

ВЫБОР МЕТОДА ПОЛУЧЕНИЯ ГАЗО-ЖИДКОСТНОЙ ДИСПЕРСИИ ПРИ ВВЕДЕНИИ СРАВНИТЕЛЬНО ДОРОГОСТОЯЩИХ ГАЗОВ

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

¹ Д. г. н., 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 рассмотрены применяемые на практике методы получения газовых дисперсий. Описано оригинальное устройство для гидродинамического диспергирования газа высокотурбулентным потоком жидкости с целью получения мелкой газовой дисперсии, позволяющее эффективно вводить сравнительно дорогостоящие газы (кислород, озон) в обрабатываемую жидкость.

Ключевые слова: диспергация, аэрация, газо-жидкостная дисперсия, диспергатор.

CHOICE OF METHOD FOR OBTAINING GAS-LIQUID DISPERSION WHEN INTRODUCING COMPARATIVELY EXPENSIVE GASES

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

Abstract

The article discusses the methods used in practice to obtain gas dispersions. An original device for hydrodynamic gas dispersion by a highly turbulent liquid flow is described in order to obtain a fine gas dispersion, which allows for the effective introduction of relatively expensive gases (oxygen, ozone) into the liquid being processed.

Keywords: dispersion, aeration, gas-liquid dispersion, dispersant.

Введение

При обработке природных и сточных вод, а также в различных отраслях промышленного производства и сельского хозяйства часто возникает потребность получения мелких газовых дисперсий со средним диаметром пузырьков менее 1 мм [1–5]. С уменьшением диаметра пузырьков возрастает межфазная поверхность и, следовательно, увеличивается эффективность следующих про-

цессов: растворение озоносодержащих газовых смесей в водных системах, растворение кислорода в окситенках и в прудах при промышленном рыбоводстве, процесс очистки воды методом флотации, процесс пенной сепарации на горно-обогатительных предприятиях и т. д. Выполнены многочисленные исследования и разработки в данной области [1–3, 5–7], однако задача получения мелких газовых дисперсий до настоящего времени решена не полностью, поэтому исследования в данной области остаются актуальными [1, 2, 6, 7].

Методы получения диспергированной газовой фазы (ДГФ) классифицируют следующим образом [7]:

1. Пневматический метод (барботирование), при котором подача газа осуществляется через затопленные пористые перегородки.
2. Механический метод, при котором диспергирование газа производится при помощи мешалок различных конструкций.
3. Гидравлический метод, при котором используются эжектирующее и диспергирующее действие струй жидкости.
4. Физико-химический метод, основан на газировании жидкости, происходит за счет выделения газа из пересыщенного раствора при изменении его растворимости, а также при протекании химической или электрохимической реакции.

Существуют комбинированные методы получения ДГФ – пневмомеханический и пневмогидравлический [8–12].

Анализ методов диспергирования

Сущность процесса пневматической диспергации заключается в пропуске газа через затопленные диспергирующие устройства (барботёры), расположенные, как правило, у дна камеры диспергирования [4]. Обычно в качестве диспергирующих устройств применяют перфорированные или пористые элементы [13]. С помощью диспергирующих устройств подаваемый газ дробится на пузыри, которые распределяются в объеме жидкости и служат источником насыщения жидкости газом, а также вызывают направленную циркуляцию жидкости [4, 13].

Пневматические диспергаторы можно применять как в открытых, так и в закрытых сооружениях. По заглублению диспергаторы пневматической системы подразделяют на диспергаторы малого (до 1,5 м), среднего погружения (1,8...6,0 м) и глубинные диспергаторы (глубина погружения более 6,0 м). Пневматический метод классифицируют по характеру диспергационной полосы. Различают диспергацию сплошной полосой и очаговую. Диспергация с помощью фильтров при их сплошной укладке относится к диспергации сплошной полосой, а диспергация с помощью статических или трубных диспергаторов относится к очаговой. По давлению газа на выходе из устройства различают системы низкого (до 9,8 кПа), среднего (от 9,8 до 49 кПа) и высокого (свыше 49 кПа) давления [4, 7].

Для подачи газа в системы высокого давления используют компрессоры, в системы среднего давления газ подается газодувками, в системах низкого давления используют высоконапорные вентиляторы [4].

