

УДК 628.316

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ МЕЛКИХ ГАЗОВЫХ ПУЗЫРЬКОВ С ПОМОЩЬЮ ПНЕВМОГИДРАВЛИЧЕСКОГО ДИСПЕРГАТОРА

А. А. Волчек¹, Г. О. Наумчик², В. С. Белов³

¹ Д. г. н. РФ и РБ, профессор, профессор кафедры природообустройства, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: prof.volchak@yandex.by

² К. т. н., доцент кафедры водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: gonaumchik@bstu.by

³ Аспирант, УО «Брестский государственный технический университет», инженер-проектировщик, ЧУП «Сифания-экотехника», Брест, Беларусь, e-mail: belovadim@mail.ru

Реферат

В статье исследован процесс образования мелких газожидкостных дисперсий со средним диаметром газовых пузырьков менее 1 мм, описана конструкция пневмогидравлического диспергатора и описан принцип его работы. Основным элементом его конструкции, позволяющим добиваться получения мелких размеров газовых пузырьков, является пористая трубка из спеченного стеклянного порошка. В данной публикации описана экспериментальная установка для исследования работы пневмогидравлического диспергатора и приведена методика проведения экспериментов. В исследованиях применялся фотографический метод определения среднего размера газовых пузырьков, который подробно описан в методической части.

Представленные в статье результаты экспериментальных исследований доказали возможность получения мелких газовых пузырьков размером менее 1 мм при помощи представленного пневмогидравлического диспергатора. Приведен график, показывающий зависимость среднего диаметра образующихся газовых пузырьков от удельного расхода газа, вводимого в воду, при скорости движения жидкости во внутреннем отверстии пористой трубки пневмогидравлического диспергатора около 8 м/с. Установлено, что при снижении удельного расхода газа, вводимого в воду, при неизменной скорости движения воды внутри пористой трубки пневмогидравлического диспергатора размер газовых пузырьков уменьшается. Это объяснено тем, что при снижении удельного расхода газа снижается скорость выхода газа из пор пористого элемента и в момент отрыва газового пузырька объем газа, находящегося в нем, оказывался меньшим.

Ключевые слова: диспергация, газожидкостная дисперсия, пневмогидравлический диспергатор, газовые пузырьки, введение газа в воду.

DETERMINING THE EFFICIENCY OF PRODUCING SMALL GAS BUBBLES USING A PNEUMO-HYDRAULIC DISPERSER

A. A. Volchak, G. O. Naumchik, V. S. Belov

Abstract

This article examines the formation of fine gas-liquid dispersions with an average gas bubble diameter of less than 1 mm, describes the design of a pneumohydraulic disperser, and describes its operating principle. The key element of its design, which enables the production of fine gas bubbles, is a porous tube made of sintered glass powder. This publication describes an experimental setup for studying the operation of the pneumohydraulic disperser and provides the experimental methodology. The study utilized a photographic method for determining the average gas bubble size, which is described in detail in the methodology section.

The experimental results presented in the article demonstrate the feasibility of producing fine gas bubbles less than 1 mm in size using the presented pneumohydraulic disperser. A graph is provided showing the dependence of the average diameter of the resulting gas bubbles on the specific flow rate of the gas injected into the water at a liquid velocity of approximately 8 m/s in the internal bore of the porous tube of the pneumohydraulic disperser. It was found that, with a decrease in the specific flow rate of gas injected into the water, while maintaining a constant water velocity within the porous tube of the pneumohydraulic disperser, the size of gas bubbles decreases. This is explained by the fact that, with a decrease in the specific gas flow rate, the rate of gas release from the pores of the porous element decreases, and the volume of gas within the bubble decreases at the moment of bubble detachment.

Keywords: dispersion, gas-liquid dispersion, pneumohydraulic disperser, gas bubbles, introduction of gas into water.

