

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ГАЗОЖИДКОСТНЫХ МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ПИЩЕВЫХ И ПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ ПРОИЗВОДСТВ

Сухенко Ю.Г., д.т.н., Сухенко В.Ю., к.т.н.,

*(Національний університет біоресурсів і природокористування
України)*

Тищенко Г.П., д.т.н.

(Український державний хіміко-технологічний університет)

Приведена классификация газожидкостных аппаратов, которые обеспечивают колебательный режим взаимодействия фаз в процессе массообмена. Предложены способы и аппараты для интенсификации процессов сатурации при производстве безалкогольных напитков.

Постановка задачи. Газожидкостные массообменные аппараты применяются в перерабатывающей и пищевой промышленности при производстве белка, сахара, пивобезалкогольной продукции, минеральных вод, спирта и т.д. Их конструкции весьма разнообразны [1...6].

Многочисленными исследованиями установлено, что наиболее перспективным способом интенсификации газожидкостных массообменных процессов является создание колебательных режимов взаимодействия фаз [1,4,6]. Систематизация конструкций таких аппаратов и сведения об их работоспособности в литературе практически отсутствуют.

Цель работы. Классификация и изучение особенностей конструкций и на этой основе создание эффективного массообменного аппарата.

Результаты исследований. В основу классификации (табл. 1) положен способ создания – вынужденных колебаний и автоколебаний. Вынужденные колебания генерируются, в основном, за счёт использования внешней энергии и широко используются для интенсификации процессов в газожидкостных аппаратах, например, вибрационных. Автоколебательные процессы характерны для аппаратов с клапанными контактными устройствами. Основным их преимуществом, по сравнению с аппаратами, использующими

вынужденные колебания, считается существенное упрощение конструкций.

Таблица 1

Классификация газожидкостных аппаратов с колебательными режимами взаимодействия фаз

Классификационные признаки	Способ организации колебаний	Вынужденные колебания				Автоколебания		
	Изменяемые параметры	Температура	Давление	Скорость	Концентрация	Плотность	Напряженность электрического поля	Напряженность магнитного поля
	Частоты колебаний	Циклические		Низко-частотные	Высоко-частотные	Импульсивные		
	Масштаб уровня воздействия	Молекулярный	Контактное устройство		Контактная ступень	Аппарат	Химико-технологическая система	
	Объект воздействия	Газ			Жидкость		Наполнитель	

Колебательные процессы в газожидкостной среде могут изменять следующие параметры: температуру, давление,

концентрацию, напряженности электрического и магнитного полей. В зависимости от периода и частоты различают колебания циклические, низкочастотные, высокочастотные (акустические, ультразвуковые) и импульсные. По масштабу уровня воздействия колебания возможно осуществить на молекулярном уровне, на контактном устройстве, на контактной ступени, в аппарате, в технологической системе. В колебательных процессах в качестве объектов воздействия используют газ, жидкость, наполнитель. Наполнителем может служить, например, вибрирующая насадка, с помощью которой создаются колебания в газожидкостной среде [3,6].

Известно, что наиболее интенсивное взаимодействие фаз происходит при резонансных колебаниях, когда частота вынужденных колебаний совпадает с частотой собственных колебаний системы. Поэтому целесообразно изучение акустических откликов систем, так как расход энергии на поддержание резонансных колебательных режимов уменьшается в несколько раз [1,3].

Наиболее распространенные клапанные барботажные контактные устройства, в которых клапаны при барботаже газа генерируют колебания с частотой порядка $5 \dots 20 \text{ с}^{-1}$. Установлено, что колебания клапанов незначительно интенсифицируют процесс. Перспективными оказались новые конструкции клапанных контактных устройств с пониженным гидравлическим сопротивлением. К их достоинствам можно отнести широкий диапазон устойчивой работы, относительно высокую производительность и низкую стоимость, а к недостаткам – возможность зависания клапанов в верхнем положении, после чего колебания практически прекращаются [6].

Нами предложен аппарат, в котором вынужденные высокочастотные колебания создаются на уровне контактной ступени. Колебания в газовом потоке генерируются поочередным перекрыванием вращающимся перфорированным диском сопел, которые установлены в горизонтальной неподвижной тарелке с центральным переливным патрубком. Центробежные лопатки на перфорированном диске не позволяют газу проходить через центральную часть аппарата, способствуют засасыванию жидкости с верхней контактной ступени и противостоят разбрызгиванию ее на нижней. Известно, что в центробежных аппаратах объемный коэффициент массопередачи и их эффективность значительно выше,

чем в скрубберах или тарельчатых колоннах. В предлагаемом аппарате, наряду с улучшением сепарации фаз, массообменный процесс дополнительно интенсифицируется за счёт высокочастотных колебаний [5...7].

