

В статті розглянуто методика проведення експериментальних досліджень ВРПМА, наведені результати вимірювань та описаний аналіз отриманих графічних залежностей та видані рекомендації по наступним дослідженням. Наведені основні массообмінні та гідродинамічні характеристики ВРПМА при різних режимах. Наведена методика аналітичного визначення гідравлічного опору, геометричних розмірів апарату, а також розмірів дисперсної фази, що забезпечить найбільшу питому ефективність використання об'єму обладнання

Ключові слова: вихор, апарат, массообмін, експеримент, протитечія, розрахунок, фаза, критерій, бризкоунесення

В статье рассмотрена методика проведения экспериментальных исследований ВРПМА, приведены результаты замеров и описан анализ полученных графических зависимостей и выданы рекомендации по дальнейшим исследованиям. Показаны основные массообменные и гидродинамические характеристики ВРПМА при различных режимах. Приведена методика аналитического расчета гидравлического сопротивления, геометрических размеров аппарата, а также размеров дисперсной фазы, которые обеспечат наибольшую удельную эффективность использования объема оборудования

Ключевые слова: вихрь, апарат, массообмен, эксперимент, противоток, расчет, фаза, критерий, бризкоунос

УДК 66.074.1:547.912

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МАССООБМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИХРЕВЫХ РАСПЫЛИВАЮЩИХ МАССООБМЕННЫХ АППАРАТОВ

Ал Хайят

Мохаммед Надим Касим

Соискатель

Кафедра процессов и аппаратов химических и нефтеперерабатывающих производств
Сумський державний університет
ул. Римского-Корсакова, 2,
г. Сумы, Украина, 40000
E-mail: fench@ukr.net

1. Введение

Определение массообменных характеристик работы вихревых распыливающих противоточных массообменных аппаратов [1–3], является актуальной задачей при разработке нового массообменного высокоэффективного оборудования. Данное оборудование используется для проведения процессов переработки стабильного углеводородного газового конденсата и нефти ректификацией в дизельное топливо и бензиновые фракции на установках по производству моторных масел; проведение других тепло- и массообменных процессов абсорбционной осушки природного и попутного нефтяного газа.

За счет действия высокоскоростного газового потока на струи жидкости достигается высокодисперсное распыление, капли по спиральным траекториям двигаются к периферии массообменной камеры противотоком к газовому потоку.

Впервые в реальной конструкции массообменного аппарата реализовано противоточное движение газового и жидкостного (капельного) потоков, что позволило достичь нескольких ступеней изменения концентрации в одной ступени распыла и осуществить замену колонного оборудования, которое состоит из 6–10 массообменных тарелок, одним аппаратом. При этом данный вид оборудования обладает низким ги-

дравлическим сопротивлением, до 2,4 кПа и высокой эффективностью, до 98–99 %.

Так как эффективность массообмена напрямую зависит от гидродинамических параметров движения сред в камере вихревого распыливающего противоточного массообменного аппарата (ВРПМА) – это обуславливает необходимость изучения в рамках данной статьи.

2. Анализ литературных данных

Характеристика работы массообменного оборудования описывается рядом гидродинамических и геометрических факторов, определение которых будет рассмотрено ниже.

Основная сложность расчета теоретическим путем коэффициентов массопередачи и других параметров, характеризующих эффективность работы ВРПМА, в настоящее время сопряжено с рядом непреодолимых трудностей. Поэтому коэффициенты массоотдачи определяются по данным экспериментальных исследований экспериментальным путем [4].

В вихревом распыливающем противоточном массообменном аппарате контакт паровой и жидкой фаз происходил в небольшом объеме, обусловленном размерами массообменной камеры. Для выявления преи-

муществ вихревого противоточного аппарата ВРПМА целесообразно применять критерии, которые характеризуют эффективность использования единицы объема массообменной камеры, в которой происходит противоточное движение фаз [5].

Одним из таких критериев, который учитывает рабочий объем распыливающего аппарата, является объемный коэффициент массопередачи [6]. Целесообразность определения данного критерия, например, показана в работе А. М. Плановского и О. С. Чехова [6, 7]; используется этот критерий также и в работах В. М. Олевського [8], Ю. А. Головачевского, Б. Н. Басаргина для характеристики массообменных аппаратов различной конструкции.

Другим очень важным критерием, который характеризует энергоемкость массообменного оборудования, является величина удельного гидравлического сопротивления, которое приходится на одну теоретическую ступень изменения концентрации или единицу переноса [8].