По размеру образующихся на выходе из распределительных устройств пузырьков газа пневматические диспергаторы подразделяются на четыре типа: беспузырчатые, мелкопузырчатые, среднепузырчатые и крупнопузырчатые. В беспузырчатой системе диспергации газ растворяется полностью или имеет пузырьки размером меньше 0,25 мм. В мелкопузырчатой системе должны находиться пузырьки диаметром 1...4 мм, в среднепузырчатой – диаметром 5...10 мм и в крупнопузырчатой – диаметром более 10 мм [4, 7].

В беспузырчатой системе аэрации газ (воздух, озон или кислород) растворяется полностью или имеет пузырьки размером меньше 0,25 мм. Беспузырчатые диспергаторы представляют собой перфорированные пластины с отверстиями или порами размером меньше 0,25 мм. Применение беспузырчатой системы аэрации наиболее эффективно, так как чем мельче размер пузырьков, тем выше площадь поверхности раздела фаз «газ-жидкость», но необходимо уделять больше внимания эксплуатации диффузоров [4, 6, 7, 13]. Такие системы аэрации не получили широкого распространения ввиду сложности получения пузырьков воздуха размером 0,25 мм, из-за коалесценции пузырьков, происходящей даже при выходе газа из пластин с отверстиями или порами, имеющими средний диаметр менее 0,25 мм [6, 7].

К мелкопузырчатым диспергаторам относятся тканевые (рамные, тарельчатые, решетчатые), пластиковые (диффузоры, сарановые трубки и чехлы из пластмассовых тканей), металлические диффузоры (клапанные и керамические). В качестве керамических диспергаторов используют однослойные и двухслойные фильтросные пластины, керамические трубы, диффузоры в виде куполов, дисков и грибов [13]. К среднепузырчатым диспергаторам принадлежат перфорированные трубы, спарджеры, щелевые, купольные с седельчатым клапаном и тарельчатые диспергаторы, подводные диспергаторы с рассеивающим распределителем, цилиндрические диспергаторы с кольцевым направляющим конусом, пневматические диспергаторы с направляющим кожухом, диспергаторы-эрлифты и т. д. Крупнопузырчатыми являются диспергаторы в виде открытых снизу вертикальных труб диаметром 50 мм или сопел, а также статические и трубные спиральные диспергаторы, трубные диспергаторы с чередующимися пластинчатыми элементами [4, 13].

Пневматический (барботажный) метод обладает наибольшей энергетической эффективностью из всех методов получения газо-жидкостных дисперсий [3, 4, 6, 7]. 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 [4, 6, 7, 13]. 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 [2, 4, 6, 7]. Причем уменьшение диаметра отверстий или пор диспергатора не приводит к заметному снижению среднего диаметра пузырьков газа. Данная закономерность обусловлена балансом сил при формировании пузырьков газа [2, 4, 6, 7].

Сущность процесса механической диспергации состоит в вовлечении в жидкость газа при помощи ротора. Это вовлечение может осуществляться как за

счет разбрызгивания ротором жидкости в виде тонкой пленки, так и за счет захвата воздуха при гидравлическом прыжке, а также за счет разрежения в зоне действия механического диспергатора. В зависимости от типа применяемого диспергатора один из способов вовлечения превалирует над другим [6, 7].

Для механического диспергирования газовой фазы применяют различного вида аппараты, снабженные мешалками с лопастями, которые попеременно то погружаются в жидкость, то выходят из нее [6, 7]. Мешалки могут быть вращающимися или движущимися возвратно-поступательно. Однако в чистом виде метод механического диспергирования газовой фазы применяют редко, т. к. «замешивание» газовой фазы в жидкую малоэффективно [6, 7].

На практике чаще всего используют комбинированный метод, заключающийся в том, что газы вводятся барботажным методом в виде пузырей с последующим их дополнительным диспергированием мешалками [6–9]. При этом газовая фаза образуется либо при истечении газов из барботера, расположенного ниже мешалки, либо газ падает прямо в мешалку, снабженную отверстиями [8, 9]. Такого типа устройства особенно часто используют для флотационной очистки жидкостей или при флотационном обогащении минералов [1, 2, 16].