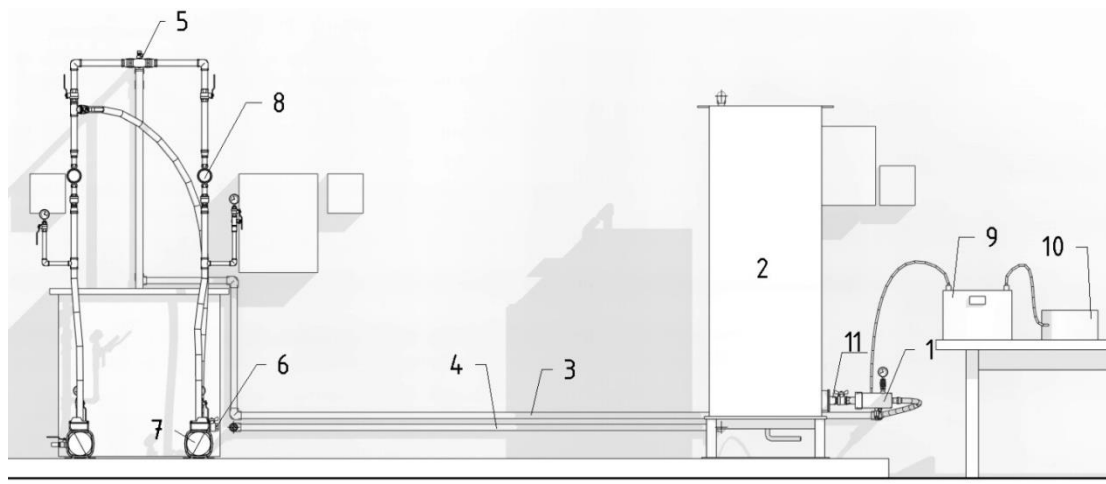
Введение

В различных технологических процессах промышленного производства и сельского хозяйства часто возникает необходимость получать мелкие газожидкостные дисперсии со средним диаметром газовых пузырьков менее 1 мм [1–7]. От размера пузырьков зависит эффективность следующих процессов: растворение газообразного озона в обрабатываемой воде, растворение кислорода в окислителях и в прудах при промышленном рыбоводстве, процесс очистки воды методом флотации, процесс пенной сепарации на горно-обогатительных предприятиях и т. д. [2–9]. В публикациях [1, 2, 8, 9] отмечалось, что при обработке природных и сточных вод часто возникает необходимость вводить озонсодержащий газ в обрабатываемую воду. Эффективность введения озона (дорогостоящего газа) в обрабатываемую воду зависит от размера пузырьков: с уменьшением диаметра пузырьков возрастает межфазная поверхность и, следовательно, увеличивается эффективность растворения вводимого газа в обрабатываемой воде [8, 9]. Анализ многочисленных исследований и разработок в области получения мелких газовых пузырьков [1–3, 5–15] показал, что задача получения мелких газовых дисперсий до настоящего времени решена не полностью, поэтому исследования в данной области оста-

ются актуальными [1, 2, 6–19]. В публикациях [6–9, 13–15] был сделан вывод о том, что наиболее перспективным является пневмогидравлический метод введения газа в обрабатываемую жидкость, так как данный метод требует небольших затрат энергии на диспергирование, имеет высокую надежность (вследствие отсутствия движущихся частей) и позволяет получить газовые пузырьки диаметром менее 1 мм, что обеспечит высокую эффективность растворения сравнительно дорогостоящих газов (кислород, озон и т. д.). Для исследования процесса диспергирования газа и определения размера пузырьков, образующихся при введении газа в обрабатываемую жидкость с помощью пневмогидравлического диспергатора, использовался бак с прозрачной стенкой и применялась специальная методика определения среднего размера пузырьков [13, 15, 20].

Методическая часть

Стенд для испытания диспергатора газа на момент испытаний был расположен в лаборатории кафедры водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов Учреждения образования «Брестский государственный технический университет». Схема испытательного стенда приведена на рисунке 1.



1 – пневмогидравлический диспергатор; 2 – бак с прозрачной фронтальной стенкой; 3 – напорный трубопровод; 4 – всасывающий трубопровод; 5 – узел подключения напорного трубопровода; 6 – узел подключения всасывающего трубопровода; 7 – насос Wilo MHIЕ403-1/Е/3-2-2G с частотным преобразователем; 8 – водомер; 9 – газовый счетчик; 10 – Компрессор Partner AS09; 11 – Вентиль для подачи газожидкостной смеси

Рисунок 1 – Конструкция стенда для испытания пневмогидравлических диспергаторов газа

Алгоритм работы на данном стенде заключался в следующем: при помощи узла 5 и 6 подключался всасывающий 4 и подающий 3 трубопроводы, к насосу 7, чем обеспечивался режим циркуляции воды в баке 2. Насос 7 имел блок, который позволял регулировать частоту вращения рабочего колеса, что позволяло менять подачу воды без дополнительных манипуляций с запорной арматурой. При помощи водомера 8 фиксировался расход жидкости в системе. Корпус пневмогидравлического диспергатора 1 выполнен в разборном исполнении, что позволяет при необходимости заменять пористые элементы, а также имеет все необходимые резьбовые соединения для подключения к баку 2 и подающему трубопроводу 3. На корпусе диспергатора установлен манометр для измерения давления газа. Газ, в нашем случае воздух, подавался при помощи компрессора 10 ($P_{\max} = 3.5 \text{ bar}$, $Q_{\max} = 135 \text{ дм}^3/\text{мин}$). Газ проходил через газовый счетчик 9 и подавался в корпус пневмогидравлического диспергатора 1 через патрубок подачи газа, с газового счетчика 9 снимались показания по расходу газа. Компрессор 10 оснащен сбросным вентилем, который позволял регулировать подачу газа [13, 15].