Использование этого критерия для оценки энергетических качеств различных конструкций контактных элементов, например, в работе Ю. К. Молоканова [9], придает большую наглядность при анализе достоинств или недостатков рассмотренных конструкций тарелок.

Для определения коэффициента массообмена существует методика, предложенная в работах [10]. Она предполагает определение этой характеристики при проведении экспериментальных исследований. Определение коэффициента массоотдачи непосредственно из опыта затруднено, т. к. в настоящее время отсутствуют достаточно надежные методы, позволяющие замерять концентрацию на границе раздела фаз. Поэтому, для нахождения коэффициента массоотдачи на основании экспериментальных данных может применяться косвенный метод. Кроме этого, при выборе метода необходимо учитывать, что коэффициенты диффузии в жидкостях на несколько порядков меньше чем в газах.

3. Цель и задачи исследования

Целью исследования является определить массообменные и гидродинамические характеристики аппарата типа ВРПМА и выяснить их взаимное влияние.

Задачами же исследования есть создание экспериментального стенда, проведение экспериментов на различных гидродинамических режимах с определением поля скоростей и замером содержания целевого компонента на входе и выходе аппарата.

4. Экспериментальное определение массообменных и гидродинамических характеристик ВРПМА

Для решения поставленной задачи использование существующей экспериментальной установки, показанной на рис. 1, является возможным при дополнении ее блоком автоматического титрования, который позволяет определять концентрацию целевого компонента с высокой степенью точности.

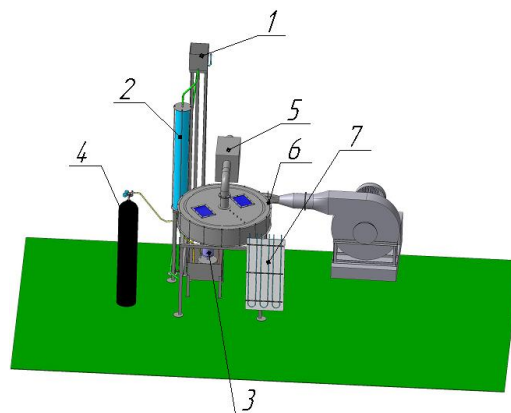


Рис. 1. Схема лабораторного стенда для исследования массообменных характеристики ВРПМА: 1 – напорный бак; 2 – насадочная колонна; 3 – насос; 4 – баллон с CO₂; 5 – брызгоуловитель; 6 – массообменная камера; 7 – блок U образных манометров; 8 – газодувка

Целью экспериментального исследования является нахождение зависимости степени извлечения целевого компонента из жидкой фазы в газовую в аппаратах нового типа, которыми являются ВРПМА.

Степень извлечения находим согласно выражению

$$C_{ii} = \frac{X_2}{X_1} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где X₁, X₂ – концентрации целевого компонента в жидкой фазе на входе в аппарат и на выходе соответственно.

В данных исследованиях для нахождения коэффициента массоотдачи жидкой фазы были проведены опыты по десорбции плохо растворимого в воде газа CO₂. В связи с малыми концентрациями CO₂ в газе и высокой константой фазового равновесия в смеси углекислый газ-вода (m_{yx}=1440) влиянием газовой фазы на движущую силу процесса десорбции можно пренебречь [7] и коэффициент массоотдачи, определенный в жидкой фазе, принять равным коэффициенту массопередачи [7, 10].

$$K_V \approx K_{XV}, \quad (2)$$

где K_V – объемный коэффициент массопередачи моль/м³с; K_{XV} – объемный коэффициент массоотдачи в жидкой фазе моль/м³с

Далее на данной установке можно исследовать такие характеристики:

Объемный коэффициент массопередачи

$$K_V = \frac{GN_x}{V},$$

где число единиц переноса N_x определяется через среднюю логарифмическую движущую силу процесса между начальной и конечной разностью концентрацией:

$$N_x = \ln \frac{X_1}{X_2}, \quad (3)$$

где X₁, X₂ – концентрация компонента в жидкой фазе на входе и на выходе из аппарата.

Другим очень важным критерием, который характеризует энергоемкость массообменного оборудова-

ния, является величина удельного гидравлического сопротивления, которое приходится на одну теоретическую ступень изменения концентрации или единицу переноса.

$$\Delta P_{уд} = \Delta P / N_x, \tag{4}$$

где ΔP – полные потери напора между точкой, которая находится в подводящем газовом патрубке и точкой вывода газовой смеси из аппарата, Па.

$$\Delta P = P_{ст} + \frac{\rho_g \cdot V_{вх}^2}{2} - P_3, \tag{5}$$

где $P_{ст}$ – статическое давление на входе в аппарат, Па; ρ_g – плотность газа, кг/м³; $V_{вх}$ – скорость газа во входном сечении, м/с; P_3 – полное давление после аппарата, замеряемое в патрубке вывода газа из аппарата, Па.

