

## ВЛИЯНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГАЗОВОГО ПОТОКА НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ВНУТРЕННИХ ЦИРКУЛЯЦИОННЫХ ТОКОВ В КАПЛЯХ ЖИДКОСТИ В МАССООБМЕННОЙ КАМЕРЕ РАСПЫЛИВАЮЩЕГО ПРОТИВОТОЧНОГО АППАРАТА

**В. И. Склабинский**, д-р техн. наук;

**Н. А. Кочергин\***, канд. техн. наук;

**Аль Хайят Мохаммед Н. К.,**

Сумский государственный университет, г. Сумы, Украина;

\*Северодонецкий технологический институт Восточноевропейского национального университета им. В. Даля, г. Северодонецк, Украина

*Проведений теоретичний аналіз впливу швидкостей газового потоку на внутрішні циркуляційні струми в краплях рідини в робочій камері вихрового протитечійного розпилювального масообмінного апарата. Експериментально підтверджено високу інтенсивність масообмінних процесів у вихрових потоках крапель і газу при їх протитечійному русі.*

**Ключові слова:** масообмін, крапля, швидкість газу, вихровий потік, циркуляційні струми.

*Проведен теоретический анализ влияния скоростей газового потока на внутренние циркуляционные токи в каплях жидкости в рабочей камере вихревого противоточного распыливающего массообменного аппарата. Экспериментально подтверждено высокую интенсивность массообменных процессов в вихревых потоках капель и газа при противоточном их движении.*

**Ключевые слова:** массообмен, капля, скорость газа, вихревой поток, циркуляционные токи.

### ВВЕДЕНИЕ

В последнее время появляется большое количество различных конструкций массотеплообменного [1] и грануляционного оборудования [2], в котором используются вихревые течения газового и капельного потоков. Такой интерес объясняется высокой эффективностью протекающих в вихревой массообменной камере тепломассообменных процессов. До настоящего времени нет достаточно глубоко разработанной и апробированной теории, которая описывала бы гидродинамические и массообменные процессы, происходящие на уровне капель жидкости и внутри этих капель. Это сдерживает разработку широкого спектра высокоэффективного массообменного оборудования с использованием противоточного движения вихревых потоков капель и газа. Таким образом, теоретическое обоснование влияния гидродинамики вихревого газового потока на интенсификацию внутренних циркуляционных токов в каплях жидкости, которые движутся в газовом потоке с градиентом окружных скоростей и оказывают влияние на ускорение массообменных процессов, является актуальной задачей.

### МОДЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

**Методика моделирования.** Анализ факторов, которые приводят к ускорению массообменных процессов в вихревых распыливающих противоточных массообменных аппаратах (ВРПМА), можно объяснить, используя широко известное уравнение массопередачи [3]. В соответствии с этим уравнением количество вещества, переданного между фазами, зависит от коэффициента и величины поверхности массопередачи, движущей силы процесса (разность концентраций). Схема движения, распада струи жидкости и схема воздействия газового потока на каплю жидкости показаны на рисунке 1.

Вихревой поток газа в ВРПМА, имеющий градиент скоростей по радиусу массообменной камеры, создает условия для существенного увеличения значений межфазной поверхности и коэффициента массопередачи по следующим основным причинам: в области распыла струй жидкости на капли существуют большие относительные скорости движения фаз, что приводит к распылению жидкости на мелкодисперсные капли и увеличению межфазной поверхности; поверхность капли подвергается воздействию градиента скоростей газового потока вдоль радиуса вихревой массообменной камеры, капля начинает вращаться вокруг своей оси, внутри капли интенсифицируются внутренние циркуляционные токи и, как следствие, происходит ускоренное обновление межфазной поверхности.