Рисунок 2 – Внешний вид бака с прозрачной фронтальной стенкой



Рисунок 3 – Внешний вид насосной установки

Экспериментальные исследования проводились на вышеприведенном испытательном стенде по следующей методике. В корпус диспергатора устанавливался исследуемый пористый элемент, который подвергался испытанию. Затем диспергатор присоединялся к испытательному стенду. После этого включалась подача газа в корпус диспергатора и открывался вентиль 11. При этом подаваемый воздух свободно барботировался в баке. Далее включался насос с заранее установленной частотой вращения рабочего колеса, в результате в баке возникала газожидкостная струя. Сбросным

вентилем на компрессоре устанавливалось заданное давление газа в диспергаторе. После этого производилась фотографическая съемка газожидкостной струи, фиксировался расход воды с помощью водомера 8 и расход газа с помощью счетчика 9. Затем устанавливалось другое давление газа и опыт повторялся [13, 15].

Средний диаметр пузырьков газа, полученных с помощью пневмогидравлического диспергатора, определяли методом цифровой фоторегистрации газожидкостной дисперсии. Истинные размеры пузырьков устанавливали путем калибровки изображения по масштабному реперу (линейке), находящемуся в плоскости съемки.

Данный метод заключается в непосредственном получении изображения газожидкостной дисперсии при помощи цифрового фотоаппарата Nikon Coolpix 120 с разрешением 14 мегапикселей. Столь большое разрешение позволяет с приемлемым качеством произвести цифровое увеличение изображения и произвести непосредственный подсчет элементов размерами до 0,1 мм. Алгоритм определения размеров пузырьков следующий: на прозрачной стенке бака располагается маркер известных размеров, далее производится подача жидкости в диспергатор, в баке образуется газожидкостная дисперсия, которая фотографируется. Далее полученное изображение загружается в программный комплекс Revit, где это изображение масштабируется

в соответствии с известными размерами маркера. Таким образом, мы получаем изображение в масштабе 1:1, которое увеличиваем в 1000 раз. Далее в программном комплексе Revit был создан параметрический элемент, представляющий из себя линию, отстраиваемую пользователем по двум произвольным точкам. Параметризация данного элемента заключается в том, что фактическая длина построенной линии автоматически рассчитывается и фиксируется в «ячейке памяти» программы. Затем необходимо отметить достаточное количество видимых пузырей данными линиями. В нашем случае этот параметр – длина линии. Следующий шаг – это настройка режима автоматического подсчета элементов линий, которые можно назвать «эквивалентами диаметра», размещенных на каждом отмеченном пузыре, сортировка их по длине, а также автоматический пересчет длин с учетом масштабирования изображения в 1000 раз. В итоге получаем данные о диаметрах всех отмеченных пузырьков, создаваемых пневмогидравлическим диспергатором, что позволяет вычислить их средний диаметр. Количество отмечаемых пузырей на каждом изображении, составляло не менее ста штук [13, 15].

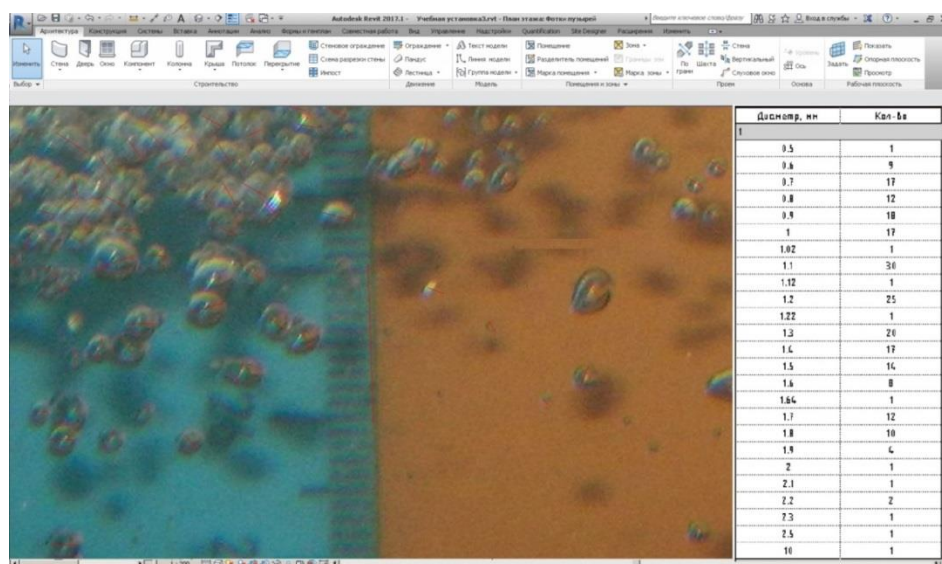


Рисунок 4 – Фрагмент фотоснимка, использованного для определения среднего диаметра пузыря с помощью программного комплекса Revit

