

УДК 628.316

ПРЕИМУЩЕСТВА ОПТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ РАЗМЕРА И ДИСПЕРСНОСТИ ГАЗОВЫХ ПУЗЫРЬКОВ В ВОДЕ

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: volchak@tut.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 показана актуальность изучения характеристик газовых пузырьков, образующихся при аэрации, озонировании или других способах подачи газа в жидкость, и рассмотрены существующие оптические и физико-технические методы измерения размеров газовых пузырьков в воде и анализа их дисперсности. Приведены достоинства и недостатки каждого метода.

Акцентировано внимание на двух методиках анализа фотографий для определения дисперсности пузырьков газа. Одна методика позволяет осуществлять полуавтоматический анализ фотографий, т. е. обработка фотографий делается вручную, а компьютерная программа производит математическую обработку полученных результатов. Другая методика выполняет полностью автоматизированную обработку фотографий при помощи искусственного интеллекта и математический анализ полученных результатов.

Подробно описан алгоритм полуавтоматического определения дисперсности сфотографированных пузырьков газа, образующихся в баке с прозрачной стенкой, заполненном водой, при помощи компьютерной программы Revit. Описаны преимущества данной компьютерной программы в сравнении с другими программами.

Показана возможность использования более продвинутых алгоритмов автоматического распознавания контура пузырьков на снимке при помощи искусственного интеллекта и автоматический подсчет их количества, величины и диаметра. Приведена схема, на которой показана конструкция специального приспособления, позволяющего реализовать автоматическое распознавание и анализ дисперсности пузырьков газа. Показаны достоинства и недостатки полностью автоматизированной методики обработки фотографий.

Обоснован выбор оптического метода фотоанализа с использованием полуавтоматического определения дисперсности пузырьков газа с целью оценки эффективности работы диспергатора. Разработана конструкция экспериментальной установки для анализа дисперсности газовых пузырьков, образующихся при помощи различных видов диспергаторов. Приведена схема экспериментальной установки.

Ключевые слова: дисперсность газовых пузырьков, диспергатор, пузырьки, газо-жидкостная дисперсия.

ADVANTAGES OF OPTICAL METHODS OF MEASURING THE SIZE AND DISPERSION OF GAS BUBBLES IN WATER

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

Abstract

The article shows the relevance of studying the characteristics of gas bubbles formed during aeration, ozonation or other methods of feeding gas into a liquid and considers existing optical and physical-technical methods for measuring the size of gas bubbles in water and analyzing their dispersion. The advantages and disadvantages of each method are given. Attention is focused on two methods of analyzing photographs to determine the dispersion of gas bubbles. One method allows for semi-automatic analysis of photographs, i. e., photo processing is done manually, and a computer program performs mathematical processing of the results obtained. The other method performs fully automated processing of photographs using artificial intelligence and mathematical analysis of the results obtained. An algorithm for semi-automatic determination of the dispersion of photographed gas bubbles formed in a tank with a transparent wall filled with water, using the Revit computer program, is described in detail. The advantages of this computer program in comparison with other programs are described. The possibility of using more advanced algorithms for automatic recognition of bubble contours in a photograph using artificial intelligence and automatic counting of their number, size and diameter is shown. A diagram is given showing the design of a special device that allows for automatic recognition and analysis of gas bubble dispersion. The advantages and disadvantages of a fully automated photo processing technique are shown. The choice of an optical photoanalysis method using semi-automatic determination of gas bubble dispersion is substantiated in order to assess the efficiency of the disperser. An experimental setup has been developed to analyze the dispersion of gas bubbles formed using various types of dispersers. A diagram of the experimental setup is given.

Keywords: dispersion of gas bubbles, dispersant, bubbles, gas-liquid dispersion.

Введение

Изучение характеристик газовых пузырьков, образующихся при аэрации, озонировании или других способах подачи газа в жидкость, является востребованной задачей при определении эффективности работы таких устройств, как аэраторы, барботеры, эжекторы и диспергаторы [1–5]. Размер пузырьков и их дисперсность (распределение по размерам) существенно влияют на эффективность фазового взаимодействия, т. е. эффективность растворения газа в жидкости. Чем мельче размер пузырьков, тем больше их суммарная площадь поверхности соприкосновения с водной фазой, а следовательно, выше эффективность растворения газа. Это особенно важно при введении такого дорогостоящего газа, как озон [1, 2, 6].

