

УДК 66.069.82

БОРИСОВ И.И., ХАЛАТОВ А.А.

Институт технической теплофизики НАН Украины

ЦЕНТРОБЕЖНЫЕ КОНТАКТОРЫ: ОСНОВНЫЕ ТИПЫ И ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ. ОБЗОР

Розглянуто типи контактної тепломасообмінної устаткування, яке базується на принципі обертання газорідкого потоку. Наведено їх основні характеристики, у порівнянні з традиційним обладнанням. Проаналізовано області успішного практичного застосування.

Рассмотрены типы контактного тепло-массообменного оборудования, основанного на принципе вращения газожидкостного потока. Приведены их основные характеристики в сравнении с традиционным оборудованием. Проанализированы области успешного практического применения.

The types of contact heat/mass transfer equipment based on gas-liquid rotating flow are considered. The main characteristics of such equipment in comparison with conventional ones are presented. Areas of successful application are analyzed.

Введение

Использование вращающегося потока для интенсификации процессов в газожидкостных системах — относительно новое направление развития и совершенствования контактного теплообменного оборудования. Как отмечается в работе [1], основными мотивациями для применения интенсификации являются снижение капитальных затрат, повышение безопасности производства, возможность получения продуктов, которые трудно получать традиционными методами, а также улучшение технологических процессов (большой выход продукта, повышение его качества и т.д.).

Среди различных способов интенсификации контактного теплообмена (ТМО) одним из наиболее перспективных является проведение ТМО в поле центробежных сил, что позволяет, наряду со значительным увеличением межфазной поверхности и интенсивности ее обновления и перемешивания, существенно повысить скорость газа без брызгоуноса и нарушения структуры потока. Кроме того, данный метод интенсификации не требует значительного увеличения энергопотребления.

Использование вращающихся газожидкостных потоков позволяет создавать эффективные и компактные контактные аппараты с низкой материалоемкостью, которые могут успешно конкурировать с традиционным оборудованием.

Основные типы центробежных контакторов

К классу центробежных контакторов можно отнести аппараты с вращающимся теплообменным объемом, в которых отсутствует относительное движение фаз во вращательном направлении. Основная составляющая относительной скорости газа направлена по радиусу, при этом газ движется от центра к периферии, а жидкость, в зависимости от типа аппарата, может перемещаться в различных направлениях, т.е. могут быть реализованы различные схемы движения фаз (противоток, прямоток, и перекрестный ток).

Первая разработка устройств подобного класса относится к началу 70-х годов [2], в которой предложен способ барботирования газа через вращающийся слой жидкости. Данный способ был реализован в ротационно-барботажном аппарате (РБА) (рис.1), в котором, за счет интенсивного (число оборотов $n = 1000...4000$ об/мин) вращения перфорированного барабана, на его стенках центробежными силами удерживается слой жидкости, подаваемой в центральную зону, а газ, проходя через отверстия в барабане, барботирует через жидкость и выводится через осевой патрубков. Величина среднего по радиусу центростремительного ускорения в таких аппаратах в десятки и сотни раз превышает гравитационное.

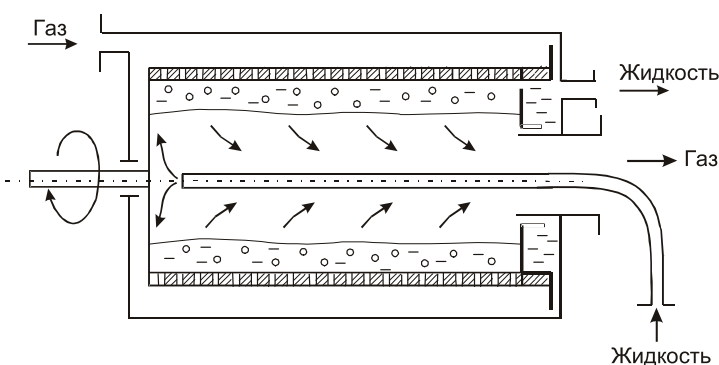


Рис. 1. Ротационно-барботажный аппарат [2].

В сравнении с традиционными контакторами барботажного типа в РБА удалось достичь в несколько раз большей среднерасходной скорости газа без существенного брызгоуноса.