Для создания вынужденных колебаний и автоколебаний известно много методов превращения энергии электрического и магнитного полей, химической, тепловой, механической и энергии потока в энергию колебаний контактирующих фаз [3].

Несмотря на то, что вынужденные колебания позволяют существенно интенсифицировать процесс массообмена, использование высокочастотной аппаратуры пока еще не эффективно вследствие ее сложности и энергоёмкости. Для широкого промышленного внедрения наиболее перспективны аппараты с акустическими контактными статическими устройствами, которые долговечны в работе и не требуют подвода к ним дополнительной энергии для создания колебаний. Подобным требованиям удовлетворяют контактные устройства с кольцевой резонирующей полостью [2,3,5].

Резонирующие полости имеются в большинстве разновидностей акустических излучателей. На (рис.1) показаны основные типы акустических излучателей. Генераторы Гартмана и Гальтона, мембранный, пластинчатый и стержневой излучатели работают при высоких перепадах давления.

Такие излучатели невозможно использовать в барботажных колоннах, так как в большинстве из них перепад давления на контактной ступени рабочего газа не может превышать десятка миллиметров водяного столба. Генераторы Гальтона могут работать при избыточном давлении газа 0,003...0,04 МПа. Наиболее перспективными конструкциями являются вихревые и резонирующие излучатели. Вихревыми излучателями достигается интенсивность силы звука до 1 Вт/м². Частота их излучения равна [6]:

$$f = \frac{\alpha \cdot c}{\pi \cdot D} \sqrt{\frac{P_1 - P_2}{P_2}}, \quad (1)$$

где α - коэффициент; D - диаметр камеры; P_1 и P_2 - соответственно, давление на входе и выходе излучателя; c - скорость звука.

Излучатели с резонирующей полостью могут работать при перепадах давления менее 10⁴ Па. Для получения большей мощности излучения необходимо увеличивать расход газа через излучатель. При одинаковой частоте генерации, обеспечиваемой строго

фиксированными параметрами настройки, акустическая мощность не зависит от материала резонатора.

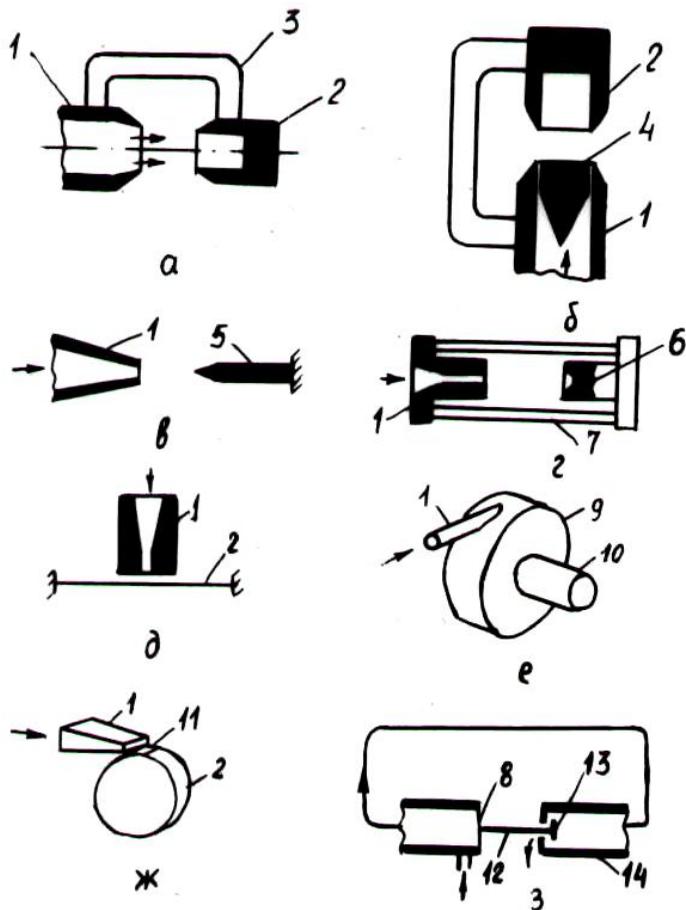


Рис. 1. Типы акустических излучателей: а – генератор Гартмана; б – генератор Гальтона; в – пластинчатый излучатель; г – стержневой излучатель; д – мембранный излучатель; е – вихревой излучатель; ж – резонирующий излучатель; 1 – сопло; 2 – резонатор; 3 – скоба; 4 – вкладыш; 6 – отражатель; 7 – резонирующие стержни; 8 – мембрана; 9 – вихревая камера; 10 – вихревая труба; 11 – щель; 12 – шток; 13 – клапан; 14 – труба.