Газожидкостные системы активно используются в различных отраслях промышленности и экологии: в системах биологической очистки сточных вод, при озонировании питьевой воды, во флотаторных установках, а также в химических и фармацевтических реакторах [3–9]. Основным показателем эффективности таких систем является коэффициент массопереноса, который напрямую зависит от площади межфазной поверхности – величины, обратно пропорциональной размеру пузырьков [9–12]. Чем меньше диаметр пузырьков, тем больше суммарная площадь контакта и, следовательно, тем эффективнее процесс [13, 14].

Измерение характеристик пузырьков, таких как размер, форма, скорость всплытия, объемное распределение и устойчивость, требует применения специализированных методов.

Методы измерения можно классифицировать следующим образом:

- **оптические методы:** включают фото и видеосъёмку (фотоанализ), лазерную дифракцию, голографическую визуализацию;
- **физико-технические методы:** ультразвуковой метод, методы на основе электропроводности, измерение диэлектрической проницаемости.

Метод лазерной дифракции заключается в следующем: луч лазера проходит через поток пузырьков и на экране или датчиках регистрируется дифракционная картина. Распределение интенсивности света интерпретируется как распределение размеров пузырьков. Данный метод имеет высокую точность с возможностью определения диаметров пузырьков до 10 мкм и высокую скорость обработки данных, однако оборудование, используемое в данном методе, имеет очень высокую стоимость и целесообразно к применению в только в крупных промышленных технологических процессах [15].

Метод ультразвукового зондирования основан на отражении ультразвуковой волны от поверхности пузырьков. По изменению характеристик сигнала (амплитуда, фаза, рассеяние) можно оценить размеры и концентрацию пузырьков. К преимуществам данного метода можно отнести то, что он применим для исследований в мутной воде, однако из-за сложности интерпретации данных точность данного метода невысока [16].

Определение размера пузырьков по изменению проводимости основан на изменении электрической проводимости воды при прохождении через нее газовых пузырьков. Измеряя флуктуации сопротивления, можно оценить частоту и размер пузырьков. Как и в случае с ультразвуковым методом, точность данного типа измерений низкая [17].

В оптическом методе пузырьки фиксируются на фото или видео через прозрачную стенку резервуара. Полученные изображения обрабатываются программным обеспечением для расчёта геометрических параметров пузырьков.

Таким образом, для лабораторных исследований наиболее предпочтительным является оптический метод фотоанализа, поскольку относительно прост в аппаратном исполнении, обладает высокой точностью, имеет возможность объективного контроля из-

мерений и относительно легко поддается автоматизации. В представленной статье акцент будет сделан на данном методе.

Оптический метод фотоанализа при исследовании размера и дисперсности газовых пузырьков в воде проводится путем съёмки газожидкостного факела через прозрачную стенку сосуда или камеры. Съёмка ведется в течение определённого времени при стабильном режиме подачи газа. Камера фиксирует изображения пузырьков в проходящем или отражённом свете [17]. Важно обеспечить строго перпендикулярное расположение объектива относительно наблюдаемой плоскости для снижения искажений. На передней прозрачной стенке, а также на задней стенке сосуда нанесена калибровочная линейка для возможности масштабирования изображения.

Съёмка производится на высокоскоростную видеокамеру с частотой кадров не менее 120 fps, в разрешении 1280x800, с объективом с макрофокусировкой (50–100 мм) либо на фотоаппарат с разрешением не менее 40 Мп. После получения серии кадров следует этап их обработки и извлечения информации при помощи современного программного обеспечения. Данный процесс может быть организован двумя различными методами, которые можно назвать как метод № 1 «полуавтоматический» и метод № 2 «полностью автоматизированный». У обоих способов есть как свои достоинства, так и недостатки.

