

## РАЗРАБОТКА МЕТОДА ДИСПЕРГИРОВАНИЯ ГАЗА С ПОМОЩЬЮ ТУРБУЛЕНТНОГО ПОТОКА ЖИДКОСТИ НА ГРАНИЦЕ ПОРИСТОЙ СТЕНКИ

**Введение.** В процессах обработки природных и сточных вод, а также в различных отраслях промышленности и сельского хозяйства часто возникает необходимость получения мелких газовых дисперсий (средний диаметр пузырьков менее 1 мм) с целью достижения большой межфазной поверхности. Примерами являются: процесс флотационной очистки воды; введение озонсодержащих газовых смесей в водные системы; растворение кислорода в окситенках и в промышленном рыбоводстве; процесс пенной сепарации на горно-обогатительных предприятиях и т. д. Известны многочисленные исследования и разработки в данной области [1, 2], однако задача получения мелких газовых дисперсий до настоящего времени решена не полностью, поэтому проведение исследований на данную тему не теряет своей актуальности [2].

На практике широко применяются следующие методы получения диспергированной газовой фазы (ДГФ):

1. Пневматический (барботирование) — подача газа через затопленные пористые перегородки;
2. Механический — диспергирование газа мешалками различных конструкций;
3. Гидравлический — использование эжектирующего и диспергирующего действия струй жидкости;
4. Физико-химический — газирование жидкости за счёт выделения газа из пересыщенного раствора при изменении его растворимости, а также при протекании химической или электрохимической реакции.

Некоторые авторы также выделяют комбинированные методы — пневмомеханический и пневмогидравлический [1, 3].

Из вышеперечисленных механический метод является самым энергозатратным, поскольку в данном процессе основная доля энергии тратится не на диспергирование газовой фазы, а на преодоление сил гидравлического сопротивления и приведение жидкости в движение. Обычно только 0,2...2% от общих затрат энергии расходуется на дробление пузырьков газа [4]. Также получение мелких пузырьков газа механическим диспергированием осложнено одновременным протеканием процесса их коалесценции (укрупнения), при этом устанавливается некоторый средний диаметр пузырьков, соответствующий гидродинамической обстановке в системе. Обычно средний диаметр пузырьков при механическом диспергировании составляет 3...4 мм [1, 4], для получения более мелких пузырьков необходимо в газо-жидкостную систему добавлять ПАВ, что часто неприемлемо.

Гидравлический метод диспергирования основан на эжекционном захвате газовой фазы поверхностью струй жидкости. К разновидностям данного метода относятся аэрирование эжекторами, циклонами и поверхностными струями. Эжекторные устройства имеют более высокую энергетическую эффектив-

ность по сравнению с механическими диспергаторами и позволяют получать более мелкие пузырьки газа, однако и с их помощью не удастся получить средний диаметр пузырьков менее 1 мм без использования ПАВ. Циклонные аэраторы позволяют получать тонкие водовоздушные эмульсии при больших давлениях и расходах жидкости и небольших расходах газа, но удельные затраты энергии на диспергирование газа при таких режимах высокие, а диапазон давлений и расходов устойчивой работы — узкий, поэтому данные устройства в практике водоочистки не нашли широкого применения. Диспергирование поверхностными струями почти в два раза эффективнее по затратам энергии по сравнению с механическим диспергированием [1], но больше пригодно для введения в жидкость атмосферного воздуха, а не каких-либо специальных газов — озона, кислорода и т. д. Средний диаметр пузырьков при струйном диспергировании под углом 30...60° к свободной поверхности и скорости струи 10...20 м/с составляет 1 мм, но при этом наблюдается большая полидисперсность образующихся пузырьков — от 0,2 до 3,5 мм.

Газирование жидкости за счет выделения газа из пересыщенного раствора при протекании химической или электрохимической реакции не позволяет диспергировать требуемый газ, поскольку состав газов при протекании химических реакций целиком определяется взаимодействующими реагентами, а при электрохимических — практически всегда на катоде выделяется водород, а на аноде — кислород. Другие газы при электрохимических реакциях в водных растворах в обычных условиях почти не образуются. Однако для целей флотации электрохимический способ получения мелкой газовой дисперсии дает хороший эффект, поскольку позволяет получать наименьший средний диаметр газовых пузырьков — 0,04...0,2 мм, хотя и с высокими затратами энергии [1].

