



УДК 532.529

© 2008

И. И. Борисов, член-корреспондент НАН Украины **А. А. Халатов**

Гидродинамика, тепло- и массообмен во вращающихся барботажных потоках

The swirling of a gas-liquid flow enables one to brake up in the application of barbotage equipment. It is shown that the vortex barbotage flow provides the high specific interface between gas and liquid, approximately permanent gas-bubble size, two-phase flow stability at a gas flow speed up to 5 m/s, and high heat and mass transfer rates.

Контактные (газ — жидкость) аппараты широко используются в различных приложениях для утилизации теплоты, нагрева и охлаждения газов и жидкостей, очистки промышленных газов, улавливания ценных и вредных газообразных продуктов. Для осуществления прямого контакта между газом и жидкостью, как правило, используются барботажные аппараты, имеющие ряд недостатков. Во-первых, скорость движения газа без уноса барботируемой жидкости не может превышать 1–2 м/с, во-вторых, при движении пузырьков газа в жидкости происходит их быстрое слияние, что ведет к увеличению гидравлического сопротивления и снижению тепло- и массообмена. Высота современных барботажных аппаратов достаточно большая, а само оборудование весьма металлоемкое.

Дальнейшее повышение производительности барботажных аппаратов требует принципиально нового подхода к организации контакта между газом и жидкостью. Одним из перспективных методов является закрутка потока, которая позволяет повысить устойчивость барботажа при более высокой скорости движения газа, увеличить межфазную поверхность и интенсифицировать процессы переноса теплоты и массы. Использование принципа закрутки газожидкостных потоков позволяет создать интенсивные контактные аппараты и значительно снизить их материалоемкость [1].

В Институте технической теплофизики НАН Украины выполнен обширный цикл экспериментальных исследований гидродинамики и тепломассообмена в вихревых барботажных аппаратах, в которых вращающийся пузырьковый слой формируется внутри стационарной вихревой камеры за счет тангенциальной подачи газового потока [2, 3]. Принципиальная схема одного из таких аппаратов показана на рис. 1. Воздух подается в вихревую камеру через тангенциально-лопаточный завихритель, а сверху поступает жидкость. Закрученный газ “подхватывает” жидкость и создает около боковой стенки камеры вращающийся газожидкостный слой, ограниченный сверху и снизу кольцевыми торцевыми поверхностями, определяющими также его толщину.

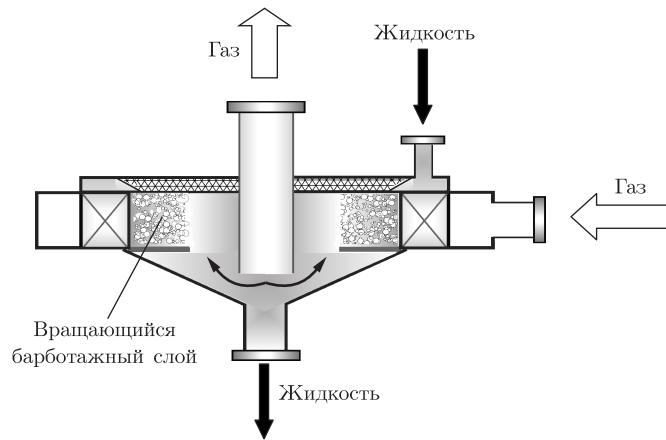


Рис. 1. Схема вихревого барботажного аппарата [2]