Метод № 1 основан на получении фотоснимком при помощи фотоаппарата с высоким разрешением. Большое разрешение фотоснимков позволяет с приемлемым качеством произвести цифровое увеличение изображения и произвести непосредственный подсчет элементов размерами до 0,1 мм. Алгоритм определения следующий: на прозрачной стенке бака располагается маркер (калибровочная линейка) известных размеров, далее включается оборудование для подачи воздуха, в баке образуется газо-жидкостная дисперсия, которая фотографируется. Полученные изображения загружаются в программный комплекс САПР типа AutoCAD, Revit и т. д., в котором есть функции параметризации элементов и автоматического подсчета количества элементов по определённым параметрам (рисунок 1). В описываемом ниже примере было использовано программное обеспечение Revit [18].

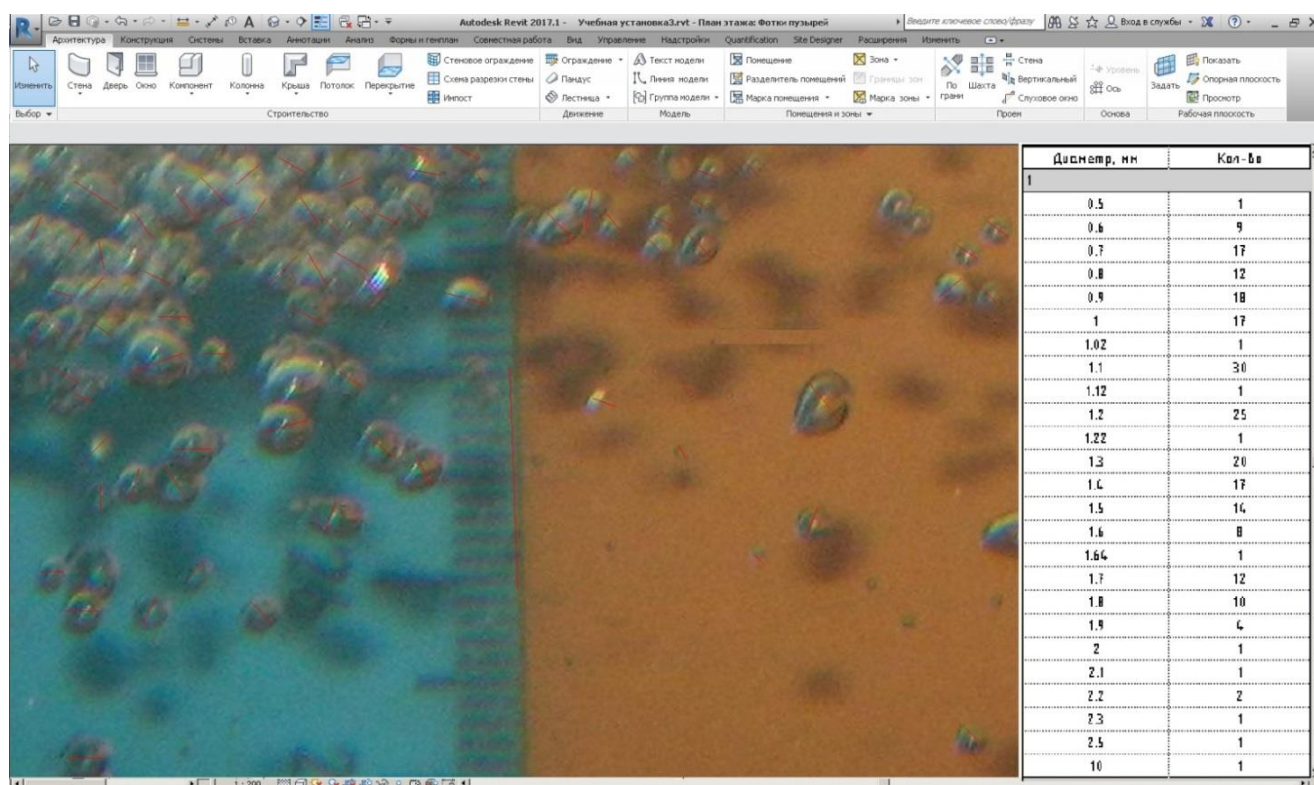


Рисунок 1 – Фрагмент фотоснимка, использованного для определения среднего диаметра пузыря с помощью программного комплекса Revit