Объемный коэффициент массоотдачи в жидкой фазе для ВРПМА с поправкой на температуру:

$$\beta_{хв} = \frac{N_x Q_g}{\pi R_1^2 H} \cdot e^{0.02(20-t_x)}, \tag{6}$$

где N_x – число единиц переноса; Q_g – нагрузка по жидкой фазе м³/с;

Коэффициент массоотдачи в жидкой фазе β_x можно определить, зная критерий Нуссельта:

$$Nu = \frac{\beta_x d_3}{D}, \tag{7}$$

где D – коэффициент диффузии компонента в фазе, м²/с; d_3 – диаметр вихревой камеры, м.

В свою очередь, если критерий Нуссельта является функцией нескольких других критериев, таких как критерий Пекле (характеризует массообмен в движущемся потоке $Pe = Re \cdot Pr$), критерий Рейнольдса

($Re = \frac{\omega d \rho}{\mu}$) и ряда других геометрических соотношений (диаметр и высота аппарата), то при нахождении его учтены все особенности протекания процесса массоотдачи в фазах и, соответственно, процесса массопередачи между фазами в целом.

$$Nu = f(Pe, Re, \Gamma_1, \Gamma_2).$$

Объем рабочей камеры аппарата ВРПМА можно определить по зависимости:

$$V_{ан} = \frac{M}{K_{хв} \Delta X}, \tag{8}$$

где M – количество вещества, которое переходит из одной фазы в другую, моль; $K_{хв}$ – объемный коэффициент массопередачи, моль/м³; $\Delta X_{ср}$ – средняя движущая сила, моль газа/моль жидкости.

При исследовании полых массообменных аппаратов, при отсутствии контактных устройств, на поверхности которых происходит массообмен более актуально использование объемного коэффициента массопередачи, так как он более объективно показывает эффективность использования рабочего пространства ВРПМА [7, 9].

При проведении исследования массообменных характеристик ВРПМА для определения содержания

целевого компонента CO₂ в растворителе (вода) был применен метод титрования [8].

Определив количество вещества, которое переходит из жидкой фазы в газовую, в вихревой камере коэффициент массопередачи можем определить исходя из основного уравнения массопередачи:

$$M = K_{хв} F \Delta, \tag{9}$$

где F – поверхность массопередачи, м²; Δ – движущая сила процесса абсорбции.

При проведении экспериментальных исследований количество вещества определяется исходя из начальной и конечной концентрации целевого вещества в растворе:

$$M = (X_1 - X_2) V, \tag{10}$$

где X_1, X_2 – концентрация целевого вещества в растворе, моль/л; V – объемный расход жидкости, л.

Результаты расчетов коэффициента представлены на рис. 2.

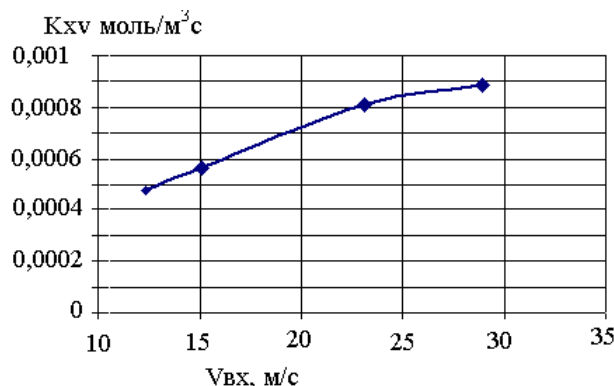


Рис. 2. Зависимость коэффициента массопередачи от начальной скорости газа

Анализируя графическую зависимость делаем вывод что увеличение начальной скорости газового потока, за счет увеличения расхода газа при сохранении постоянного расхода жидкости приводит к увеличению коэффициента массопередачи.

В результате обработки данных экспериментальных исследований также определена зависимость поверхности массообмена от соотношения нагрузок по фазам при различных начальных скоростях газа при входе в аппарат.

Для определения поверхности массообмена F использована зависимость (5)

$$F = \frac{3d_c^2}{2d_k} n_{\phi} \pi (R_1 - R_2), \tag{11}$$

где d_c – диаметр сопла форсунки, м; n_{ϕ} – количество сопел форсунки, шт; R_1, R_2 – больший и меньший радиусы вихревой камеры, м; d_k – диаметр получаемых капель, м.