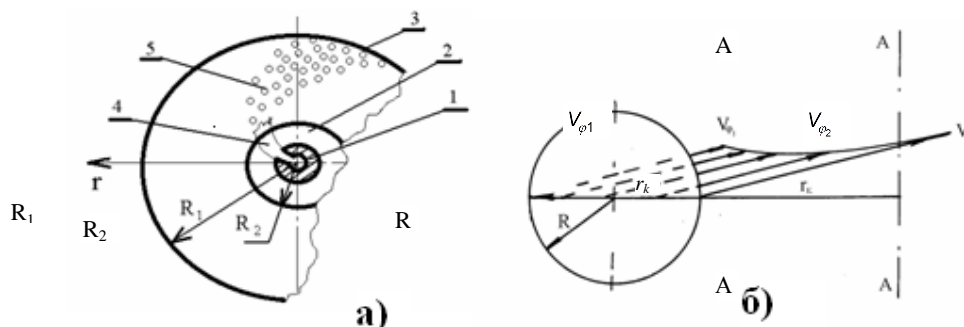


Рисунок 1 – Схема распада струи жидкости (а) и схема воздействия газового потока на каплю: 1 – распылитель; 2 –

патрубок

отвода

газа;

3 – цилиндрическая стенка; 4 – сплошная струя жидкости; 5 – капля жидкости;  $R_1$  – радиус массообменной камеры;  $R_2$  – радиус отверстия для отвода газа;  $R$  – радиус капли;  $V_{\varphi_1}$  и  $V_{\varphi_2}$  – окружная скорость газа по обе стороны капли в направлении радиуса массообменной камеры;  $A-A$  – ось вихревой массообменной камеры

Для теоретического обоснования высказанных предположений, которые позволяют создать математическое описание происходящих в рабочей вихревой массообменной камере процессов, необходимо разработать физическую модель происходящих в этой вихревой массообменной камере процессов. Эта физическая модель должна основываться на понимании того, как формируется развитая межфазная поверхность, и того, как вихревой газовый поток способствует интенсификации внутренних циркуляционных токов в каплях жидкости, движущихся в этом вихревом газовом потоке.

Последние теоретические и экспериментальные исследования гидродинамики вихревой массообменной камеры ВРПМА позволили получить более точное решение (1) уравнений Навье-Стокса, используя замену коэффициента кинематической вязкости на коэффициент турбулентной вязкости газового потока [4]. Для определения величины окружной скорости газа вдоль радиуса вихревой массообменной камеры ВРПМА используется следующее математическое выражение:

$$V_{\varphi}(r) = \frac{V_{\varphi_1} \left( R_1^2 V_{r1} + R_1 \varepsilon + R_1 \frac{-V_{r1} R_1 + \varepsilon}{\varepsilon} \frac{V_{r1} R_1 + 2\varepsilon}{\varepsilon r} \right)}{(V_{r1} R_1 + 2\varepsilon) r}. \quad (1)$$

Зная, что распыление струй жидкости происходит вблизи радиуса массообменной камеры, равного  $R_2$ , можно (подставив численное значение этого радиуса для рассматриваемой массообменной камеры вместо текущего значения радиуса вихревой массообменной камеры  $r$  и зная гидродинамические параметры газового потока на входе в вихревую массообменную камеру на радиусе  $R_1$ ) определить скорости газа в зоне распыла жидкости и соответственно определить и размеры получаемых капель жидкости, а также определить окружные скорости газа по обе стороны капли.

Как было показано авторами работы [4], наличие разности скоростей в потоке газа на поверхности капли приводит к смещению точки приложения равнодействующей аэродинамических сил, воздействующих на каплю и на ее вращение. С другой стороны, движение внешних слоев капли вязкой жидкости должно приводить к появлению внутренних циркуляционных токов, ускорению массообмена. С этой точки зрения представляет значительный интерес выявление взаимосвязи между параметром  $a_1$  (2), который характеризует интенсивность возрастания градиента окружной скорости газа, и увеличением интенсивности внутренних циркуляций

$$V_{\varphi} = \left( \frac{V_{\varphi_2} - V_{\varphi_1}}{2R} \right) r + V_{\varphi_2} = a_1 r + a_2. \quad (2)$$