Другой, прежде всего по структуре газожидкостного слоя, разновидностью данного класса аппаратов, является контакт «HIGEE» [3, 4] (рис. 2), в котором в качестве активного объема используется вращающаяся проволочная набивка пористостью около 95% в форме диска с центральным отверстием. Жидкость, подаваемая в центральную зону, за счет вращения диска под действием центробежных сил движется в радиальном направлении. Газ подается в периферийную зону диска и под действием градиента давления движется в противотоке по отношению к жидкости. Предполагалось, что в таком аппарате будет реализован пленочный режим течения и межфазная поверхность не будет значительно отличаться от суммарной площади поверхности проволоки, для которой удельная поверхность, зависящая от диаметра проволоки и пористости набивки, составляет $800...1500 \text{ м}^2/\text{м}^3$. Однако, как показали исследования [4], режим течения в двухфазном объеме далек от пленочного. При частоте вращения диска $n = 300...600 \text{ об/мин}$ жидкость движется в радиальном направлении в виде отдельных «ручейков», а при $n \approx 600...800 \text{ об/мин}$ режим течения меняется на капельный. Даже при очень высоких частотах вращения ($1200...1500 \text{ об/мин}$) нет уверенности в полном смачивании всей поверхности набивки. Поэтому реальная поверхность контакта в таких аппаратах несколько меньше теоретической.

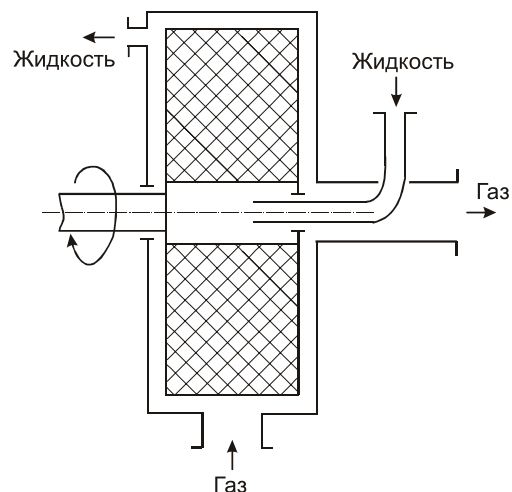


Рис. 2. Контактный аппарат «HIGEE» [3].

Тем не менее, исследования показали, что контакт «HIGEE» обеспечивают высокую эффективность процессов массообмена, поскольку в них достигается средняя скорость газа до 15 м/с , которая является недостижимой для большинства известных видов газожидкостных аппаратов.

Основным недостатком при практическом использовании ротационно-барботажных аппаратов, аппаратов серии «HIGEE», а также любых других устройств с вращающимся корпусом, является необходимость обеспечения герметичности в местах соприкосновения движущихся деталей, механическая ненадежность при длительной эксплуатации и проблемы утечки, особенно при работе с опасными химическими соединениями.

Дальнейшим продолжением развития класса центробежных контакторов явилась разработка вихревых барботажных аппаратов (ВБА) (рис. 3), [5], в которых вращающийся пузырьковый слой формируется внутри стационарной вихревой камеры и приводится в движение за счет энергии газового потока. Газ подается в камеру тангенциально через завихритель, туда же поступает и жидкость. Тангенциально закрученный газ «подхватывает» жидкость и создает около боковой стенки камеры вращающийся слой пузырьковой структуры, ограниченный сверху и снизу кольцевыми торцевыми поверхностями, определяющими также и его толщину. В некоторых случаях применяются расположенные по окружности сливные отверстия, а при движении жидкости