Диаметр капли определяем расчетным путем [1]:

$$d_k = \frac{We \sigma}{\rho V_{отн}^2}, \tag{12}$$

где We – критерий Вебера ; d_k – диаметр капли, м; σ – коэффициент поверхностного натяжения Н/м; ρ_z – плотность газа кг/м³; $V_{отн}$ – относительная скорость фаз (окружная скорость газового потока), м/с, определяется замером аэродинамическим зондом скорости в районе распыления [5].

Массовый расход жидкости определяем по формуле:

$$L = V_{ж} \cdot \rho_{ж}, \tag{13}$$

где $V_{ж}$ – объемный расход жидкости, определяемый по ротаметру, м³/с; $\rho_{ж}$ – плотность жидкости, кг/м³.

Массовый расход газа определяем по формуле:

$$G = V_{г} \cdot \rho_{г}, \tag{14}$$

где $V_{г}$ – объемный расход газа, м³/с; $\rho_{г}$ – плотность газа, кг/м³.

Зависимость изменения поверхности массообмена при различных начальных скоростях газа в направляющих щелях показаны на рис. 3 и табл. 1.

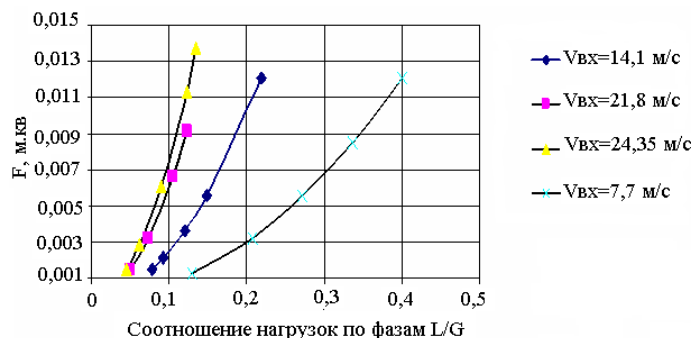


Рис. 3. Изменение межфазной поверхности при различных начальных скоростях газа во входных тангенциальных щелях и нагрузках по фазам

Таблица 1

Результаты экспериментальных исследований

| L/G | V _{вх} =7,7 м/с | L/G | V _{вх} =14,1 м/с | L/G | V _{вх} =21,8 м/с | L/G | V _{вх} =24,35 м/с |
|-------|--------------------------|-------|---------------------------|-------|---------------------------|-------|----------------------------|
| 0,129 | 0,0015 | 0,076 | 0,00152 | 0,05 | 0,0015 | 0,06 | 0,0013 |
| 0,207 | 0,0021 | 0,09 | 0,0032 | 0,073 | 0,0028 | 0,09 | 0,0032 |
| 0,271 | 0,00363 | 0,12 | 0,0067 | 0,105 | 0,0061 | 0,12 | 0,0056 |
| 0,336 | 0,00554 | 0,147 | 0,0092 | 0,123 | 0,0113 | 0,134 | 0,0085 |
| 0,400 | 0,012071 | 0,21 | 0,0066 | 0,105 | 0,0137 | 0,056 | 0,012 |

Исходя из произведенных визуальных наблюдений и данных из литературы [6] увеличение межфазной поверхности происходит за счет роста скорости газа в центре аппарата (в районе распылительных форсунок).

Для получения данных по изменению скорости вдоль радиуса аппарата проведены замеры 5-ти точечным зондом. Полученные значения в центре аппарата находятся в пределах 34–50 м/с. Результаты замера

представлены на рисунке 4 и определялись согласно методике представленной в [5].

Полученная графическая зависимость показывает, что скорость газового потока постепенно повышается

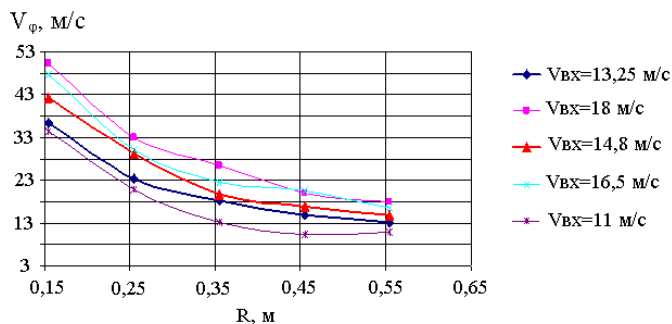


Рис. 4. Зависимость окружной скорости газового потока вдоль радиуса вихревой камеры ВРПМА

от периферии к центру аппарата, что свидетельствует о правильном его проектировании. Также указанные графические зависимости можно использовать для расчета скорости капель и, как следствие, расчета эффективности работы аппарата типа ВРПМА.