Исследования показали, что максимальную интенсивность автоколебаний создают резонирующие полости в виде кольцевой камеры с центральным отверстием (рис. 2). Причём сила звука увеличивается примерно в 3 раза при наличии фасок на краях отверстий. Наибольшая интенсивность колебаний была достигнута при следующем соотношении размеров :

$$d_n = d_g; \quad h_y = 0,5 \cdot d_g; \quad D_p = 3 \cdot d_g \quad (2)$$

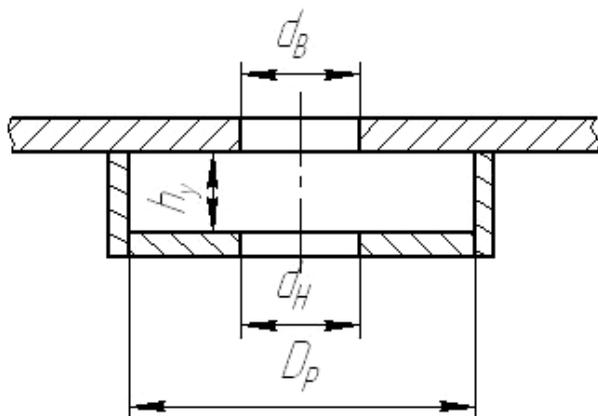


Рис. 2. Продольный разрез акустического излучателя

Было обнаружено явление уменьшения гидравлического сопротивления прохождению газа через отверстие соизмеримое с кольцевой резонирующей полостью. Уменьшение коэффициента гидравлического сопротивления при прохождении газа через акустический излучатель, вероятно, можно объяснить существенным изменением давления в направлении, нормальном к оси течения потока газа. Периодическое изменение нормального давления в пограничном осцилирующем сдвиговом слое вызывает локальное изменение вектора скорости. В результате направление движения пограничного слоя не совпадает с направлением движения пространственной цепочки вихрей. В работах [1...3,6] показано, что шахматное расположение вихрей устойчиво для широкого класса возмущений. Локальное изменение вектора скорости потока нарушает порядок расположения вихрей по отношению к направлению движения основного потока, что, по-видимому, нарушает их устойчивость, способствующую прекращению их роста и, соответственно, уменьшению затрат энергии на вихреобразование.

Частоту автоколебаний акустического излучателя с кольцевой резонирующей полостью (см. рис. 2) можно определить из уравнения:

$$f_n = n / \left[h_y / W + \sqrt{(D_p - d_b)^2 + h_y^2 / c} \right], \quad (3)$$

где n - гармоника колебаний, W - скорость газа в отверстии; c - скорость звука.

Расход энергии газа на создание автоколебаний газового потока не оказывает существенного влияния на гидравлическое сопротивление клапанных тарелок. При скорости газа по колонне менее 0,3 м/с автоколебания увеличивают газосодержание на клапанных тарелках. Создание автоколебаний газового потока в месте входа газа в жидкость способствует увеличению объемного коэффициента массоотдачи труднорастворимого газа в 1,2-1,6 раза [3,4,5].

На пищевых предприятиях для осуществления газожидкостных теплообменных процессов используют аппараты с регулярными и нерегулярными насадками. В абсорбционных и ректификационных колоннах целесообразно применять насадку из просечно-вытяжных элементов, которая конкурирует с насадкой "Скрейпак" [4,5].

Для турбулизации фаз на поверхности насадки следует выполнять выступы размером 1-3 мм. В этом случае эффективность процесса существенно возрастает. С помощью насадки можно создать в газовом потоке акустические колебания, так как насадка представляет собой акустический резонатор в виде стакана с отверстиями в днище [5,6].