Экспериментальная часть

Авторами был предложен пневмогидравлический метод диспергирования газа высокотурбулентным потоком жидкости, протекающей в пористой трубе. Данный метод разрабатывается для получения мелких газожидкостных дисперсий с диаметром газовых пузырьков менее 1 мм, необходимых в процессах флотации, озонирования,

обескислороживания и т. д. В отличие от других методов получения мелких газожидкостных дисперсий, разрабатываемый метод не требует использования громоздкого и сложного оборудования, позволяет диспергировать газы любого состава с высоким удельным расходом, имеет сравнительно невысокую энергозатратность [8, 9, 13–15].

Принцип данного метода диспергирования поясняется на рисунке 5.

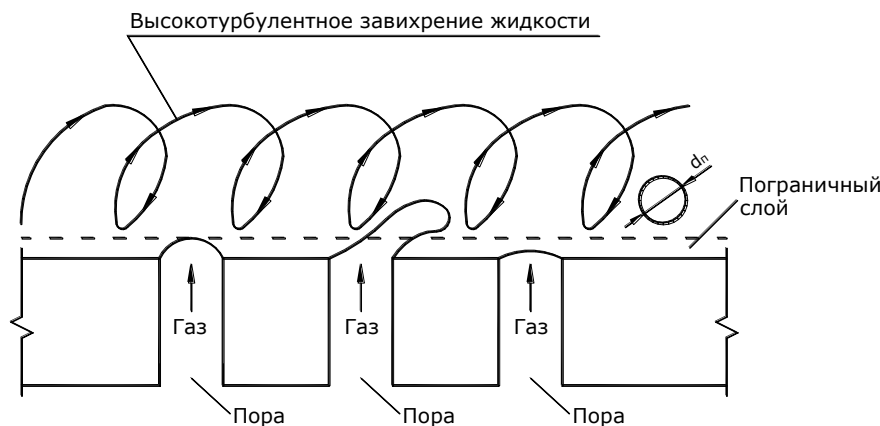
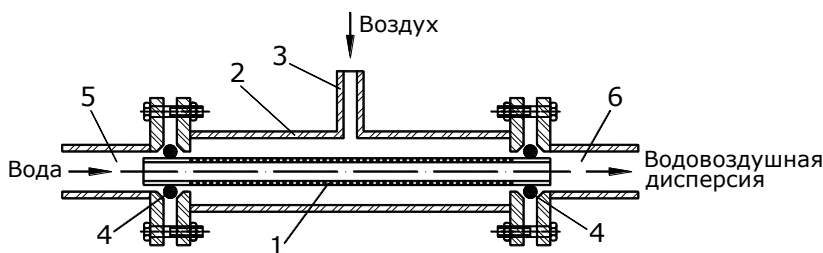


Рисунок 5 – Схема образования пузырька газа при выходе из единичной поры в быстродвижущейся жидкости

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 использовалось экспериментальное устройство, конструкция которого приведена на рисунке 6.



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

Рисунок 6 – Пневмогидравлический диспергатор газа

Пневмогидравлический диспергатор газа 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 патрубков подачи газа [8, 9, 13–15].

Исследуемый пористый элемент был изготовлен методом спекания стеклянного порошка фракции от 0,2 до 0,3 миллиметров в форме при высокой температуре. Данный материал обладает высокой химической стойкостью к различным средам, в том числе к озону. Наружный диаметр пористого элемента составлял 45 мм, внутренний диаметр – 12 мм. На рисунке 3 показана фотография исследуемого пористого элемента.



Рисунок 7 – Пористый элемент с порами от 0,2 до 0,3 мм, имеющим наружный диаметр 45 мм и цилиндрическое отверстие диаметром 12 мм по всей длине

Результаты испытаний диспергатора с вышепредставленным пористым элементом приведены в таблице 1. Данный пористый элемент имел поры диаметром от 0,2 до 0,3 мм. Его проницаемость для воздуха была относительно высокой. Были проведены испытания при режиме работы насоса – с частотой вращения рабочего колеса 3500 об/мин.