Рассмотрим влияние на каплю вязкой жидкости газового потока в сферической системе координат, центр которой совпадает с центром капли (рис. 2). Воздействие на каплю газового потока с градиентом скоростей вдоль радиуса вихревой массообменной камеры приводит к возникновению аэродинамических сил и сил трения о поверхность капли, величина которых определяется математическим выражением [5].

$$F = \frac{5}{8} \psi \rho_g R^4 a_1^2 \pi + \frac{1}{2} \psi \rho_g R^2 a_2^2 \pi + \psi \rho_g R^3 a_1 a_2 \pi, \quad (3)$$

где  $\rho_g$  – плотность газа; величины  $a_1$  и  $a_2$  выражают изменение скоростей газового потока (характеризуют градиент скорости газа) по обе стороны капли вдоль радиуса вихревой массообменной камеры.

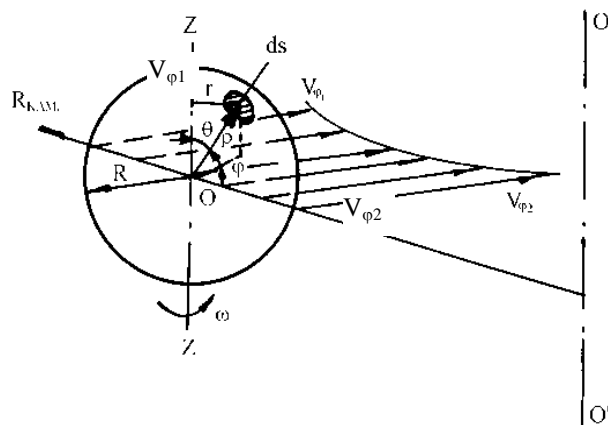


Рисунок 2 - Схема взаимодействия капли с вихревым потоком газа:

$o'-o'$  – ось вихревой камеры;  $\rho, \theta, \varphi$  – сферические координаты;  $\omega$  – угловая скорость вращения;  $R$  – радиус капли;  $r$  – радиус вращения элементарной площадки  $ds$ , нормальной к радиусу;  $Z-Z$  – ось вращения капли жидкости

В результате возникает вращение капли, на ее поверхности появляются касательные напряжения, величина которых равна  $\tau = \mu_{\Gamma} dV/d\rho$ , где  $\mu_{\Gamma}$  – коэффициент динамической вязкости газа. Здесь и дальше  $\rho, \theta$  и  $\varphi$  – сферические координаты, показанные на рисунке (2).

Так как линейная скорость на рассматриваемой поверхности равна  $V = \omega r$ , где  $\omega$  – угловая скорость вращения выделенного элемента с радиусом вращения  $r$ , то  $dV = \omega dr + r d\omega$ .

Учитывая, что  $dr = \sin\theta d\rho + \rho \cos\theta d\theta$  и

$$dV = \omega \sin\theta d\rho + \omega \rho \cos\theta d\theta + \rho \sin\theta d\omega,$$

величина касательных напряжений

$$\tau = \mu_{\Gamma} \left( \omega \sin\theta + \omega \rho d\theta/d\rho + \rho \sin\theta d\omega/d\rho \right). \quad (4)$$

Рассматривая пограничный слой газа на поверхности капли толщиной  $\delta$  и считая, что  $d\rho \approx \delta$  и  $d\omega \approx \Delta\omega = \omega_K - \omega_{\Gamma}$ , где  $\omega_K$  и  $\omega_{\Gamma}$  – угловая скорость вращения слоев соответственно поверхности капли и газа на поверхности с радиусом  $R + \delta$ , и учитывая, что угловая скорость вращения газа вокруг капли за пограничным слоем  $\omega_{\Gamma} \approx 0$ , то уравнение (4) преобразуется следующим образом:

$$\tau = \mu_{\Gamma} \left( \omega_K \sin\theta + \frac{\omega_K}{\delta} R \cos\theta d\theta + R \sin\theta \frac{\omega_{\Gamma}}{\delta} \right). \quad (5)$$