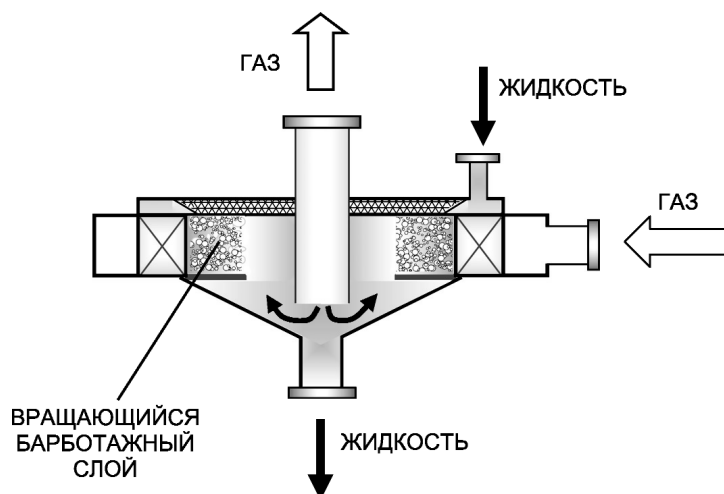


Рис. 3. Вихревой барботажный аппарат [5].

снизу вверх (направление ее движения не имеет существенного значения, поскольку центробежные силы значительно превышают естественную гравитацию) размеры слоя определяются соотношением расходов жидкости и газа. Иногда применяются аппараты без перелива жидкости, с ее однократной загрузкой.

Отличительной особенностью вихревых барботажных аппаратов является возможность работы при высоких (до 5 м/с) среднерасходных скоростях газа, в несколько раз превышающих скорость газа в гравитационных пенных контакторах, при которой наступает нежелательный режим образования струй и брызг. Вращающиеся барботажные потоки сохраняют свою устойчивость в достаточно широком диапазоне расходов жидкости и газа, что дает возможность оперативного управления процессами тепло- и массообмена. Кроме того, благодаря действию центробежных сил, существенно упрощается сепарация фаз после контакта. В вихревых барботажных аппаратах достигается высокая ($1500...2000 \text{ м}^2/\text{м}^3$) удельная межфазная поверхность, в то время как в традиционных аппаратах она не превышает $900...1000 \text{ м}^2/\text{м}^3$.

Вследствие высокой скорости всплытия пузырьков, интенсивной циркуляции газа внутри пузырьков и перемешивания жидкой фазы с интенсивным обновлением поверхности, во вращающихся барботажных потоках достигается более высокий (в 3...5 раз) уровень тепло- и массообмена по сравнению с традиционными барботаж-

ными потоками, причем так же, как и в последних, соблюдается аналогия теплообмена и массообмена в газовой фазе.

Аппараты с вращающимся газожидкостным потоком отличаются малым временем пребывания газовой фазы (несколько миллисекунд) и поэтому предпочтительны для проведения быстропотекающих технологических процессов (абсорбция и десорбция хорошо растворимых газов, быстрые химические реакции, процессы с интенсивным выделением теплоты).

Сходными с вихревыми барботажными аппаратами по способу диспергирования газа в жидкости являются циклонно-пенные аппараты [6]. В таких аппаратах закрученный газ подается с помощью завихрителя в нижнюю часть цилиндрического активного объема и дробится на мелкие пузырьки. Однако в таком устройстве закрутка потока сохраняется лишь вблизи поверхности завихрителя, а в общем объеме она затухает, и реализуется традиционный пенный режим с интенсивным перемешиванием за счет образования вихревых течений в осевом направлении.

Практическое применение центробежных контакторов

Несмотря на препятствия, связанные с продвижением на рынок контактного оборудования с интенсификацией ТМО [1], в последние десять лет стали появляться примеры успешного применения аппаратов с вращающимся газожидкостным потоком при разработке новых технологий и оборудования для химической и фармацевтической промышленности, энергетики (микрореакторы для производства водорода и деаэрации воды, для нефтяных скважин). Определены области, где использование интенсификации процессов (ИП) вращением потока наиболее целесообразно. Прежде всего – это быстропотекающие процессы, поскольку для контактного оборудования с интенсификацией ТМО характерно малое время пребывания газа. Кроме того, использование ИП перспективно в реакторах с интенсивным выделением теплоты, для избирательной абсорбции и десорбции. В настоящее время разработка и исследование новых методов интенсификации находится на стадии интенсивного развития.