Таблица 1 – Результаты испытания диспергатора с пористой трубкой, имеющей поры размером от 0,2 до 0,3 мм

№ опыта	Част. вращ. насоса, об/мин	Давление газа, бар	Расход воды, дм ³ /с	Расход газа, дм ³ /с	Средний диаметр пузыря, мм
1	3500	1,95	0,89	0,69	1,09
2	3500	1,8	0,93	0,38	1,06
3	3500	1,7	0,96	0,22	1,02
4	3500	1,6	0,96	0,05	0,83

На рисунках 8–11 приведены фотографии газожидкостных струй, выходящих из пневмогидравлического диспергатора, соответствующих частоте вращения рабочего колеса насоса – 3500 об/мин. При этом скорость воды во внутреннем отверстии пористого элемента составляла около 8 м/с.

Как показывают представленные фотографии, с уменьшением удельного расхода газа, при неизменной частоте вращения рабочего колеса, происходит уменьшение среднего диаметра получаемых пузырьков. Так, согласно результатам определения среднего диаметра пузырька с помощью программного комплекса Revit при максимальном расходе газа составлял 1,09 мм, а при минимальном 0,83 мм.



Рисунок 8 – Газожидкостная струя, полученная в опыте № 1

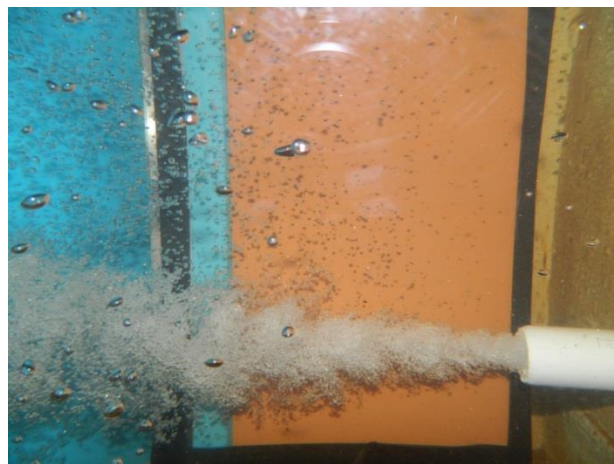


Рисунок 9 – Газожидкостная струя, полученная в опыте № 2

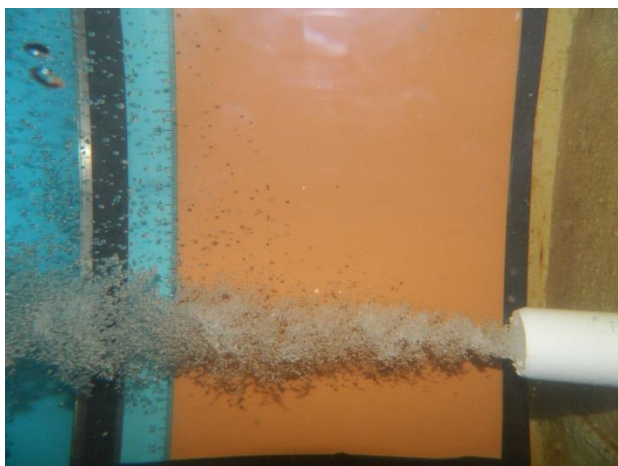


Рисунок 10 – Газожидкостная струя, полученная в опыте № 3

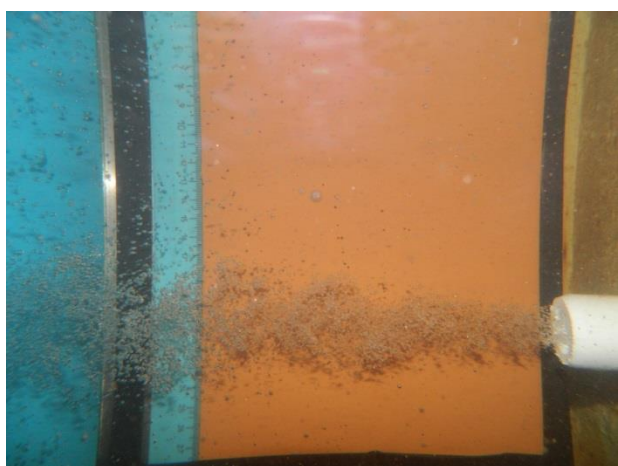


Рисунок 11 – Газожидкостная струя, полученная в опыте № 4

На рисунке 12 показана зависимость среднего диаметра образующихся пузырьков газа от его удельного расхода (отношения расходов газа и жидкости). Кривая построена по результатам испытаний пневмогидравлического диспергатора с пористой трубкой, диаметр пор которой составляет 0,2...0,3 мм, при скорости потока жидкости внутри пористой трубки около 8 м/с.

