращения времени пребывания газа в аппарате. Вместе с тем, каждое последующее увеличение скорости газа на одинаковый промежуток приводит к меньшему снижению эффективности по сравнению с предыдущим. Это можно объяснить тем, что снижение эффективности за счет уменьшения времени пребывания газа в аппарате компенсируется за счет дополнительной турбулизации взаимодействующих потоков. Частота вращения является одним из важнейших параметров работы роторного аппарата, оказывающих влияние на дисперсный состав жидкой фазы. Увеличение числа оборотов ротора приводит, с одной стороны, к уменьшению размеров капель, образующихся в процессе диспергирования жидкости, а с другой к росту окружных скоростей вращения диспергирующих цилиндров и, следовательно, возрастанию скорости движения капель жидкости. Названные факторы способствуют интенсификации массообмена. Также следует отметить, что приращение числа оборотов

ротора при высоких скоростях газа в аппарате приводит к увеличению объемного коэффициента массоотдачи на большую величину, чем при низких.

Результаты исследований по массообмену в дисперсионном роторном аппарате аппроксимированы следующими зависимостями:

- эффективность массообмена

$$\eta = 5,47 \cdot \omega_2^{-0,14} \cdot q^{0,29} \cdot n^{0,3} \quad (I3)$$

- коэффициент массоотдачи

$$\beta_{V2} = 1,38 \cdot 10^{-4} \omega_2^{0,65} \cdot q^{0,18} \cdot n^{0,73} \quad (I4)$$

Разница между рассчитанными по уравнениям (I3), (I4) и экспериментальными значениями не превышает 10 %.

Исследование массообменных характеристик роторного насадочного аппарата показало, что с увеличением скорости газа и числа оборотов ротора объемный коэффициент массоотдачи также возрастает вследствие повышения относительной скорости движения и дополнительной турбулизации фаз. Эффективность массообмена с увеличением скорости газа вначале плавно снижается за счет уменьшения времени пребывания газа в аппарате, а затем происходит ее резкое падение вследствие интенсивного уноса жидкости из аппарата, особенно при повышенных числах оборотов. Следовательно, чтобы обеспечить повышенную пропускную способность по газу при хорошей эффективности массообмена, необходимо уменьшать числа оборотов ротора. Когда же требуется высокая эффективность массообмена при низкой пропускной способности по газу, следует эксплуатировать аппарат при максимально допустимых частотах вращения.

К росту объемного коэффициента массоотдачи приводит также увеличение плотности орошения. Причем вначале до $6 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$ приращение объемного коэффициента массоотдачи заметнее, чем при $q > 6 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$. Данный эффект можно объяснить тем, что при малых плотностях орошения жидкости внутри насадочного слоя недостаточно для полного смачивания поверхности насадки.

Результаты исследований по массообмену в насадочном аппарате аппроксимированы следующими эмпирическими уравнениями:

- эффективность массообмена

$$\eta = 1,99 \cdot \omega_2^{-0,11} \cdot q^{0,14} \cdot n^{0,45} \quad (I5)$$

- коэффициент массоотдачи

$$\beta_{V2} = 10^{-5} \cdot \omega_2^{0,71} \cdot q^{0,34} \cdot n^{1,14} \quad (I6)$$

Разница между рассчитанными по уравнениям (I5), (I6) и определенными экспериментально величинами не превышает 10 %.

В итоге сравнительными исследованиями установлено, что конструкция контактного элемента существенно влияет на массообменный процесс, происходящий в роторном аппарате.

На рис. I2 изображена зависимость объемного коэффициента

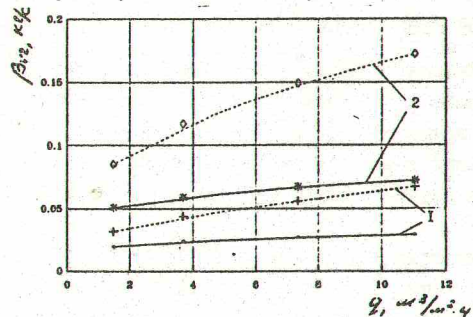


Рис. I2. Зависимость объемного коэффициента массоотдачи от плотности орошения.

— дисперсионный аппарат;
 ---- насадочный аппарат.
 $n = 1600 \text{ мин}^{-1}$, $l - \omega_2 = 0,5 \text{ м/с}$;
 $2 - \omega_2 = 2,0 \text{ м/с}$.

жидкостной пленки, приводящим к дополнительному обновлению поверхности контакта. В дисперсионном аппарате с повышением плотности орошения происходит увеличение числа капель, находящихся в объеме массообменной ступени, за счет чего также достигается интенсификация массообмена, но в меньшей степени по сравнению с насадочным. По тем же самым причинам увеличение числа оборотов ротора вызывает больший рост β_{V2} в насадочном аппарате.

Отличительные особенности явлений массопереноса в роторных аппаратах диктуют и несколько различные области их применения. Роторные дисперсионные массообменные аппараты целесообразно применять в процессах абсорбции, десорбции, хемосорбции с целью очистки газов от вредных примесей или извлечения ценных компонентов при ограниченном числе контактных ступеней. Малые габариты аппаратов и низкое гидравлическое сопротивление позволяют использовать их в локальных системах газоочистки, где извлекаемые компоненты имеют достаточно высокую концентрацию. Возможно использование этих аппаратов для очистки газов от пыли. Перспективность этих аппаратов определяется возможностью перерабатывать большие потоки газов

массоотдачи от плотности орошения для дисперсионного и насадочного аппаратов при различных числах оборотов ротора, согласно которой его значение в насадочном аппарате возрастает в большей степени, чем в дисперсионном. Это связано как с более равномерным смачиванием поверхности насадки, так и дополнительным срывом капель с поверхности

при переменных (в том числе очень малых) плотностях орошения.