Первый известный пример успешного коммерческого использования технологии “HIGEE” был опубликован в 1997 г. Она внедрена в компании “Shengli Oil Field” (Китай), где десорбер высотой 3 м и диаметром 1,5 м заменил вакуумную башню деаэрации воды 30-метровой высоты [7]. Использование реактора “HIGEE” компанией “Dow Chemical” для осуществления процесса извлечения гипохлористой кислоты HOCl из буровых вод на нефтяных скважинах описано в [8]. Перспективным также считается использование технологии “HIGEE” для селективного извлечения сероводорода из натурального газа и из отходящих газов, содержащих CO_2 [9], причем в данном случае повышению эффективности процесса в сравнении с традиционными контакторами способствует малое время пребывания газа. В [10] описана новая технология получения сверхтонких порошков CaCO_3 , SiO_2 , окислов редкоземельных металлов с размерами частиц 15...60 нм, на основе реактора “HIGEE”. В данном процессе, благодаря комбинации интенсивного дробления и микроперемешивания жидкости на молекулярном уровне с малым временем ее пребывания в реакторе, появляется возможность получения порошков с качеством, которого невозможно достичь традиционными методами. Данная технология успешно работает в компании “Shanxi Huaxin Nanomaterials Co., Ltd”, Китай.

Центробежно-барботажные аппараты (ЦБА), благодаря своим высоким теплообменным характеристикам, также имеют достаточно широкие перспективы практического применения. Как показывают результаты ряда работ, они успешно заменяют существующие громоздкие теплообменные колонны. В [11] предлагается использовать ЦБА для очистки газов от хорошо растворимых примесей, извлечения аммиака из газов коксования углей, охлаждения коксового газа, конденсации паров воды и смол, в процессах утилизации газовых продуктов (улавливание хлора, хлористого водорода и др.), для приготовления аммиачного раствора, для производства сульфата аммония сатураторным способом. Перспективным, по мнению авторов работ [12,13], является использование ВБА для получения слабых (0,5...1,0%) растворов азотной кислоты в целях ее дальнейшего использования в качестве удобрений.

В ряде случаев вихревые барботажные аппараты уже нашли практическое применение. В работе [14] они включены в технологическую линию получения формальдегида. В работах [15, 16] ВБА установлен на линии получения формалина для завершения операции хемосорбции метанола и формальдегида с образованием водно-метаноловых растворов формальдегида. Причем в аппарат подавались отходящие газы после абсорбционной колонны, которые до этого выбрасывались в атмосферу.

В [17] опытный образец ВБА был использован как химический реактор для получения полифениленоксида, а именно, абсорбции кислорода из газовой смеси. Вихревой барботажный аппарат также испытывался в процессе получения плавиковой кислоты путем абсорбции фтористого водорода водой [18], причем, поступающий газ содержал осадки в виде частиц элементарной серы.

Перспективно использование ВБА для поглощения твердых и жидких аэрозолей [19], для улавливания летучих органических соединений [20]. Степень поглощения пыли в них достигает 99,5%, причем, в отличие от традиционных пылеуловителей, они выгодно отличаются способностью улавливать более мелкие (субмикронные) частицы.

ВБА также могут найти применение в холодильной технике для передачи теплоты от жидкого теплоносителя к газовому хладагенту.

Выводы

1. Вследствие действия центробежных сил вращающиеся газожидкостные потоки сохраняют устойчивость и имеют незначительный брызгоунос при значительно больших по сравнению с традиционными барботажными потоками среднерасходных скоростях газа.

2. В центробежных теплообменных аппаратах достигается высокая ($1500...2000 \text{ м}^2/\text{м}^3$) удельная межфазная поверхность, в то время как в гравитационных контакторах она не превышает $900...1000 \text{ м}^2/\text{м}^3$. Вследствие высокой скорости газа интенсивного перемешивания и обновления поверхности, в таких устройствах достигается более высокий (в 3...5 раз) уровень теплообмена по сравнению с традиционными барботажными потоками, что определяет

их перспективность для проведения процессов контактного теплообмена, абсорбции, десорбции газов, поглощения аэрозолей. Вихревые барботажные аппараты имеют высокую степень поглощения аэрозолей, достигающую 99,5%, в отличие от традиционных пылеуловителей они выгодно отличаются способностью улавливать более мелкие (субмикронные) частицы.