Газирование жидкости за счет выделения газа из пересыщенного раствора при изменении его растворимости основано на использовании повышенного давления или вакуума для создания пересыщенного раствора. Жидкость насыщают диспергируемым газом при атмосферном или повышенном (0,3...0,6 МПа) давлении, выделение газа происходит при вакуумировании жидкости (вакуумный метод), или при сбросе давления до атмосферного (напорный метод). При выделении газа из пересыщенного раствора образуются очень мелкие пузырьки (средний диаметр 0,1...0,5 мм), причём они формируются непосредственно на поверхности гидрофобных частиц, что обеспечивает высокую эффективность использования данного метода при флотации. Недостатками метода является сложное аппаратное оформление, повышенные затраты энер-

гии, ограниченная степень газирования (зависит от растворимости газа при рабочем давлении, для воздуха в воде – около 30...50 л воздуха в 1 м<sup>3</sup> воды в интервале 0,3...0,5 МПа).

Наибольшей энергетической эффективностью из всех методов получения газо-жидкостных дисперсий обладает пневматический (барботажный) метод. Он заключается в пропускании газа через затопленные перфорированные или пористые элементы — барботеры, расположенные, как правило, у дна резервуара. Большим преимуществом данного метода является отсутствие движущихся частей, простая конструкция сооружений, невысокое требуемое давление газа (0,05...0,15 МПа), возможность работы в широком диапазоне удельного расхода газа [2]. Основными недостатками пневматического диспергирования газа является возможность забивания пор и отверстий барботеров механическими загрязнениями (при газировании загрязненных вод) и крупный средний диаметр пузырьков (2...3 мм) при их высокой полидисперсности. Причём, уменьшение диаметра отверстий или пор диспергатора не приводит к заметному снижению среднего диаметра пузырьков газа. Данная закономерность обусловлена балансом сил при формировании пузырьков газа.

Рассмотрим схему сил, действующих на пузырёк газа в момент отрыва от отверстия барботера, представленную на рисунке 1.

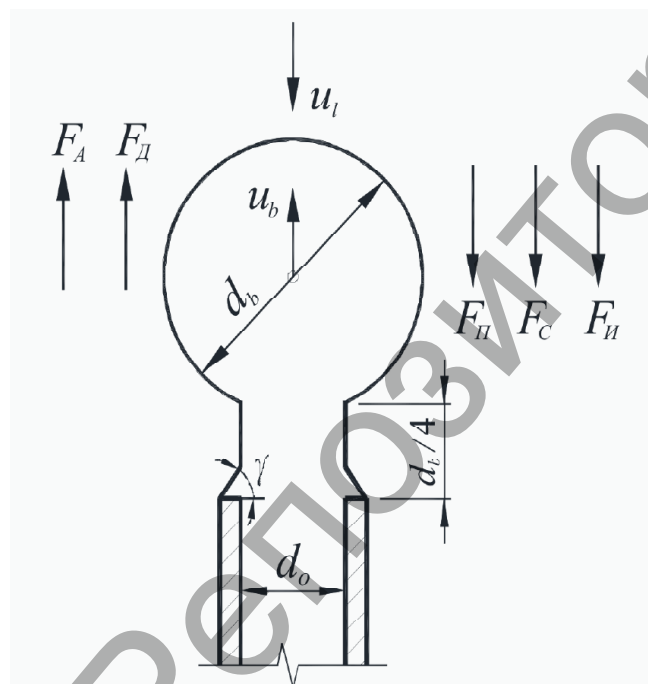


Рисунок 1. Схема образования пузырька газа при выходе из единичной поры в покоящейся жидкости

К данным силам относятся: сила Архимеда ( $F_A$ ); сила избыточного давления газа и его импульса ( $F_D$ ); сила поверхностного натяжения ( $F_П$ ); сила сопротивления ( $F_C$ ); инерционная сила ( $F_И$ ).