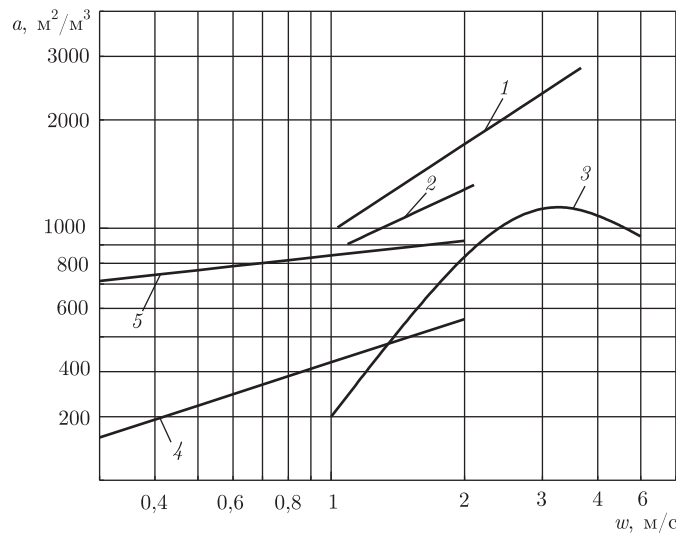


Рис. 2. Удельная поверхность контакта фаз для различных типов контактного оборудования: 1 — вихревой барботажный аппарат с подкруткой камеры ($n = 350$ об/мин) [4]; 2 — данные авторов для вихревого барботажного аппарата с неподвижным корпусом; 3 — циклонно-пенный аппарат [5]; 4, 5 — данные работ [6, 7] для барботаж на ситчатых и провальных тарелках

В отличие от традиционных пенно-барботажных потоков, в которых давление газожидкостного слоя на распределительную решетку создается внешними силами естественной гравитации, при вихревом барботаже создается искусственная гравитация за счет вращения газожидкостного потока. В данном случае межфазная поверхность формируется в условиях интенсивного вращения при значениях центростремительного ускорения, в несколько раз (иногда в десятки раз) превышающих ускорение гравитации, при этом поступающие массы газа интенсивно дробятся на мелкие пузырьки.

На рис. 2 показано сравнение опытных данных по удельной межфазной поверхности газа для различных типов контактных аппаратов. Как видно, значение этого параметра во вращающемся газожидкостном потоке существенно выше значений, имеющих место в гравитационных аппаратах. Если для последних $a \sim w^{0,15 \dots 0,3}$, то в вихревой камере с не-

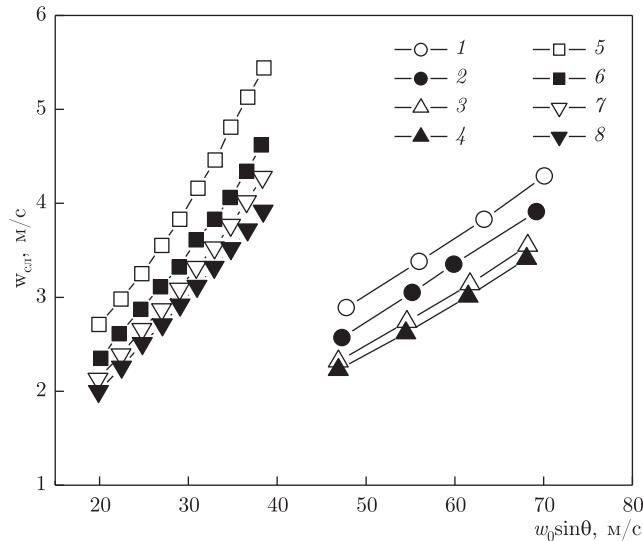


Рис. 3. Зависимость линейной скорости вращения газожидкостного слоя от тангенциальной составляющей скорости газа в щелях завихрителя:

1-4 — $h_k = 29$ мм; 5-8 — $h_k = 58$ мм; 1,5; 2,6; 3,7 и 4,8 — $H_{сл} = 15; 20; 25$ и 30 мм соответственно

подвижным корпусом $a \sim w^{0,6}$, а во вращающемся газожидкостном потоке с подкруткой корпуса $a \sim w^{0,8}$. Такой характер зависимости объясняется интенсивным диспергированием газа в зоне его входа в вихревую камеру. Как видно из рис. 2, для вихревых барботажных аппаратов имеет место монотонная зависимость до скорости 5 м/с, т. е. наблюдается устойчивая работа аппарата при более высокой скорости движения газа. При этом обнаружено, что средний размер газового пузырька во вращающемся газожидкостном потоке сохраняется примерно постоянным по объему.

Основные гидродинамические и тепломассообменные характеристики вихревого барботажного потока определяются структурой газожидкостного слоя, поэтому в ИТТФ НАН Украины был выполнен цикл фундаментальных исследований, направленных на понимание его физической природы, изучение закономерностей тепло- и массообмена и гидравлических потерь.

Линейная скорость вращения газожидкостного потока во многом определяет его структуру и характеристики. Ее измерение, проведенное с помощью помещенного в двухфазный вращающийся поток лопаточного анемометра, показало (рис. 3), что скорость вращения слоя ($w_{сл}$) линейно зависит от скорости газа в щелях завихрителя. С увеличением толщины слоя значение $w_{сл}$ уменьшается, что обусловлено увеличением трения потока о торцевые поверхности камеры.