Кривая, представленная на рисунке 12, показывает, что с увеличением удельного расхода газа (отношения расхода газа к расходу воды) увеличивался средний размер газовых пузырьков. Это можно объяснить тем, что при увеличении удельного расхода газа увеличивался расход газа, выходящего из пористого элемента, а, следовательно, увеличивалась скорость выхода газа из пор пористого элемента. Поэтому в момент отрыва газового пузырька объем газа в нем оказывается большим. При этом скорость движения жидкости во внутреннем отверстии пористой трубки пневмогидравлического диспергатора в данных опытах была около 8 м/с.

Наименьший средний диаметр образующихся пузырьков составлял 0,83 мм, чего, как правило, не возможно добиться с помощью обычных методов диспергации, таких как барботаж или импеллерные установки. Более мелких пузырьков получить не удалось по причине невозможности достижения больших скоростей движения жидкости в пористом элементе из-за ограниченного напора у применявшегося в исследованиях насоса (порядка 0,4 МПа) и больших потерях напора в соединительных трубопроводах стенда. Также некоторым недостатком при испытании вышеописанного пористого являлось повышенное рабочее давление газа в корпусе пневмогидравлического диспергатора, что не всегда возможно осуществить на практике.

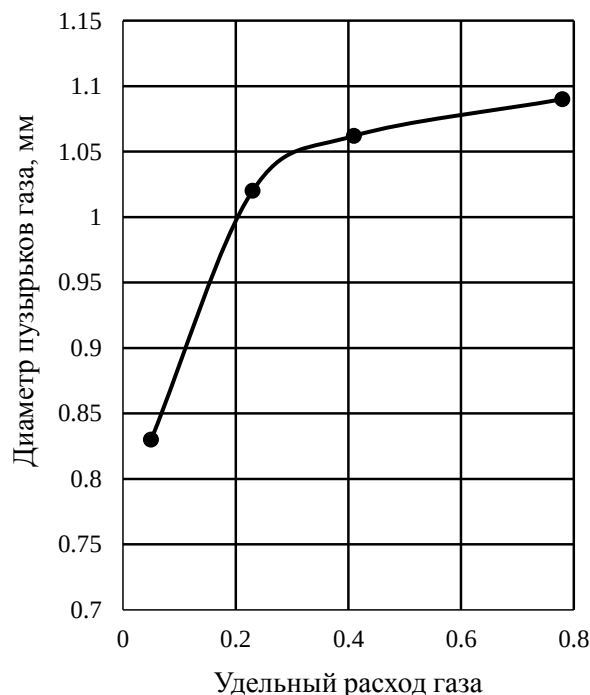


Рисунок 12 – Зависимость среднего диаметра пузырьков газа от удельного расхода (отношения расхода газа к расходу жидкости) при испытании пневмогидравлического диспергатора

Заключение

Проведенные исследования доказали возможность получения мелких газовых пузырьков размером менее 1 мм при помощи пневмогидравлического диспергатора, конструкция которого приведена в данной статье. В результате исследований установлено, что при снижении удельного расхода газа, вводимого в воду, при неизменной скорости движения струи воды внутри пористой трубки пневмогидравлического диспергатора, размер газовых пузырьков уменьшался. Это объясняется тем, что при снижении удельного расхода газа, снижается скорость выхода газа из пор пористого элемента и в момент отрыва газового пузырька объем газа, находящегося в нем, оказывался меньшим. В последующих экспериментах необходимо исследовать работу пневмогидравлического диспергатора в различных режимах для определения зависимостей размера газовых пузырьков от различных факторов и установления оптимальных параметров. Это поможет создать эффективный диспергатор газа в обрабатываемую жидкость, позволяющий получать мелкие пузырьки при невысоких энергозатратах на диспергирование.

Список цитированных источников

1. Пенная сепарация и колонная флотация / Ю. Б. Рубинштейн, В. И. Мелик-Гайказян, Н. В. Матвеев, С. Б. Леонов. – М. : Недра, 1989. – 304 с.
2. Мещеряков, Н. Ф. Флотационные машины и аппараты / Н. Ф. Мещеряков. – М. : Недра, 1982. – 200 с.
3. Жерноклев, А. К. Аэрация и озонирование в процессах очистки воды / А. К. Жерноклев, Л. П. Пилинечевич, В. В. Савич. – Минск : Тонлик, 2002. – 129 с.
4. Попкович, Г. С. Системы аэрации сточных вод / Г. С. Попкович, Б. Н. Репин. – М. : Стройиздат, 1986. – 136 с.
5. Воронов, Ю. В. Струйная аэрация / Ю. В. Воронов, В. Д. Казаков, М. Ю. Толстой. – М. : изд-во Ассоц. строительных вузов, 2007. – 215 с.
6. Перепелкин, К. Е. Газовые эмульсии / К. Е. Перепелкин, В. С. Матвеев. – Л. : Химия, 1979. – 164 с.
7. Золотов, А. В. Способы получения газовой дисперсии в объеме жидкости / А. В. Золотов, И. С. Багреева // Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт. – 2017. – № 1. – С. 18–22.