Условие баланса сил имеет вид:

$$F_A + F_D = F_П + F_C + F_И.$$

Отдельные силы, входящие в данное уравнение, определяются по формулам:

$$F_A = \frac{\pi \cdot d_b^3 \cdot (\rho_l - \rho_g) \cdot g}{6};$$

$$F_D = \frac{\pi \cdot d_o^2 \cdot (P_g - P_l)}{4} + \frac{4 \cdot Q_{go}^2 \cdot \rho_g}{\pi \cdot d_o};$$

$$F_П = \pi \cdot d_o \cdot \sigma \cdot \sin \gamma;$$

$$F_И = \frac{\left( \frac{99 \cdot \rho_l}{32 \cdot \pi} + \frac{9 \cdot \rho_g}{2 \cdot \pi} \right) \cdot Q_{go}^2}{d_b^2},$$

где  $d_b$  — диаметр пузырька газа в момент отрыва;  $\rho_l$  — плотность жидкости;  $\rho_g$  — плотность газа;  $d_o$  — диаметр отверстия;  $P_g, P_l$  — давление газа и жидкости на уровне барботера;  $Q_{go}$  — расход газа через отверстие;  $\sigma$  — поверхностное натяжение на границе раздела газ-жидкость;  $\gamma$  — угол наклона границы раздела газ-жидкость к горизонту, обычно принимают  $\sin \gamma = 1$ ;  $\zeta$  — коэффициент гидродинамического сопротивления, определяют из соотношения:  $\zeta = Re^{-1} + 1$ ;  $u_b$  — скорость подъема центра массы пузырька в момент отрыва;  $u_l$  — скорость движения жидкости вблизи пузырька,  $u_l > 0$  соответствует противотоку.

В момент отрыва пузырек имеет сферическую форму и связан с отверстием цилиндрической газовой перемычкой, длина которой близка к  $d_b / 4$ . В этом случае средняя скорость в момент отрыва пузырька равна:

$$u_b = \frac{9 \cdot Q_{go}}{2 \cdot \pi \cdot d_b^2}.$$

В случае барботажа в непроточном режиме ( $u_l = 0$ ) получим:

$$F_C = \frac{27 \cdot \mu \cdot Q_{go}}{2 \cdot d_b} + \frac{81 \cdot \rho_l \cdot Q_{go}^2}{32 \cdot \pi \cdot d_b^2},$$

где  $\mu$  — динамическая вязкость жидкости.

При подстановке выражений для всех сил в уравнение баланса, упрощения, и выражения  $d_b$  получим уравнение пятой степени:

$$d_b^3 = S + L \cdot d_b^{-1} + T \cdot d_b^{-2}.$$

Если выполняется условие  $p_l \gg p_g$ , то:

$$S = \frac{6 \cdot d_o \cdot \sigma}{\rho_l \cdot g}; \quad L = \frac{81 \cdot \nu \cdot Q_{go}}{\pi \cdot g}; \quad T = \frac{135 \cdot Q_{go}}{4 \cdot \pi^2 \cdot g}.$$

Решение уравнения относительно  $d_b$  итерационным методом с погрешностью несколько процентов позволяет получить выражение:

$$d_b = \left( S^{4/3} + L + T^{4/5} \right)^{1/4}.$$

При барботаже с малым расходом ( $Q_{go} \rightarrow 0$ ) в непроточной и не вязкой жидкости окончательно получим:

$$d_b = S^{1/3} = \left( \frac{6 \cdot d_o \cdot \sigma}{\rho_l \cdot g} \right)^{1/3}.$$

Из полученного выражения для определения минимального диаметра пузырька в момент отрыва от отверстия следует, что при малых расходах газа диаметр пузырьков мало зависит от диаметра отверстий, а при увеличении расхода такая зависимость практически не наблюдается.

Так, при уменьшении размера отверстий в 5 раз средний начальный диаметр пузырьков изменится менее чем в 1,8 раза, а их размер в объеме барботажной камеры вследствие коалесценции останется практически неизменным.

Коалесценция пузырьков при их росте в соседних отверстиях определяется параметром:

$$N = \frac{We_o}{\sqrt{Fr_o}},$$

где  $We_o = \frac{We \cdot \rho_l}{\rho_g}$ ;  $Fr_o = \frac{u_o^2}{g \cdot d_o}$ ;  $We$  – число Вебера;  $u_o$  – скорость газа в отверстии.

Экспериментальные исследования показывают, что при  $d_o = 1,5 \dots 3$  мм и  $p/d_o = 1,35 \dots 2,37$  ( $p$  – расстояние между соседними отверстиями) коалесценция наблюдается при  $N > 2$  [2].