Одним из факторов, определяющих скорость вращения барботажного слоя, является трение двухфазного потока о торцы и боковую поверхность завихрителя. Влияние поверхности завихрителя различными авторами трактуется по-разному — от полного оттеснения газожидкостного слоя с образованием газовой подушки [8, 9] до его полного прижатия [10]. Уравнение сохранения момента количества движения с учетом закрутки жидкости, поступающей в двухфазный слой с нулевой скоростью, записывается следующим образом:

$$G_r(R_0 w_0 - R_1 w_1) = \int_S C_f \varepsilon \frac{\rho_{ж} w_{сл}^2}{2} R dS + 2\pi R_0 h_k K C_f \varepsilon_1 \frac{\rho_{ж} w_{сл}^2}{2} R_0 + G_{ж} w_{сл} R_0, \quad (1)$$

где w_0 и w_1 — тангенциальные составляющие скорости газа на выходе из щелей завихрителя и на выходе из вращающегося слоя; R_0 и R_1 — внешний и внутренний радиусы слоя; h_K — высота вихревой камеры; ε — объемное содержание жидкости в двухфазном слое; S — площадь торцевых поверхностей; $w_{\text{сл}}$ — линейная скорость вращения слоя; G_{Γ} и $G_{\text{ж}}$ — массовые расходы газа и жидкости; K — коэффициент, учитывающий уменьшение поверхности трения за счет щелей завихрителя. Значение коэффициента трения C_f двухфазного слоя о поверхность принималось равным 0,025 [11], а объемное содержание жидкости в слое $\varepsilon = 0,30$ [4]. Объемное содержание жидкости вблизи поверхности завихрителя ε_1 является неизвестной величиной, которая определялась в результате решения этого уравнения. Результаты решения характеризуются следующим уравнением для скорости вращения слоя:

$$\bar{w} = \frac{-\xi(1 + \beta) + \sqrt{\xi^2(1 + \beta)^2 + 4B(C + K\varepsilon_1)}}{2B(C + K\varepsilon_1)}, \quad (2)$$

где $\bar{w} = \frac{w_{\text{сл}}}{w_0}$; $\xi = \frac{R_K - H_{\text{сл}}}{R_K}$; $\eta = \frac{h_K}{R_K}$; $\beta = \frac{G_{\text{ж}}}{G_{\Gamma}}$; $B = \frac{\rho_{\text{ж}} C_f \sin \Theta}{\rho_{\Gamma} 2s}$; $s = \frac{Nb}{2\pi R_K}$; $C = \frac{2\varepsilon(1 - \xi^3)}{3\eta}$.

Анализ экспериментальных данных показал, что вклад боковой поверхности завихрителя в поверхностное трение является переменной величиной, определяемой толщиной двухфазного слоя. Расчеты по уравнению (2) при $H_{\text{сл}} = 30$ мм позволили получить значение $\varepsilon_1 = 0,3$, что свидетельствует о том, что боковая поверхность полностью участвует в поверхностном трении. С уменьшением толщины слоя $H_{\text{сл}}$ соответствие результатов экспериментов и расчета по уравнению (2) достигается при меньших значениях объемного содержания жидкости вблизи завихрителя. При $H_{\text{сл}} = 25, 20$ и 15 мм значение ε_1 составляет 0,25, 0,2 и 0,14 соответственно, что свидетельствует о частичном оттеснении вращающегося слоя от завихрителя.

Гидравлические потери в вихревом барботажном аппарате являются суммой потерь в “сухой” решетке и потерь в двухфазном слое, обусловленных его “весом”. Анализ публикаций по гидродинамике вихревых барботажных потоков показывает, что данные различных работ по общему сопротивлению аппарата практически совпадают. При увеличении толщины слоя сопротивление растет, что связано с ростом составляющей, связанной с “весом” газожидкостного слоя. Поскольку вклад каждой из составляющих сопротивления трактуется в различных работах по-разному, были выполнены эксперименты по измерению статического давления в двух точках — в щели завихрителя, около выхода потока в вихревую камеру (p_s) и на боковой поверхности вихревой камеры (p_L).