После загрузки полученных фотоснимков в программу Revit изображения масштабируются в соответствии с известными размерами маркера. Таким образом, мы получаем изображения в масштабе 1:1, которые затем увеличиваются в тысячу раз. Далее в программном комплексе Revit создается параметрический элемент, представляющий из себя линию или окружность, отстраиваемую пользователем по двум произвольным точкам. Параметризация данного элемента заключается в том, что фактическая длина или диаметр построенной линии автоматически рассчитывается и фиксируется в «ячейке памяти» программы. После этого необходимо отметить достаточное количество видимых пузырей данными линиями [18]. Тут следует сказать, что у этого метода есть неоспоримое преимущество, заключающееся в том, что анализ фотографии проводится человеком, который в отличие от машинного зрения намного лучше может распознать пузыри при их перекрытии друг другом. Даже при большом увеличении фотографии остается возможность определить несколько пузырей перекрывающих друг друга и отметить их как отдельные элементы, а не как один общий элемент с большим диаметром [18].

Программа Revit обладает возможностью автоматического подсчета количества элементов, расположенных в проекте, а так-

же их сортировки по различным параметрам. В данном случае этим параметром является «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 тысячу раз. В итоге становится доступна информация обо всех диаметрах отмеченных пузырей, что дает возможность рассчитать средний диаметр пузыря, выдаваемый барботером или диспергатором. Количество отмечаемых пузырей на каждом изображении зависит от усердия исследователя, но очевидно должно составлять не менее нескольких сотен для получения более точного среднего значения.

Метод № 2 основан на использовании более продвинутых алгоритмов автоматического распознавания контура пузырьков на снимке и автоматический подсчет их количества и величины диаметра. Для реализации данного метода требуется создание специального приспособления, в состав которого входит трубка-пробоотборник, экран с подсветкой и камера для съемки в высоком разрешении. Конструкция данного приспособления приведена на рисунке 2.