Сила трения, которая действует на элементарную площадку поверхности капли  $ds$ , равна

$$dT = \tau ds = \mu_{\Gamma} \omega_K \left( \sin\theta + \frac{R}{\delta} \cos\theta d\theta + \frac{\rho}{\delta} \sin\theta \right) ds, \quad (6)$$

где величина  $ds$  в сферической системе координат равна  $ds = R^2 \sin\theta d\theta d\varphi$ , а величина  $r$  на поверхности капли  $r = R \sin\theta$ .

Уравнение (6) можно несколько упростить, считая, что составляющая, которая содержит множитель  $d\theta$ , является малой величиной по отношению к другим слагаемым и после интегрирования

$$T = \pi^2 \mu_{\Gamma} \omega_K R^2 \left( 1 + \frac{R}{\delta} \right). \quad (7)$$

Если считать, что ось вращения капли проходит сквозь ее центр  $O$  (рис. 2), то момент силы трения после интегрирования по всей поверхности капли равен

$$M_c = 2\mu_{\Gamma} \omega_K \left( 1 + \frac{R}{\delta} \right) R^3 \int_0^{\pi} \int_0^{\pi} \sin^3\theta d\theta d\varphi = \frac{8}{3} \pi \mu_{\Gamma} \omega_K \left( 1 + \frac{R}{\delta} \right) R^3. \quad (8)$$

В соответствии с законом динамики вращательного движения [6] вращение системы, которая в данном случае представляет собой каплю жидкости, описывается уравнением движения

$$\frac{d(I_z \omega)}{dt} = \sum M_z, \quad (9)$$

где  $I_z$  – момент инерции капли относительно оси вращения;  $\sum M_z$  – сумма моментов сил относительно оси вращения. Капля не является твердым телом, и уравнение (9) можно записать

$$I_z = \rho_g \int_V \rho^4 \cos^2\theta \sin^3\theta d\rho d\theta d\varphi. \quad (10)$$

Для капли, которая имеет форму сплошного шара [6]  $I_z = (2/5)mR^2$ , масса капли  $m = \rho_{ж} V = \rho_{ж} (4/3)\pi R^3$ , момент инерции  $I_z = (8/15) \rho_{ж} \pi R^5$ .

Тогда уравнение (9) принимает вид

$$\omega \rho_g \rho^4 \cos^2\theta \sin\theta \frac{d\rho}{dt} d\theta d\varphi + \frac{8}{15} \rho_g \pi R^5 \frac{d\omega}{dt} = \sum M_z. \quad (11)$$

Величину  $\sum M_z$  можно определить как разность момента, который возникает вследствие разности скоростей по обе стороны капли, и момента сил сопротивления, возникающего из-за наличия касательных напряжений на поверхности капли при ее вращении:

$$\sum M_z = M - M_c = 16\pi \rho \rho_{\Gamma} R^3 \left( \frac{7}{128} R^2 a_1^2 + \frac{5}{8} R a_1 a_2 + \frac{a_2^2}{32} \right) - \frac{8}{3} \pi \mu_{\Gamma} \omega_K \left( 1 + \frac{R}{\delta} \right) R^3. \quad (12)$$

В свою очередь, производная  $d\rho/dt$  является радиальной составной скорости движения жидкости в капле  $W_r$  и характеризует скорость переноса вещества внутри капли, то есть интенсивность конвективного массообмена.