Применение насадочных роторных массообменных аппаратов целесообразно в процессах абсорбции, десорбции и ректификации с большим числом ступеней контакта.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Развитие химической и смежных с ней отраслей промышленности неразрывно связано с применением совершенного оборудования, включая и роторные массообменные аппараты для проведения процессов абсорбции и ректификации, широкое внедрение которых сдерживается недостаточной изученностью их характеристик.

2. Посредством фотографирования проведено исследование процесса диспергирования жидкости при ее истечении из отверстий полого цилиндра в роторном аппарате. Установлено, что дисперсный состав капель зависит от диаметра отверстий перфорации и окружной скорости. Определены с использованием метода статистического анализа функции распределения количества, поверхности и объема капель и характеристики этих распределений. Получено уравнение для расчета среднего размера капель диспергируемой жидкости в зависимости от режимных и конструктивных параметров.

3. С помощью метода Лагранжа составлены и решены дифференциальные уравнения, описывающие траектории движения капель жидкости во вращающемся роторе. Экспериментальные исследования траектории движения частиц во вращающемся роторе под действием массовых сил показали, что из-за принятых при аналитических расчетах допущений истинная траектория может отличаться от расчетной. В связи с этим получена формула для вычисления поправочного коэффициента к теоретическим расчетам траектории движения капель.

4. На основе результатов исследования явления брызгоуноса в роторных дисперсионных и насадочных аппаратах предложена зависимость для нахождения предельной скорости потока газа при заданной величине допустимого уноса жидкой фазы.

5. Получены расчетные зависимости для определения гидравлического сопротивления роторных дисперсионных и насадочных аппаратов с учетом скорости потока газа, частоты вращения, плотности орошения.

6. Изучены массообменные характеристики и установлено,

что роторно-дисперсионные аппараты, уступая насадочным по эффективности массообмена, обладают большей пропускной способностью по газу.

7. На основе анализа результатов исследований созданы новые конструкции роторных аппаратов, отличающихся улучшенными характеристиками, одна из которых признана изобретением.

8. Составлены рекомендации по рациональному использованию роторно-дисперсионных и роторно-насадочных массообменных аппаратов в промышленном производстве.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Исследование процесса диспергирования жидкости в роторном аппарате / В.А.Марков, В.К.Волков, А.И.Ершов, А.М.Волк // Энергетика (Изв.высш.учебн.заведений). - 1991. - № 6. - С. 94-98.

2. Роторные дисперсионно-пленочные аппараты для мокрой очистки газа и процессов тепломассообмена / В.К.Волков, А.И.Ершов, В.А.Марков, А.Е.Рабко // Тез.докл.научно-технического семинара "Современные способы очистки промышленных вентиляционных выбросов". - Новополоцк: 1990. - С.31.

3. Волков В.К. Исследование дисперсного состава жидкой фазы в роторном тепломассообменном аппарате // Тез.докл.юбилейной научно-технической конференции по итогам научно-исследовательских работ. - Минск: 1990. - С.210.

4. Закономерности распределения и взаимодействия фаз в роторных дисперсионно-пленочных массообменных аппаратах / А.Е.Рабко, В.К.Волков, В.А.Марков, А.И.Ершов // Тез.докл. всесоюзного совещания "Повышение эффективности и надежности машин и аппаратов в основной химии". - Сумы: 1989. - С.13-14.

5. Роторно-дисперсионные аппараты для мокрой очистки газа / А.И.Ершов, В.А.Марков, В.К.Волков, А.Е.Рабко // Тез.докл. 3 Всесоюзной научной конференции "Гидромеханические процессы" разделения гетерогенных систем". - Тамбов: 1991. - С. 13.

6. Марков В.А., Волков В.К., Волк А.М. Экспериментальные и теоретические исследования процесса диспергирования жидкости в роторных ректификационных аппаратах // Тез.докл. 6 Всесоюзной конференции по теории и практике ректификации. - Северодонецк: 1991. - С. 176-178.

7. Марков В.А., Волков В.К. К расчету допустимых нагрузок по газовой фазе в роторном массообменном аппарате // Тез. докл. 6 Всесоюзной конференции по теории и практике ректификации. - Северодонецк: 1991. - С. 179-180.

8. Волков В.К., Марков В.А., Ершов А.И. Экспериментальные исследования брызгоуноса в роторных дисперсионно-пленочных аппаратах // Тез. докл. конференции "Очистка воздуха и обезвреживание отходящих газов". - Пенза: 1991.

9. Роторный теплообменный аппарат / А.Е.Рабко, А.И.Ершов, В.А.Марков, В.К.Волков // Заявка на изобретение № 4917104/26, положительное решение Госпатента СССР от 30.10.91.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДВИЖЕНИЯ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ФАЗ В РОТОРНЫХ МАССООБМЕННЫХ АППАРАТАХ

Волков Владимир Константинович

Подписано в печать 21.05.93. Формат 60x84¹/₁₆.

Печать офсетная. Усл.печ.л. 1,4. Усл.кр.-отт. 1,4. Уч.-изд.л.1,2.
Тираж 100 экз. Заказ 256. Бесплатно.

Белорусский ордена Трудового Красного Знамени технологический институт им.С.М.Кирова. 220630, Минск, Свердлова, 13а.

Отпечатано на ротاپринте Белорусского ордена Трудового Красного Знамени технологического института им.С.М.Кирова.

220630, Минск, Свердлова, 13