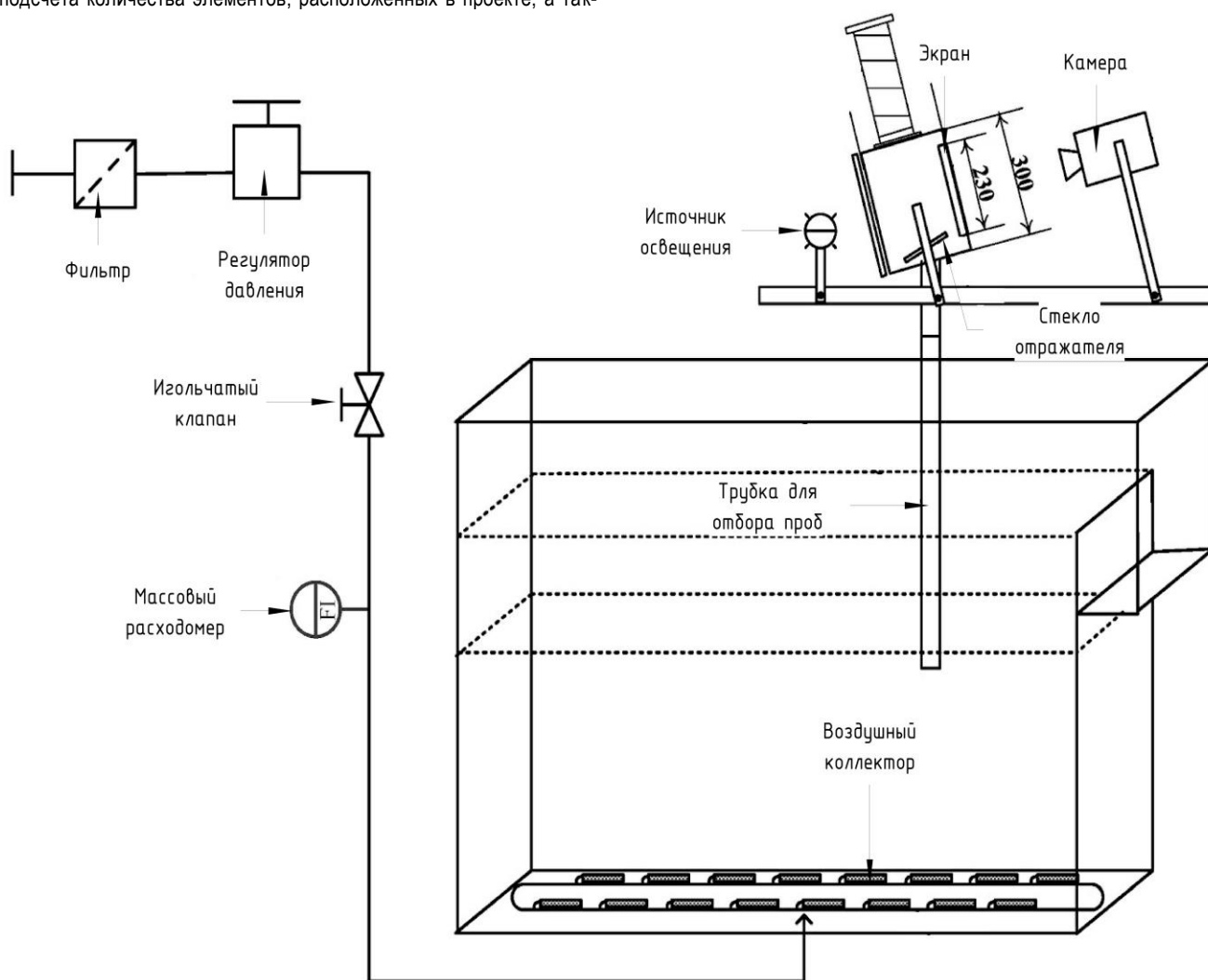


Рисунок 2 – Установка анализатора размера пузырьков Макгилла

Измерение размера пузырьков основано на принципах McGillBubbleSizer [19], который состоит из пробоотборной трубки, прикрепленной к наклонной смотровой камере. Трубка-пробоотборник погружается во флотационную камеру на определенный уровень для захвата отдельных пузырьков. Пузырьки поднимаются из флотационной камеры в трубку и в смотровую камеру, где

они распространяются по наклонной смотровой панели с подсветкой в один слой. Здесь они фотографируются с помощью цифровой видеокамеры.

В качестве подсветки рекомендуется использовать LED-экран с рассеивателем. Равномерная подсветка нужна для освещения пузырьков в жидкости с целью создания высококонтрастного изоб-

ражения. Условия освещения подбираются таким образом, чтобы обеспечить минимальное искажение формы пузырька, хорошую фокусировку и минимальное влияние отражений [19].

Следующим этапом является машинный анализ изображения на предмет геометрических характеристик пузырьков. Для этого используется специализированное программное обеспечение, например, ImageJ, MATLAB или Python с библиотеками OpenC. Полученные изображения подвергаются следующим процессам программной обработки:

- Предобработка изображений – включает коррекцию яркости, контрастности, шумоподавление и приведение изображения к серому уровню. Цель – выделить пузырьки на фоне, повысив качество последующего бинарного разделения.

- Бинаризация – преобразование изображения в чёрно-белое по порогу яркости, с целью выделения пузырьков в виде объектов (контуров) на однородном фоне. Используются методы глобального или адаптивного порогового преобразования, такие, как метод Канни или Sobel.

- Фильтрация объектов – на этом этапе отбрасываются шумовые объекты и артефакты, не соответствующие критериям формы и размера. Например, можно исключить объекты с площадью менее заданного значения или с аномальными значениями отношения периметра к площади (характерные для несферических образований).

- Измерение параметров пузырьков – рассчитываются следующие характеристики: эквивалентный диаметр (по площади), круглотность, площадь, периметр, координаты центра масс и др. Для каждого кадра формируется массив данных, содержащий информацию по всем обнаруженным пузырькам.