В результате измерений обнаружено, что в узкой зоне после выхода газа из щелей завихрителя имеет место скачкообразное (примерно в 1,5 раза) уменьшение статического давления, что, по-видимому, связано с затратами на диспергирование газа. С увеличением скорости газа и толщины слоя значения p_s и p_L возрастают, однако разность этих давлений практически не зависит от толщины слоя. Сравнение значений статического давления на боковой поверхности завихрителя с центробежным “весом” газожидкостного слоя для $H_{\text{сл}} = 30$ мм показало, что при малых расходах газа имеет место практически полное совпадение расчетов и экспериментов, а при увеличении расхода расчетные данные превышают экспериментальные (примерно на 20%). Возможно, это связано с некоторым ростом газосодержания потока, которое при расчетах принималось постоянным ($\approx 0,7$).

Высокая скорость всплытия пузырьков в радиальном направлении и интенсивное перемешивание и обновление поверхности контакта обуславливает высокие тепломассообменные характеристики вращающихся барботажных потоков. На рис. 4 показана зависимость числа

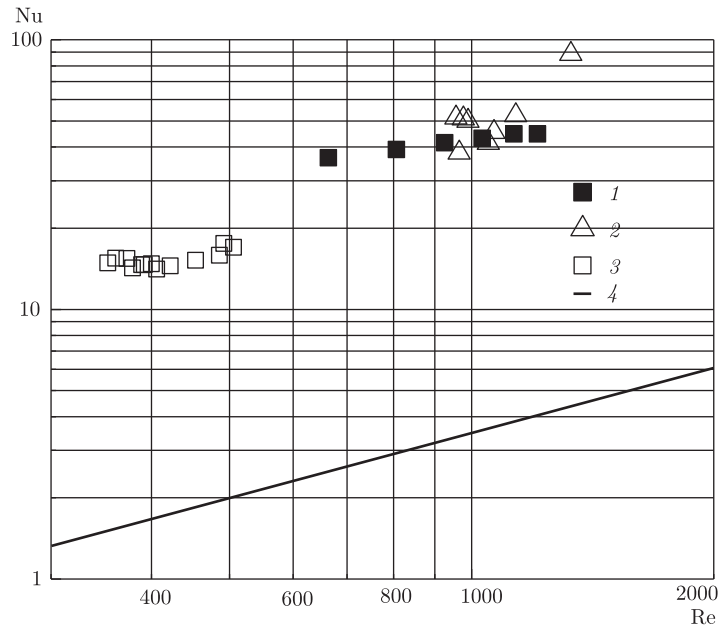


Рис. 4. Теплообмен во вращающихся барботажных потоках:
 1 — ротационно-барботажный аппарат [12]; 2 — данные работы [4] для вихревого барботажного аппарата с подкруткой корпуса; 3 — данные авторов для вихревого барботажного аппарата с неподвижным корпусом; 4 — теплообмен на провальных ситчатых тарелках [13]

Нуссельта $Nu = \alpha d_{\text{п}} / \lambda_{\text{г}}$ от числа Рейнольдса $Re = w_{\text{п}} d_{\text{п}} / \nu_{\text{г}}$, где в качестве определяющего размера принят диаметр пузырька, по измерениям, проведенным авторами в работе [14]. Из рис. 4 видно, что уровень теплообмена во вращающихся барботажных аппаратах (ВБА) в несколько раз превышает теплообмен в традиционных барботажных аппаратах. Для сравнения на этом же графике приведены данные работы [12] для ротационно-барботажных аппаратов (РБА), в которых вращение двухфазного слоя достигается за счет вращения корпуса. Видно что, коэффициенты межфазного теплообмена в РБА находятся примерно на одной линии с аналогичными данными для ВБА.

Как показали эксперименты, для вихревых барботажных потоков соблюдается аналогия между теплообменом и массообменом в газовой фазе, т. е. можно сделать вывод о том, что массообменные характеристики в основном лимитируются растворимостью газа и массообменом в жидкой фазе. Этот вывод подтверждается результатами экспериментов по водной абсорбции диоксида азота. Степень его поглощения в закрученном потоке оказалась не высокой (порядка 12–13%), т. е. процесс носит существенно незавершенный характер. Данный факт объясняется малым временем пребывания газа (несколько миллисекунд), а также невысокой растворимостью двуокиси азота в воде. Отсюда следует вывод, что при практическом использовании вихревых барботажных аппаратов следует учитывать время пребывания газа во вращающемся слое и характерное время процесса. Особенно привлекательным является использование ВБА для улавливания аэрозолей [15], степень поглощения которых приближается к 100%.