3. Аппараты с вращающимся газожидкостным потоком отличаются малым временем пребывания газовой фазы (несколько миллисекунд), и поэтому они предпочтительны для проведения быстропротекающих технологических процессов (абсорбция и десорбция хорошо растворимых газов, быстрые химические реакции, процессы с интенсивным выделением теплоты).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Process Intensification – Has Its Time Finally Come?* // Report on Topical Conf. and Workshop prepared by Dr. C. Tsouris and Dr. Joseph V. Porcelli. – New York. – 2003.
2. *А. с. СССР № 462591.* Способ массообмена. Сафонов А.И., Крылов В.С. Бюлл. изобрет. – 1975. – № 9.
3. *Ramshaw C.* HIGEE – An Example of Process Intensification // *Chem. Eng.* – 1983. – Feb. – P. 13–14.
4. *Burns J.R., Ramshaw C.* Process Intensification: Visual Study of Liquid Maldistribution in Rotating Packed Beds // *Chemical Engineering Science.* – 1996. – Vol. 51, – No 8. – P. 1347–1352.
5. *Бурдуков А.П., Гольдштик М.А., Казаков В.И., Ли Т.В.* Тепло- и массоперенос в закрученном барботажном слое // В сб.: “Расчет теплообмена в энергохимических процессах”, Новосибирск: Изд-во Института теплофизики СО АН СССР. – 1981. – С. 37–58.
6. *Богатых С.А.* Циклонно-пенные аппараты. – Ленинград: Машиностроение. – 1978. – 224 с.
7. *Zheng C., Guo K. Et al.* Industrial Practice of HIGRAVITREC in Water Deaeration // *Proceedings of the 2-th Int. Conf. on Process Intensification in Practice, BHP Group Conference Series 28.* – BHP Group. – London. – 1997. – P. 273.
8. *Trent D., Tirtowidjojo D.* Commercial Operation of a Rotating Packed Bed (RPB) and Other Applications of RPB Technology // *Proceedings of the 4th Int. Conf. on Process Intensification for the Chemical Industry.* – Gough M. Ed. – BHP Group Ltd. – Granfield, UK. – 2001. – P.11.
9. *Smelzer S.K., Woodcock K.E., Meyer H.S., Rowler R.* Acid gas Removal Using Higeer TM Absorber // *Proceedings of the AIChE Spring Meeting.* – 1990. – Paper № 90e. – 16 p.
10. *Chen J., Shao L.* Mass Production of Nanoparticles by High Gravity Reactive Precipitation Technology with Low Cost // *China Particuology.* – 2003. – Vol.1, – №2. – P. 64–69.
11. *Сафонов А.И., Рева Э.П., Крылов В.С., Гомонова К.В.* Массоперенос на входном участке вращающегося барботажного слоя // *Теоретические основы химической технологии.* – 1976. – Т.10, – № 4. – С. 495–500.
12. *Бурдуков А.П., Казаков В.И., Кувшинов Г.Г.* Влияние геометрических параметров решеток на скорость вращения барботажного слоя // *Известия СО АН СССР.* – Серия техн. наук. – 1986. – №4. – Вып.1. – С. 32–37.
13. *Дудников Ю.С. и др.* Перспективы малотоннажной плазмохимической технологии производства азотной кислоты в качестве удобрения // *Энерготехнологические процессы и аппараты химических производств.* – Новосибирск. – 1989. – С. 106–112.
14. *А.с. 1001986 СССР.* Вихревой аппарат для обработки газов. Кирный Л.Г., Хохлов Л.А., Бюлл. изобр. – 1983. – №9.
15. *Кроковный П.М., Дудченко В.К., Грицан В.И.* Использование центробежно-барботажного аппарата в процессах получения формальдегида // *Процессы переноса в аппаратах энергохимических производств.* – Новосибирск. – 1985. – С. 88–93.
16. *А.с. 1445743 СССР.* Теплообменный аппарат. Дорохов А.Р. и др. Бюлл. изобр. – 1988. – № 47.
17. *А.с. 1058110 СССР.* Теплообменный аппарат. Гольдштик М.А. и др. – 1982.
18. *А.с. 1550675 СССР.* Вихревой барботажный аппарат для обработки загрязненных газов. Смирнов Н.П. и др. – 1987.
19. *Борисов И.И., Халатов А.А., Шевцов С.В.* Пылеулавливание в вихревом барботажном ап-