- Анализ дисперсности – полученные значения диаметра пузырьков агрегируются по частоте и представляются в виде гистограммы распределения. На основе гистограммы определяются основные статистические показатели: средний диаметр, медиана, мода, стандартное отклонение и коэффициент вариации. Возможно также представление результатов в виде функции плотности распределения или кумулятивной кривой.

Заключение

Безусловно можно сказать, что исследования, проводимые по методу № 2, являются более современными в части автоматизации обработки изображений. При этом следует отметить, что процесс машинной обработки изображений непрерывно совершенствуется. Одним из путей улучшения является использование методов обработки данных с использованием нейронных сетей [20]. Применение нейронных сетей позволяет получить более точные результаты вычислений за меньший промежуток времени, с использованием стандартных компьютерных мощностей. Однако использование этого метода требует создания более сложной конструкции испытательного стенда, а также наличия квалифицированных разработчиков и пользователей профильного программного обеспечения для компьютерной обработки фотоснимков, что в свою очередь является серьезным сдерживающим фактором для лабораторий, располагающих ограниченным финансированием. При этом наиболее важным фактором является то, что исследования размера пузырьков в данном методе является не во всем объеме газожидкостного факела, а только на небольшой выборке пузырей, которые попадают в трубку пробоотборник. Также одним из существенных минусов этого метода является то, что алгоритмы могут относительно точно подсчитывать средний диаметр пузыря при его форме, стремящейся к правильному шару или с небольшой эллиптичностью, однако при произвольной форме пузыря величина погрешности в расчетах резко увеличивается [20].

Работы по преодолению этого препятствия ведутся различными группами исследователей в Российской Федерации и за рубежом. Для точного распознавания пузырей произвольной формы нейронная сеть должна пройти обучение на тысячах или десятках тысяч исходных фотографий, точные данные по которым есть в распоряжении отладчиков нейронной сети. Это нужно для того, чтобы, сопоставляя заранее известные точные данные с данными, предоставленными нейронной сетью, иметь возможность указать ей на ее ошибки и вывести программный алгоритм на такой уровень, при котором она перестанет совершать эти ошибки. Как правило, специ-

алисты такого класса, которые обладают необходимыми компетенциями по программированию нейронных сетей и их обучению на столь высоком уровне, сосредоточены в крупных научных центрах или больших корпорациях, занимающихся разработкой передового программного обеспечения. Одним словом, это направление в изучении характеристик динамических газожидкостных систем является весьма перспективным, но требует наличия узкоспециализированных специалистов в области программирования нейронных сетей.

Таким образом, авторы статьи считают, что методика № 1 также является весьма актуальным способом изучения гидродинамических характеристик оборудования для получения газожидкостных систем. Неоспоримым преимуществом указанного метода является то, что получение данных о размере пузырьков производится без использования сложного и дорогостоящего программного обеспечения и основано на программном обеспечении, имеющемся в широком доступе. Также данный метод позволяет производить исследование газожидкостного факела по всему его объему, в том числе и в точке выхода пузырьков из азратора.

К минусам данного метода можно отнести то, что при съемке газожидкостного факела в объеме неизбежно будет возникать оптическое искажение пузырей, находящихся дальше от плоскости съемки. Данную погрешность в представленном методе удается частично компенсировать масштабированием изображения по двум калибровочным линейкам, которые находятся на внешней и внутренней стенке резервуара. Также следует отметить, что в этом методе имеется потенциальный изъян в виде небрежной работы исследователя при расстановке маркеров, при помощи которых ведется вычисление диаметра пузыря.

Исходя из всего вышесказанного, считаем, что применение метода № 1 при изучении размера пузырьков в турбулентных газожидкостных системах, при наличии ограниченного бюджета на создание испытательного стенда и разработку специализированного программного обеспечения, вполне оправдано.