Выполненные исследования дают возможность заключить, что закрутка газожидкостного слоя является гидродинамическим средством, которое позволяет совершить существенный “прорыв” в практическом использовании барботажных аппаратов. Вихревые барботаж-

ные аппараты работают устойчиво и без уноса жидкости при значительно большей скорости газового потока (до 5 м/с). Они характеризуются развитой межфазной поверхностью, примерно постоянным размером газового пузырька, более высоким уровнем тепло- и массообмена в газовой фазе, компактностью и малой металлоемкостью.

1. *Борисов И. И., Халатов А. А.* Центробежные контакторы: основные типы и практическое применение. Обзор // Промышл. теплотехника. – 2007. – **29**, № 2. – С. 29–34.
2. *Варганов І. С., Халатов А. А., Борисов І. І., Гелетуха Г. Г.* Вихровий барботаажний тепломасообмінний апарат. Пат. № 23520А (Україна). – 1998.
3. *Борисов І. І., Халатов А. А., Варганов І. С.* Вихровий барботаажний тепломасообмінний апарат // Пат. № 73872. – (Україна). – 2005. – Бюл. № 9.
4. *Бурдуков А. П., Гольдштик М. А., Казаков В. И., Ли Т. В.* Тепло- и массоперенос в закрученном барботаажном слое // Расчет тепломассообмена в энергохимических процессах. – Новосибирск: Изд-во Ин-та теплофизики СО АН СССР, 1981. – С. 37–58.
5. *Богатых С. А.* Циклонно-пенные аппараты. – Ленинград: Машиностроение, 1978. – 224 с.
6. *Родионов А. И., Сорокин В. Е.* К расчету поверхности контакта фаз в процессе абсорбции CO₂ растворами щелочей на ситчатых тарелках // Журн. прикл. химии. – 1970. – № 11. – С. 2453–2457.
7. *Родионов А. И., Кашиников А. М., Радиковский В. М.* Определение поверхности контакта фаз на провальных ситчатых тарелках // Там же. – 1965. – № 1. – С. 143–148.
8. *Гольдштик М. А., Ли Т. В., Ханин В. М., Смирнов Н. П.* О скорости вращения газожидкостного слоя в вихревой камере // Процессы переноса в энергохимических многофазных системах. – Новосибирск: Изд. Ин-та теплофизики СО АН СССР, 1983. – С. 93–99.
9. *Казаков В. И., Кормановский Д. Г.* Влияние геометрических характеристик газораспределительных устройств на гидродинамику вращающегося барботаажного слоя // Процессы переноса в аппаратах энергохимических производств. – Новосибирск: Изд-во Ин-та теплофизики СО АН СССР, 1985. – С. 125–137.
10. *Шляев М. И., Дорохов А. Р.* К расчету скорости вращения центробежно-барботаажного слоя // Теплофизика и аэромеханика. – 1998. – **5**, № 2. – С. 189–194.
11. *Борисов И. И., Халатов А. А.* Трение вращающегося барботаажного потока о торцы вихревой камеры // Там же. – 2004. – **11**, № 2. – С. 329–331.
12. *Былинкин Б. С., Белов С. А., Горшенин П. А.* Основы теории вращающихся тепло- и массообменных барботаажных аппаратов. – Москва: Легпромбытиздат, 1991. – 69 с.
13. *Родионов А. И., Радиковский В. М., Зенков В. В.* Определение коэффициентов тепло- и массоотдачи, отнесенных к поверхности контакта фаз // Процессы химической технологии. Гидродинамика, тепло- и массопередача. – Москва; Ленинград: Наука, 1965. – С. 127–133.
14. *Борисов И. И., Халатов А. А., Шевцов С. В.* О размерах пузырьков в вихревом барботаажном слое // Промышл. теплотехника. – 1996. – **18**, № 1. – С. 81–85.
15. *Борисов И. И., Халатов А. А., Шевцов С. В.* Пылеулавливание в вихревом барботаажном аппарате // Там же. – 1995. – **17**, № 1–3. – С. 21–25.

*Институт технической теплофизики
НАН Украины, Киев*

Поступило в редакцию 06.07.2007