8. Волчек, А. А. Выбор метода получения газо-жидкостной дисперсии при введении сравнительно дорогостоящих газов / А. А. Волчек, Г. О. Наумчик, В. С. Белов // Строительство – формирование среды жизнедеятельности : сб. статей XXVIII Междунар. науч. конф., Брест, 23–25 апр. 2025 г. / Брест. гос. техн. ун-т, Нац. исслед. Московский гос. строит. ун-т ; редкол.: Н. Н. Шалобита, И. П. Павлова, Н. В. Черноиван [и др.]. – Брест, 2025. – С. 44–52.
9. Волчек, А. А. Обоснование применения усовершенствованного пневмогидравлического диспергатора для получения мелкой газо-жидкостной дисперсии / А. А. Волчек, Г. О. Наумчик, В. С. Белов // Водоснабжение и санитарная техника. – 2025. – № 8. – С. 55–64.
10. Григорьева, А. Н. Влияние конструкции перемешивающего устройства на эффективность массообмена при пневмомеханической аэрации сточных вод / А. Н. Григорьева, Р. Ш. Абиев // Водоснабжение и санитарная техника. – 2020. – № 6. – С. 25–32.
11. Григорьева, А. Н. Влияние геометрии перемешивающего устройства на диаметр пузырьков воздуха при перемешивании в системе газ-жидкость / А. Н. Григорьева, Р. Ш. Абиев // Химическая промышленность сегодня. – 2019. – № 5. – С. 18–22.
12. Лямаев, Б. Ф. Гидроструйные насосы и установки / Б. Ф. Лямаев. – Л. : Машиностроение, 1988. – 256 с.
13. 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 Междунар. науч.-практ. конф., Брест, 25–27 сент. 2013 г. / Брест. гос. техн. ун-т ; редкол.: А. А. Волчек [и др.]. – Брест, 2013. – С. 7–12.
14. Пневмогидравлический диспергатор газа : пат. BY 12838 / С. Г. Белов, Г. О. Наумчик. – Оpubl. 28.02.2022.
15. Наумчик, Г. О. Разработка метода диспергирования газа с помощью турбулентного потока жидкости на границе пористой стенки / Г. О. Наумчик, В. С. Белов // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. Сер. Водохоз. стр-во, теплоэнергетика и геоэкология. – 2017. – № 2. – С. 102–105.
16. Сивак, В. М. Аэраторы для очистки природных и сточных вод / В. М. Сивак, Н. Е. Янушевский. – Львов : Вища школа, 1984. – 124 с.
17. Ксенофонов, Б. С. Использование процессов струйной аэрации в процессах флотационной очистки сточных вод / Б. С. Ксенофонов // Сантехника. – 2022. – № 6. – С. 32–37.
18. Ксенофонов, Б. С. Повышение эффективности струйной аэрации в процессах флотационной очистки сточных вод / Б. С. Ксенофонов // Сантехника. – 2020. – № 4. – С. 36–39.
19. Ксенофонов, Б. С. Интенсификация флотационной очистки сточных вод с использованием струйных аэраторов и эжекторов / Б. С. Ксенофонов, Е. С. Стельмах // Водоочистка. – 2018. – № 6. – С. 25–35.
20. Волчек, А. А. Преимущества оптических методов измерения размера и дисперсности газовых пузырьков в воде. / А. А. Волчек, Г. О. Наумчик, В. С. Белов // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2025. – № 2. – С. 94–98.
21. Popkovich, G. S. Sistemy aeracii stochnyh vod / G. S. Popkovich, B. N. Repin. – M. : Strojizdat, 1986. – 136 s.
22. Voronov, YU. V. Strujnaya aeraciya / YU. V. Voronov, V. D. Kazakov, M. YU. Tolstoj. – M. : izd-vo Assoc. stroitel'nyh vuzov, 2007. – 215 s.
23. Perepelkin, K. E. Gazovye emul'sii / K. E. Perepelkin, V. S. Matveev. – L. : Himiya, 1979. – 164 s.
24. Zolotov, A. V. Sposoby polucheniya gazovoj dispersii v ob'eme zhidkosti / A. V. Zolotov, I. S. Bagreeva // Neftepererabotka i neftekhimiya. Nauchno-tehnicheskie dostizheniya i peredovoj opyt. – 2017. – № 1. – С. 18–22.