Список цитированных источников

1. Перепелкин, К. Е. Газовые эмульсии / К. Е. Перепелкин, В. С. Матвеев. – Л.: Химия, 1979. – 164 с.
2. 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.
3. Ксенофонтов, Б. С. Использование процессов струйной азрации в процессах флотационной очистки сточных вод / Б. С. Ксенофонтов // Сантехника. – 2022. – № 6. – С. 32–37.
4. Анопольский, В. Н. Применение напорной флотации в технологии очистки природных и сточных вод / В. Н. Анопольский, Г. Н. Фелдштейн, Е. Г. Фельдштейн // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. – 2008. – № 8 (8). – С. 38–44.
5. Жерноклев, А. К. Аэрация и озонирование в процессах очистки воды / А. К. Жерноклев, Л. П. Пилиневич, В. В. Савич. – Минск: Тонпик, 2002. – 129 с.
6. Пенная сепарация и колонная флотация / Ю. Б. Рубинштейн, В. И. Мелик-Гайказян, Н. В. Матвеев, С. Б. Леонов. – М.: Недра, 1989. – 304 с.
7. Ксенофонтов, Б. С. Повышение эффективности струйной азрации в процессах флотационной очистки сточных вод / Б. С. Ксенофонтов // Сантехника. – 2020. – № 4. – С. 36–39.
8. Ксенофонтов, Б. С. Интенсификация флотационной очистки сточных вод с использованием струйных азраторов и эжекторов / Б. С. Ксенофонтов, Е. С. Стельмах // Водоочистка. – 2018. – № 6. – С. 25–35.
9. Мещеряков, Н. Ф. Флотационные машины и аппараты / Н. Ф. Мещеряков. – М.: Недра, 1982. – 200 с.
10. 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 Междуна. 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.

11. 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.
12. Пневмогидравлический диспергатор газа : пат. BY 12838 / С. Г. Белов, Г. О. Наумчик. – Оpubl. 28.02.2022.
13. Антонова, Е. С. Определение режима работы эжекционной флотационной установки для очистки сточных вод / Е. С. Антонова, В. О. Карпикова // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. – 2024. – № 4. – С. 400–421. – URL: <https://journals.rudn.ru/ecology/article/view/42522/24408> (дата обращения: 11.06.2025).
14. Левич, В. Г. Физико-химическая гидродинамика / В. Г. Левич. – Изд. 2-е, доп. и перераб. – М.: Физматгиз, 1959. – 699 с.: ил.
15. Grau, R. A. Visual technique for measuring bubble size in flotation machines / R. A. Grau, K. Heiskanen // Minerals Engineering. – 2002. – Vol. 15. – P. 507–513.
16. Акопян, В. Б. Основы взаимодействия ультразвука с биологическими объектами / В. Б. Акопян, Ю. А. Ершов; Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана. – М.: МГТУ имени Н. Э. Баумана, 2005. – 223 с.
17. Глембоцкий, В. А. Флотация : учебник для вузов по специальности «Обогащение полезных ископаемых» / В. А. Глембоцкий, В. И. Классен. – М.: Недра, 1973. – 384 с.
18. Белов, В. С. Разработка устройства для получения мелкой газожидкостной дисперсии гидродинамическим методом : дис. ... магистра техн. наук : 1–70 80 01 / Белов Вадим Сергеевич; Брестский государственный технический университет. – Брест, 2017. – 52 л.
19. Gas Dispersion Measurements McGill Bubble Viewer // McGill University. – URL: <https://www.mcgill.ca/minpro/our-laboratory/beneficiation-laboratory/gas-dispersion-measurements> (date of access: 11.06.2025).
20. Poletaev, I. Bubble patterns recognition using neural networks: Application to the analysis of a two-phase bubbly jet / I. Poletaev, M. P. Tokarev, K. S. Pervunin // International Journal of Multiphase Flow. – 2020. – Vol. 126. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301932219305701#bbib45> (date of access: 11.06.2025).
6. Pennaya separaciya i kolonnaya flotaciya / YU. B. Rubinshtejn, V. I. Melik-Gajkazyan, N. V. Matveenko, S. B. Leonov. – М.: Nedra, 1989. – 304 s.
7. Ksenofontov, B. S. Povyshenie effektivnosti strujnoj aeracii v processah flotacionnoj ochistki stochnyh vod / B. S. Ksenofontov // Santechnika. – 2020. – № 4. – С. 36–39.
8. Ksenofontov, B. S. Intensifikaciya flotacionnoj ochistki stochnyh vod s ispol'zovaniem strujnyh aeratorov i ezhektorov / B. S. Ksenofontov, E. S. Stel'mah // Vodoochistka. – 2018. – № 6. – С. 25–35.
9. Meshcheryakov, N. F. Flotacionnye mashiny i apparaty / N. F. Meshcheryakov. – М.: Nedra, 1982. – 200 s.
10. Belov, S. G. Pnevmoгидравлический диспергатор газа «Tornado» / S. G. Belov, G. O. Naumchik, E. I. Dmuhajlo // Aktual'nye nauchno-tekhnicheskie 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. – S. 7–12.
11. 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.
12. Пневмогидравлический диспергатор газа : пат. BY 12838 / С. Г. Белов, Г. О. Наумчик. – Оpubl. 28.02.2022.
13. Антонова, Е. С. Определение режима работы эжекционной флотационной установки для очистки сточных вод / Е. С. Антонова, В. О. Карпикова // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. – 2024. – № 4. – С. 400–421. – URL: <https://journals.rudn.ru/ecology/article/view/42522/24408> (дата обращения: 11.06.2025).
14. Левич, В. Г. Физико-химическая гидродинамика / В. Г. Левич. – Изд. 2-е, доп. и перераб. – М.: Физматгиз, 1959. – 699 с.: ил.
15. Grau, R. A. Visual technique for measuring bubble size in flotation machines / R. A. Grau, K. Heiskanen // Minerals Engineering. – 2002. – Vol. 15. – P. 507–513.
16. Акопян, В. Б. Основы взаимодействия ультразвука с биологическими объектами / В. Б. Акопян, Ю. А. Ершов; Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана. – М.: МГТУ имени Н. Э. Баумана, 2005. – 223 с.
17. Глембоцкий, В. А. Флотация : учебник для вузов по специальности «Обогащение полезных ископаемых» / В. А. Глембоцкий, В. И. Классен. – М.: Недра, 1973. – 384 с.
18. Белов, В. С. Разработка устройства для получения мелкой газожидкостной дисперсии гидродинамическим методом : дис. ... магистра техн. наук : 1–70 80 01 / Белов Вадим Сергеевич; Брестский государственный технический университет. – Брест, 2017. – 52 л.
19. Gas Dispersion Measurements McGill Bubble Viewer // McGill University. – URL: <https://www.mcgill.ca/minpro/our-laboratory/beneficiation-laboratory/gas-dispersion-measurements> (date of access: 11.06.2025).
20. Poletaev, I. Bubble patterns recognition using neural networks: Application to the analysis of a two-phase bubbly jet / I. Poletaev, M. P. Tokarev, K. S. Pervunin // International Journal of Multiphase Flow. – 2020. – Vol. 126. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301932219305701#bbib45> (date of access: 11.06.2025).