Величина  $\rho^2 \sin \theta d\theta d\phi$ , как показано выше, является выражением для определения элемента сферической поверхности  $ds$ . Таким образом, расход жидкости сквозь поверхность  $ds$ , нормальную к радиусу капли внутри этой капли, равен

$$dq = \omega_r ds = \frac{d\rho}{dt} \rho^2 \sin \theta d\theta d\phi. \quad (13)$$

Тогда уравнение (11) с учетом выражений (12) и (13) можно записать как

$$\begin{aligned} \omega \rho_g \rho^2 \cos^2 \theta dq = 16\pi\psi\rho_g R^3 \left( \frac{7}{128} R^2 a_1^2 + \frac{5}{8} Ra_1 a_2 + \frac{a_2^2}{32} \right) - \\ - \frac{8}{3} \pi\mu_\Gamma \omega_\kappa \left( 1 + \frac{R}{\delta} \right) R^3 - \frac{\delta}{15} \rho_g \pi R^5 \frac{d\omega}{dt}. \end{aligned} \quad (14)$$

### АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ полученной математической зависимости, которая отражена в виде уравнения (14), может выявить зависимость между величиной  $dq$ , характеризующей величину радиальных токов в капле, и величиной  $a_1$  (характеризует градиент окружной скорости, т. е. разность окружных скоростей газа по обе стороны капли). Эта зависимость имеет сложный, нелинейный характер, который можно представить в виде

$$\begin{aligned} dq = \left( 16\pi\psi\rho_\Gamma R^3 \left( \frac{7}{128} R^2 a_1^2 + \frac{5}{8} Ra_1 a_2 + \frac{a_2^2}{32} \right) - \frac{8}{3} \pi\mu_\Gamma \omega_\kappa \left( 1 + \frac{R}{\delta} \right) R^3 - \frac{8}{15} \rho\pi R^5 \frac{d\omega}{dt} \right) / \\ / \left( \omega \rho \rho_\Gamma^2 \cos^2 \theta \right). \end{aligned} \quad (15)$$

Таким образом, полученное уравнение (15) показывает существующую зависимость между поперечным градиентом скорости газа в вихревой массообменной камере ВРПМА, интенсивностью радиальных токов в капле и, следовательно, интенсивностью массообменных процессов.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

**Методика эксперимента.** Определить непосредственно скорость, направленность и интенсивность внутренних циркуляционных токов внутри капель жидкости экспериментально в настоящее время является практически не разрешимой задачей. О влиянии градиента окружных скоростей газового потока на интенсификацию внутренних циркуляционных токов в каплях можно судить по сопоставлению гидродинамических характеристик газового потока с изменением интенсивности массообменных процессов, которые происходят в вихревой массообменной камере ВРПМА.

С этой целью на кафедре процессов и оборудования химических и нефтеперерабатывающих производств Сумского государственного университета был сооружен специальный исследовательский стенд. Определение коэффициента массоотдачи непосредственно из опыта затруднено, потому что в данное время отсутствуют довольно надежные методы, которые позволяют замерить концентрацию на границе раздела фаз. Поэтому для нахождения коэффициента массоотдачи на основании экспериментальных данных применялся косвенный метод. Кроме этого, при выборе метода учитывалось, что коэффициенты диффузии в жидкостях на несколько порядков меньше, чем в газах.

**Результаты эксперимента.** На рисунке 3 приведен пример графических зависимостей степени извлечения диоксида углерода из жидкой фазы от скорости газа во входных тангенциальных щелях  $V_{BX}$  при разных скоростях жидкости  $W_{BX}$  в отверстиях распылителя ВРПМА.

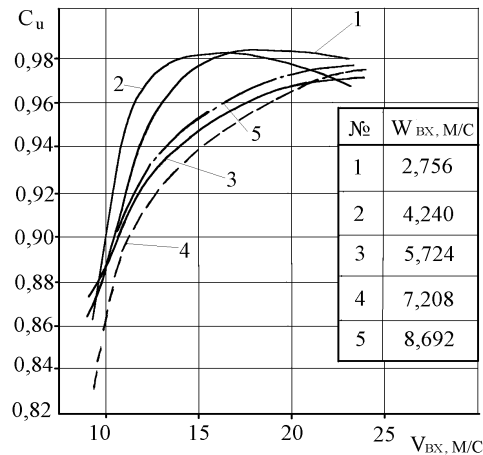


Рисунок 3 – Зависимость степени извлечения от скорости газа во входных тангенциальных щелях ВРПМА