4. Выводы

В статье рассмотрены условия получения мелкодисперсного распыления жидкости в ВРПМА, что положительно влияет на увеличение поверхности массообмена. Исходя из полученных данных, можно рекомендовать поддерживать скорость во входных щелях не менее 24 м/с, при этом в зоне распыления скорость газового потока будет более 60 м/с. Эти условия позволяют получить коэффициент массопередачи более 0,00085 моль/м³с и минимальные геометрические размеры аппарата. Также в результате проведения экспериментальных исследований можно выдать ряд рекомендаций и отследить ряд взаимосвязей:

1. Имеет место зависимость массообменных характеристик от величины скорости газа в тангенциальных щелях и величины тангенциальной скорости в зоне распыления жидкости на капли.

2. Важную роль играют геометрические размеры вихревой массообменной камеры, особенно радиус патрубка отвода газа из массообменной камеры в одной из торцевых крышек, так как для величины тангенциальной скорости газового потока в зоне распыления определяющим является соотношение этих геометрических параметров. С увеличением этого соотношения тангенциальная составляющая скорости газа, воздействующая на струи жидкости, в зоне распыления увеличивается, что приводит к уменьшению диаметра капель и увеличению межфазной поверхности.

3. После ввода в газовый поток струй жидкости свою роль влияния на массообменные процессы начинает играть нагрузка по жидкой фазе. С увеличением нагрузки по жидкой фазе происходит уменьшение величины тангенциальных скоростей газового потока практически во всем объеме вихревой массообменной

камеры ВРПМА. Это приводит и к снижению относительных скоростей фаз в зоне распыла, что сказывается на увеличении диаметра капель распыляемой жидкости, и, как следствие, к ухудшению условий массообмена. Силы сопротивления, которые увлекают

капли в совместное с газом движение, становятся преобладающими, что может привести к значительному увеличению брызгоуноса, к снижению эффективности массообмена и в конечном итоге может привести к срыву работы ВРПМА.

Литература

1. Склабинский, В. И. Влияние гидродинамических параметров газового потока на интенсивность внутренних циркуляционных токов в каплях жидкости в массообменной камере распыливающего противоточного аппарата [Текст] / В. И. Склабинский, Н. А. Кочергин, Н. К. Аль Хайят Мохаммед // Вісник СумДУ. – 2012. – № 2 (102).
2. Склабинський, В. І. Втрати енергії в масообмінній камері і радіальному дифузори вихрового розпилювального протитієїного масообмінного апарата [Текст] / В. І. Склабинський // Вісник Сум ДАУ. – 2000. – №. 5 – С. 70–74.
3. Склабинський, В. І. Формування плоского вихрового газового потоку в робочій камері вихрового розпилювального протитієїного масообмінного апарата [Текст] / В. І. Склабинський, С. В. Вакал // Водне господарство України. – 1999. – № 5-6. – С 37–38.
4. Аль Хайят Мохаммед, Н. К. Экспериментальное определение характеристик вихревых распыливающих противоточных массообменных аппаратов (ВРПМА) [Текст] / Н. К. Аль Хайят Мохаммед, Д. М. Мохаммед Абдуллах // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2012. – № 15(186), Ч. 2. – С. 175–183.
5. Повх, И. Л. Аэродинамический эксперимент в машиностроении [Текст] / И. Л. Повх; 3-е изд. – Л., "Машиностроение" (Ленинградское отделение), 1974. – 480 с.
6. Склабинский, В. И. Брызгоунос в вихревых распыливающих противоточных массообменных аппаратах [Текст] / В. И. Склабинский // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 1998. – № 2. – С. 66–70.
7. Склабинский, В. И. Экспериментальное исследование массообменных характеристик ВРПМА [Текст] / В. И. Склабинский // Вісник ІАН. – 1998. – № 3-4. – С. 60–65.
8. Эшворт Р. Ф. Титриметрические методы анализа органических соединений [Текст] / Р. Ф. Эшворт. – М.: Методы прямого титрования, 1968. – 354 с.
9. Склабинський, В. І. Проектування підведення газу до робочої камери вихрового протитієїного масообмінного апарата [Текст] / В. І. Склабинський // Хімічна промисловість України. – 2000. – № 3. – С. 48–52.
10. Склабинський, В. І. Вплив гідродинамічних параметрів вихрового газового потоку на роботу вихрового розпилювального протитієїного масообмінного апарата [Текст] / В. І. Склабинський // Вісник Сум ДУ. – 2000. – № 15. – С. 46–51.