References

1. Perepelkin, K. E. Gazovye emul'sii / K. E. Perepelkin, V. S. Matveev. – L.: Himiya, 1979. – 164 s.
2. Zolotov, A. V. Sposoby polucheniya gazovoj dispersii v ob'eme zhidkosti / A. V. Zolotov, I. S. Bagreeva // Neftepererabotka i neftekhimiya. Nauchno-tekhnicheskie dostizheniya i peredovoj opyt. – 2017. – № 1. – С. 18–22.
3. Ksenofontov, B. S. Ispol'zovanie processov strujnoj aeracii v processah flotacionnoj ochistki stochnyh vod / B. S. Ksenofontov // Santechnika. – 2022. – № 6. – С. 32–37.
4. Anopol'skij, V. N. Primenenie napornoj flotacii v tekhnologii ochistki prirodnyh i stochnyh vod / V. N. Anopol'skij, G. N. Feld'shtejn, E. G. Fel'dshtejn // Vodoochistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzhenie. – 2008. – № 8 (8). – С. 38–44.
5. ZHernoklev, A. K. Aeraciya i ozonirovanie v processah ochistki vody / A. K. ZHernoklev, L. P. Pilnevich, V. V. Savich. – Minsk : Tonpik, 2002. – 129 s.

Материал поступил 23.06.2025, одобрен 14.07.2025, принят к публикации 15.07.2025