Анализ представленных графических зависимостей показывает, что с увеличением скоростей газового потока во входных тангенциальных щелях ВРПМА происходит увеличение по степенной зависимости и величин окружных скоростей газового потока вдоль радиуса вихревой массообменной камеры, а значит, что и увеличивается разность скоростей газового потока по обе стороны капли жидкости, которая находится в рабочей зоне вихревой камеры ВРПМА. С увеличением скоростей газа увеличивается и интенсивность массообменных процессов.

### ВЫВОДЫ

Полученная в результате экспериментальных исследований информация была использована при подтверждении выполненных на кафедре теоретических исследований, которые позволили обосновать влияние гидродинамических параметров вихревого газового потока на интенсивность массообменных процессов в вихревых потоках газа и капель жидкости и установить степень влияния этих параметров на циркуляционные токи в каплях жидкости.

Исследование массообменных характеристик ВРПМА в процессах абсорбции (десорбции) может быть положено в основу разработки новых усовершенствованных конструкций ВРПМА. Полученные результаты дают возможность сформулировать основные принципы и направления повышения эффективности и производительности таких аппаратов. Обоснованы физическая и математическая модели движения газа и капель жидкости в рабочей камере ВРПМА с точки зрения влияния на циркуляционные течения в каплях, что позволяет выбрать наиболее благоприятные условия работы ВРПМА.

### SUMMARY

#### EFFECT OF HYDRODYNAMIC PARAMETERS OF GAS FLOW ON INTENSIVE INTERNAL CIRCULATING CURRENTS IN THE LIQUID DROPLETS IN THE SPRAY COUNTERFLOW MASS TRANSFER CHAMBER APPARATUS

*Sklabinskiy V., Kochergin N.\*, Nahdim M.,*

*Sumy State University, Sumy, Ukraine;*

*\*Technological Institute of East Ukraine Volodymyr Dahl National University, Severodonetsk, Ukraine*

*This paper gives an analysis of the velocity effect of gas flow in the internal circulating currents in the droplets of the liquid in the chamber of the vortex mass transfer of countercurrent spray apparatus. It is experimentally confirmed by the high intensity of mass transfer processes in the vortex flow drops and the gas in the countercurrent to the movement.*

**Key words:** mass transfer, drop, gas velocity, the vortex flow, circulating currents.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Склабинський В. І. Основні напрямки дослідження та впровадження у промисловість вихрових массообмінних апаратів з протітечієм рухом фаз у зоні контакту // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. – 2001. – № 9 (30) -10(31). – С. 28-32.
2. Склабинський В. І. Малогабаритні апарати змінного перетину з вихровим псевдозрідженим шаром. Вплив розподільних пристроїв на рух гранул / В. І. Склабинський, А. Є. Артюхов // Хімічна промисловість України. – 2006. – № 2 (73). – С. 55-59.
3. Рамм В. М. Абсорбция газов. – М.: Химия. 1976. – 655 с.
4. Склабинський В. І. Рух потоку плаву (газу) в порожнині віброгранулятора та вихрового протітечієного массообмінного апарата / В. І. Склабинський, В. А. Осіпов, М. П. Кононенко, Д. М. Мохаммед Абдуллах // Хімічна промисловість України. – 2011. – № 1. – С. 3-5.
5. Склабинский В. И. Влияние гидродинамических факторов на вращение капли (гранулы) в вихревом газовом потоке / В. И. Склабинский, Д. М. Махаммед Абдуллах // Хімічна промисловість України. – 2009. – № 2 (91). – С. 32-34.
6. Яворский Б. М. Справочник по физике / Б. М. Яворский, А. А. Детлаф. – М.: Наука. – 1968. – 939 с.

Поступила в редакцию 2 февраля 2012 г.