Газожидкостные аппараты широко применяются в пивобезалкогольной отрасли. Например, насыщение безалкогольных напитков и минеральных вод диоксидом углерода проводится в специальных аппаратах - сатураторах. Известно большое количество разнообразных конструкций сатураторов Е6-АССМ, Р3 - ВС, ВСБ, Б2-ВРР/6 и др. Технологические схемы этих аппаратов отличаются незначительно. В основу известных схем положены два процесса деаэрация и абсорбция. Для деаэрации воды используется деаэрационная колонка, в которой или создается вакуум или прокачивается вода вместе с углекислотно-воздушной смесью. Турбулизация газожидкостной смеси в деаэраторе невысока, поэтому процесс деаэрации проходит неэффективно.

Степень насыщения воды диоксидом углерода зависит от температуры воды и давления, времени насыщения и поверхности контакта фаз, наличия воздуха в диоксиде углерода и воде. Для упрощения конструкции сатуратора и интенсификации процесса, с одновременным улучшением качества готового продукта, авторами предложена схема совмещения процесса абсорбции диоксида углерода и десорбции воздуха. Для интенсификации массообменного газожидкостного процесса на прямооточном участке зоны контакта фаз в аппарате создавались акустические колебания и зоны интенсивного вихреобразования, которые способствовали перемешиванию и выравниванию концентрации газа в объеме.

Сатурационная установка (рис. 3) состоит из колонны насыщения 1 и газожидкостного эжектора 2. Внутри колонны 1 расположена центральная труба 3 с акустическими контактными устройствами (АКУ) 4. АКУ выполнены в виде двух перфорированных дисков с соосными отверстиями.

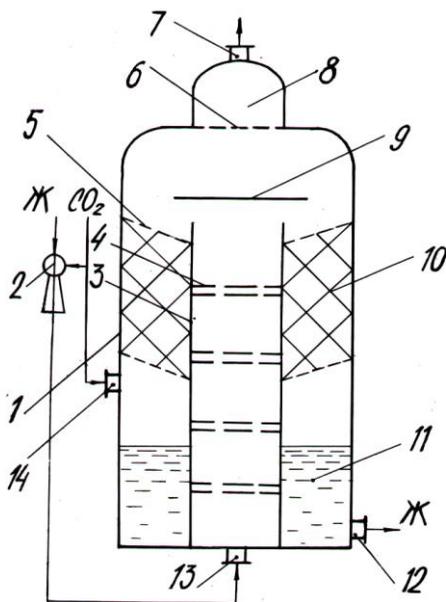


Рис. 3. Сатурационная установка

Расстояние между дисками равно диаметру отверстий, а расстояние между АКУ в трубе равнялось 15 диаметрам отверстий.

Между трубой 3 и корпусом 1 располагались два ряда сеток 5. Верхнюю часть колонны выполнили в виде перфорированного диска 6, над которым расположен патрубок 7 с колпаком 8. Над трубой 3 поместили отражатель 9. Между рядами сеток 5 располагалась насадка 10, выполненная в виде колец Рашига. В нижней части колонны расположен сборник 11 для воды. Патрубки 12, 13, 14 предназначены для ввода и вывода контактирующих фаз.

В отличие от известной конструкции сатуратора АСК в эжектор 2 сатуратора с АКУ подавался диоксид углерода без воздуха. Газожидкостная смесь в эжекторе интенсивно перемешивалась и через патрубок 13 подавалась в трубу 3. При прохождении газожидкостной смеси через АКУ в потоке возбуждались акустические колебания, способствующие интенсификации массообменного процесса. В пространстве между АКУ газожидкостная смесь интенсивно перемешивалась. По пути от эжектора 2 до выхода из трубы 3 происходило интенсивное перемешивание потока, что способствовало интенсивной десорбции воздуха из воды и абсорбции диоксида углерода. После удара газожидкостного потока об отражатель 9 происходила сепарация фаз. Жидкость сливалась вниз по насадке 10. Диоксид углерода подавался в аппарат через патрубок 14 и в противотоке с жидкостью, поднимался вверх. Таким образом, жидкость, стекающая с насадки в сборник 11, насыщалась диоксидом углерода до состояния близкого к равновесному и выходила из аппарата через патрубок 12. Воздух, десорбированный из воды, поднимался вверх и через диск 6 и колпак 8 уходил в атмосферу. При подаче в эжектор диоксида углерода без воздуха на выходе из трубы в газожидкостном потоке вследствие десорбции появляется воздух. В связи с тем, что в поступающей воде концентрация воздуха не превышает 30 г/м^3 , то максимальное парциальное давление воздуха в газовой фазе не превышает 2000 Па, что в 25 раз меньше, чем достигаемое парциальное давление в деаэраторах с вакуумом. Полная десорбция воздуха происходит при стекании жидкости по насадке, когда она в нижней части соприкасается только с диоксидом углерода.