Как показывает выполненный обзор методов диспергирования газа, наиболее мелкие газовые пузырьки получаются при их образовании из пересыщенных газовых растворов (напорный и электрохимический методы получения ДГФ), но и затраты на диспергирование с помощью данных методов также наиболее высокие. Пневматический (барботажный) метод по затратам энергии является наиболее экономичным и простым в исполнении, но не позволяет получить тонкую газовую дисперсию. Во многих исследованиях и разработках с целью получения более мелких пузырьков пневматический метод дополняют механическим или гидродинамическим диспергированием, при этом данные комбинированные методы получили название пневмомеханический и пневмогидравлический [1, 3]. Более предпочтительным является пневмогидравлический метод, так как имеет более низкие затраты энергии на диспергирование и более высокую надежность вследствие отсутствия движущихся частей.

Экспериментальные разработки и результаты. На практике для осуществления пневмогидравлического метода обычно применяют диспергаторы эжекторного типа с дополнительными распылительными элементами [1]. В данных устройствах эжектируемая газовая фаза на выходе под большим напором дополнительно диспергируется при прохождении газо-жидкостного потока с большой скоростью через перфорированные или пористые стенки — рисунок 2.



Рисунок 2. Пневмогидравлический диспергатор газа «Апатит»

Недостатком такого метода является большое гидравлическое сопротивление диспергатора, абразивный износ перегородки, сравнительно крупный средний размер пузырьков (1...2 мм).

На кафедре ВВиОВР Брестского государственного технического университета предложен пневмогидравлический метод диспергирования газа высокотурбулентным потоком жидкости в пористой трубе. Данный метод разрабатывается для получения мелких газовых дисперсий (диаметры пузырьков 10...100 мкм), необходимых в процессах флотации, озонирования, обескислороживания. В отличие от вышерассмотренных методов получения мелких газовых дисперсий, разрабатываемый метод не требует использования громоздкого и сложного оборудования, позволяет диспергировать газы любого состава с высоким удельным расходом, имеет сравнительно невысокую энергозатратность [5].

Принцип данного метода диспергирования поясняется на рисунке 3.

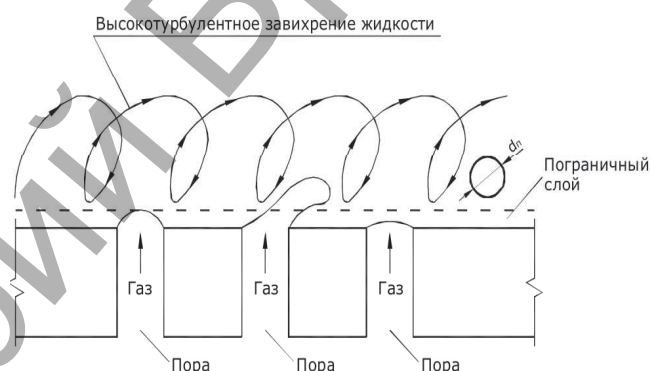
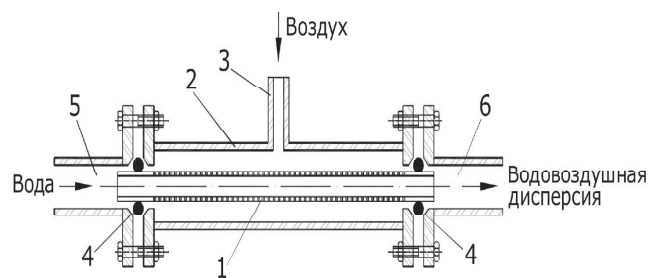


Рисунок 3. Схема образования пузырька газа при выходе из единичной поры в быстро движущейся жидкости

На условия отрыва пузырька в потоке быстро движущейся жидкости в основном влияет толщина пограничного слоя (определяемая числом Рейнольдса), диаметр пор, структура поверхности пористого материала и скорость движения газа на выходе из пор. Для оценки влияния данных факторов на процесс диспергирования газа было изготовлено экспериментальное устройство, конструкция которого приведена на рисунке 4.



1 – пористая трубка; 2 – корпус с фланцами; 3 – патрубок подачи воздуха; 4 – уплотнитель; 5 – патрубок подачи воды; 6 – патрубок отвода водовоздушной дисперсии

Рисунок 4. Пневмогидравлический диспергатор газа «Торнадо»

Диспергатор «Торнадо» представляет собой мелкопористую трубку, расположенную в металлическом корпусе с фланцами. На концах пористой трубки между фланцами корпуса имеется уплотнение, поэтому контакт жидкости и газа осуществляется только через стенку пористой трубки. В пространство между наружной поверхностью пористой трубки и металлическим корпусом подается газ с помощью патрубка подачи газа.