25. Volchek, A. A. Vybor metoda polucheniya gazo-zhidkostnoj dispersii pri vvedenii sravnitel'no dorogostoyashchih gazov / A. A. Volchek, G. O. Naumchik, V. S. Belov // Stroitel'stvo – formirovanie sredy zhiznedeyatel'nosti : sb. statej XXVIII Mezhdunar. nauch. konf., Brest, 23–25 apr. 2025 g. / Brest. gos. tekhn. un-t, Nac. issled. Moskovskij gos. stroit. un-t ; redkol.: N. N. SHalobyta, I. P. Pavlova, N. V. CHernoivan [i dr.]. – Brest, 2025. – С. 44–52.
26. Volchek, A. A. Obosnovanie primeneniya usovershenstvovannogo pnevmogidravlichesкого dispergatora dlya polucheniya melkoj gazozhidkostnoj dispersii / A. A. Volchek, G. O. Naumchik, V. S. Belov // Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika. – 2025. – № 8. – С. 55–64.
27. Grigor'eva, A. N. Vliyanie konstrukcii peremeshivayushchego ustrojstva na effektivnost' massoobmena pri pnevmomekhanicheskoy aeracii stochnyh vod / A. N. Grigor'eva, R. SH. Abiev // Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika. – 2020. – № 6. – С. 25–32.
28. Grigor'eva, A. N. Vliyanie geometrii peremeshivayushchego ustrojstva na diametr puzyr'kov vozduha pri peremeshivanii v sisteme gaz-zhidkost' / A. N. Grigor'eva, R. SH. Abiev // Himicheskaya promyshlennost' segodnya. – 2019. – № 5. – С. 18–22.
29. Lyamaev, B. F. Gidrostrujnye nasosy i ustanovki / B. F. Lyamaev. – L. : Mashinostroenie, 1988. – 256 s.
30. Belov, S. G. Pnevmoгidравлический dispergator gaza «Tornado» / S. G. Belov, G. O. Naumchik, E. I. Dmuhajlo // Aktual'nye nauchno-tehnicheskie i ekologicheskie problemy sohraneniya sredy obitaniya : materialy IV Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Brest, 25–27 sent. 2013 g. / Brest. gos. tekhn. un-t ; redkol.: A. A. Volchek [i dr.]. – Brest, 2013. – С. 7–12.
31. Pnevmoгidравлический dispergator gaza : pat. BY 12838 / S. G. Belov, G. O. Naumchik. – Opubl. 28.02.2022.
32. Naumchik, G. O. Razrabotka metoda dispergirovaniya gaza s pomoshch'yu turbulentnogo potoka zhidkosti na granice poristoj stenki / G. O. Naumchik, V. S. Belov // Vestn. Brest. gos. tekhn. un-ta. Ser. Vodohoz. str-vo, teploenergetika i geoekologiya. – 2017. – № 2. – С. 102–105.
33. Sivak, V. M. Aeratory dlya ochistki prirodnyh i stochnyh vod / V. M. Sivak, N. E. YAnushevskij. – L'vov : Vishcha shkola, 1984. – 124 s.
34. Ksenofontov, B. S. Ispol'zovanie processov strujnoj aeracii v processah flotacionnoj ochistki stochnyh vod / B. S. Ksenofontov // Santekhnika. – 2022. – № 6. – С. 32–37.
35. Ksenofontov, B. S. Povyshenie effektivnosti strujnoj aeracii v processah flotacionnoj ochistki stochnyh vod / B. S. Ksenofontov // Santekhnika. – 2020. – № 4. – С. 36–39.
36. Ksenofontov, B. S. Intensifikaciya flotacionnoj ochistki stochnyh vod s ispol'zovaniem strujnyh aeratorov i ezhektorov / B. S. Ksenofontov, E. S. Stel'mah // Vodoочистка. – 2018. – № 6. – С. 25–35.
37. Volchek, A. A. Preimushchestva opticheskikh metodov izmereniya razmera i dispersnosti gazovyh puzyr'kov v vode. / A. A. Volchek, G. O. Naumchik, V. S. Belov // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2025. – № 2. – С. 94–98.

References

1. Pennaya separaciya i kolonnaya flotaciya / YU. B. Rubinshtejn, V. I. Melik-Gajkazyan, N. V. Matveenko, S. B. Leonov. – M. : Nedra, 1989. – 304 s.
2. Meshcheryakov, N. F. Flotacionnye mashiny i apparaty / N. F. Meshcheryakov. – M. : Nedra, 1982. – 200 s.
3. ZHemoklev, A. K. Aeraciya i ozonirovanie v processah ochistki vody / A. K. ZHemoklev, L. P. Pilinevich, V. V. Savich. – Minsk : Tonpik, 2002. – 129 s.

Материал поступил 22.06.2026, одобрен 20.07.2026, принят к публикации 20.07.2026