Существенная интенсификация совмещенного абсорбционного и десорбционного процесса достигается в трубе 1 при прямоточном взаимодействии фаз с наложением акустических колебаний. При этом увеличивается турбулизация фаз, и, соответственно, диссипация энергии, что способствует улучшению массообменного процесса.

Испытания сатуратора с АКУ и сатуратора АСК проведены на

Днепропетровском пивобезалкогольном комбинате "Днепр". Сравнительные характеристики приведены в табл. 2. Обеспечение подачи диоксида углерода без воздуха в эжектор и далее в АКУ способствует интенсификации массообменного процесса. Применение сатураторов с АКУ увеличивает их производительность примерно в два раза, степень насыщенности безалкогольных напитков диоксидом углерода на ~12%, уменьшает габаритные размеры почти в два раза, а массу - в четыре. Кроме того, значительно повышается надежность аппаратов, уменьшается шум, упрощается обслуживание.

Таблица 2
Сравнительная характеристика сатураторов АСК и АКУ

№ п/п	Наименование показателей	Единица измерения	Показатели сатуратора АСК	Показатели сатуратора АКУ
1	Производительность	м ³ /ч	3	6
2	Масса установки	кг	1132	280
3	Степень насыщенности воды диоксидом углерода	%	88	99
4	Стоимость сатуратора	грн	1740	430

Сравнение известных сатурационных установок с разработанной (табл. 3) по удельному расходу электроэнергии, удельной стоимости и удельной массе показывает полное преимущество новой конструкции.

Таблица 3
Сравнительные характеристики сатурационных установок

Характеристика	Единицы измерения	Сатурационные установки					
		с АКУ	АСК	Б2-ВРР/6	ВСБ	РЗВС В-3	Е6-АС СМ
Удельный расход электроэнергии	кВт/(м ³ ·ч)	0,2	0,57	1,4	6	3,1	1,4
Удельная стоимость	грн./((м ³ ·ч)	71	580	1000	6300	1060	610
Удельная масса	кг/(м ³ ·ч)	47	37,5	210	670	-	500

В табл. 3 приведены основные характеристики используемых сатурационных установок.

Выводы. Анализируя результаты аналитических исследований

данные таблиц 2 и 3 можно сделать вывод, что наиболее перспективной конструкцией является сатуратор с АКУ. Он более производительный, менее материало- и энергоемкий и имеет меньшую стоимость. Поэтому такие сатурационные аппараты следует внедрять на пищевых и перерабатывающих предприятиях АПК.

Список литературы

1. Кафаров В.В. Основы массопередачи. – М.: Высшая шк., 1979. – 439 с.
2. Рамм В.М. Абсорбция газов. – М.: Химия, т1976. – 655 с.
3. Романков П.Г., Фролов В.Ф. Массообменные процессы химической технологии. – Л.: Химия, 1990. 384 с.
4. Стабников В.Н. Расчет и конструирование контактных устройств ректификационных и абсорбционных аппаратов. – К.: Техника, 1970. – 207 с.
5. Процеси і апарати харчових виробництв: Підручник/ За ред. проф. І.Ф. Малежика. – К.: НУХТ, 2003 – 400 с.
6. Интенсификация процессов и защита оборудования пищевых производств / Г.П. Тищенко, Н.Д. Хоменко, В.Ю. Сухенко и др. // Под ред. Ю.Г. Сухенко. – К.: «ДІА», 2006. – 224 с.
7. Ультразвук. - М.: Советская энциклопедия, 1979. - 232 с.

ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ГАЗОРІДНИХ МАСООБМІННИХ ПРОЦЕСІВ ХАРЧОВИХ І ПЕРЕРОБНИХ ВИРОБНИЦТВ

Приведена класифікація газорідних апаратів, які забезпечують коливальний режим взаємодії фаз в процесі масообміну. Запропоновані способи і апарати для інтенсифікації процесів сатурації при виробництві безалкогольних напоїв.

INTENSIFICATION of GAS-LIQUID OF MASS EXCHANGE PROCESSES of FOOD AND PROCESSING PRODUCTIONS

Classification of gas liquid vehicles which provide the swaying mode of co-operation of phases in the process of mass exchange is resulted. Methods and vehicles are offered for intensification of processes of saturation at the production of soft drinks.