На основе данного диспергатора были выполнены экспериментальные исследования зависимости минимального диаметра образующихся пузырьков воздуха от скорости движения воды в пористой трубке, данные которых представлены на рисунке 5.

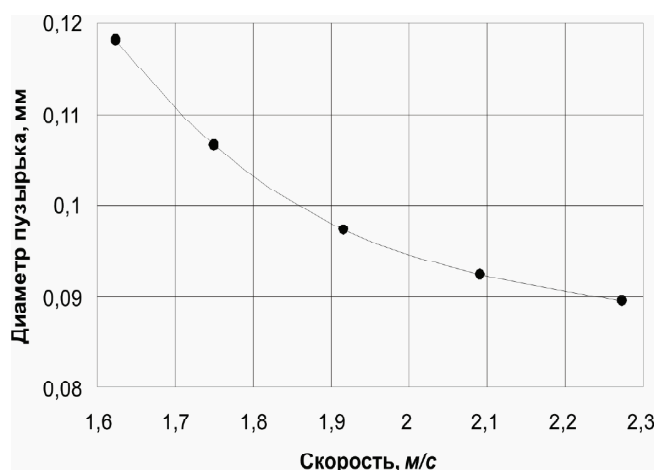


Рисунок 5. Зависимость минимального диаметра получаемых пузырьков воздуха от скорости движения воды в диспергаторе «Торнадо»



Рисунок 6. Пневмогидравлический диспергатор газа «Торнадо-2»

Данные, представленные на рисунке 5, показывают, что с увеличением скорости движения воды в пневмогидравлическом диспергаторе минимальный диаметр образующихся пузырьков уменьшается. Полученная зависимость подтверждает теоретические предположения получения мелкой газовой дисперсии высокотурбулентным потоком жидкости в пористой трубке. Более высокие скорости движения жидкости не были исследованы по техническим причинам. В настоящее время планируется проведение дальнейших исследований данного метода диспергирования газа с помощью более совершенного диспергатора «Торнадо-2», представленного на рис. 6.

**Заключение.** Выполненные исследования показывают, что применение пневмогидравлического метода диспергирования газа высокотурбулентным потоком жидкости в пористой трубке является перспективным, поскольку позволяет получать мелкие жидкостно-газовые дисперсии, крайне необходимые при процессах флотации, озонирования, обескислороживания и т. д. Для детальной оценки эффективности данного метода необходимо продолжить исследования с использованием пневмогидравлических диспергаторов более совершенной конструкции.

**СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Мещеряков, Н.Ф. Флотационные машины и аппараты / Н.Ф. Мещеряков. – М.: Недра, 1982. – 200 с.
2. Рубинштейн, Ю.Б. Пенная сепарация и колонная флотация / Ю.Б. Рубинштейн, В.И. Мелик-Гайказян, Н.В. Матвеев, С.Б. Леонов. – М.: Недра, 1989. – 304 с.
3. Сивак, В.М. Аэраторы для очистки природных и сточных вод / В.М. Сивак, Н.Е. Янушевский. – Львов: Вища школа, 1984. – 124 с.
4. Перепелкин, К.Е. Газовые эмульсии / К.Е. Перепелкин, В.С. Матвеев. – Л.: Химия, 1979. – 164 с.
5. Белов, С.Г. Пневмогидравлический диспергатор газа «Торнадо» / С.Г. Белов, Г.О. Наумчик, Е.И. Дмухайло // Актуальные научно-технические и экологические проблемы сохранения среды обитания: материалы IV Международной научно-практической конференции, Брест, 25–27 сентября 2013 г. / БрГТУ ; редкол.: А.А. Волчек [и др.] –Брест, 2013. – С. 7-12.

Материал поступил в редакцию 06.09.17

**NAUMCHIK G.O., BELOV V.S. The working out of method of dispergation of gas with the help of turbulent flow of liquid on the border of a porous wall**

The methods for obtaining gas dispersions used in practice are considered, the mechanism of gas bubble formation is considered when they are separated from individual pores during bubble aeration, the possibility of creating small gas dispersions by dispersing the gas by a highly turbulent flow of liquid is shown. An original device for the hydrodynamic dispersion of gas is described with the aim of obtaining a tiny gas dispersion, the experimental dependence of the minimum diameter of the resulting gas bubbles in the dispersion on the velocity of the fluid flow is presented. Taking into account the obtained results, the device of a more perfect design was developed to continue the research.