Дальнейшего диспергирования грубодисперсной газовой эмульсии можно добиться продавливанием ее через тонкие капилляры, пористые пластинки или узкие щели. В отдельных случаях можно применять встряхивания жидкости в сосуде, часть объема которого заполнена газовой фазой. Возможно также использовать и другие методы, применяемые для получения эмульсий типа «жидкость-жидкость» [2, 6, 7].

Метод механического диспергирования применяют только для получения газовых эмульсий в маловязкой дисперсной среде. По мере роста вязкости увеличение гидродинамического сопротивления и уменьшение скоростей потоков резко снижают эффективность данного метода [6, 7].

Механических диспергаторы наиболее часто применяют в малых и средних по производительности очистных сооружениях, а также в водоемах с целью улучшения их самоочищающей способности, в рыбоводческих прудах и при доочистке биологически очищенных сточных вод в биологических прудах [6, 7].

Механический метод получения ДГФ является самым энергозатратным в сравнении с другими методами, 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 [6, 7]. 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 [2, 4, 6, 7], для получения более мелких пузырьков необходимо в газожидкостную систему добавлять ПАВ, что часто неприемлемо.

Гидравлический метод диспергации основан на насыщении жидкости газом за счёт захвата газа падающими струями (каплями) жидкости или за счёт захвата газа жидкостью, движущейся через суженные участки инжектирующих

устройств. К разновидностям данного метода относятся аэрирование эжекторами, циклонами и поверхностными струями [10, 16].

Принцип захвата газа струями (каплями) жидкости реализован в конструкциях самотечных аэраторов (водосливные аэраторы, градири, быстроток, аэрационные решетки). При их работе используется энергия насоса или перепада воды в реках. Эффективность аэраторов в редких случаях достигает 1,2 кг O_2 /кВт·ч [4, 10]. Они применяются в основном для обезжелезивания, доочистки сточных вод и насыщения водоёмов кислородом воздуха.

Принцип захвата жидкостью газа, движущегося через суженные участки инжектирующих устройств, использован в аэраторах инжекторного типа, называемых иногда аэраторами Бернулли [10]. К ним относятся эжекторы, трубы Вентури, кольцевые сопла, шахтные водосливы, гидромеханические аэраторы и другие аналогичные им струйные аппараты [4, 10].

При работе этих диспергаторов происходит смешение и обмен энергии двух потоков разных давлений с образованием смешанного потока с промежуточным давлением. Подаваемая в аппарат при более высоком давлении среда называется рабочей. Поток, увлекаемый аппаратом за счёт вакуума при высоких скоростях движения жидкости в суженном сечении, называется инжектируемым. При этом в качестве рабочей среды используется жидкость, в качестве инжектируемой – газ [10].

При инжекторной диспергации подача газа может осуществляться при помощи газожидкостных струй, падающих на свободную поверхность жидкости – поверхностные диспергаторы («кольцевые сопла», шахтные водосливы, «погружные струи», разбрызгивающие розетки и форсунки), и за счёт подачи инжектируемого газа под уровень жидкости – погружные диспергаторы. Последние могут быть установлены вертикально и горизонтально. Ряд инжекторных устройств можно использовать как поверхностные и как погружные диспергаторы. Такие диспергаторы следует называть поверхностно-погружными. подача газожидкостной смеси в жидкость от этих диспергаторов может осуществляться как через открытые концы труб, так и при помощи различных распределителей [4, 10].

Особый интерес представляет применение струйных аппаратов для аэрации сточных вод в шахтных и башенных аэротенках. Так как при этом достигается высокий процент использования кислорода [4].

Применять инжекторные диспергаторы целесообразно в небольших очистных сооружениях. Разработка диспергаторов с меньшими удельными затратами электроэнергии на растворение кислорода позволяет использовать их и для сооружений большей производительности. Такие диспергаторы можно устанавливать для аэрации воды в водоемах и биологических прудах, а также для подземного обезжелезивания водопроводной воды и т.п. Использование инжекторных диспергаторов при очистке сточных вод в аэротенках позволяет отказаться от сложных устройств, а при аэрации воды в биопрудах и водоемах от плавающих аэраторов. Основным элементом инжекторных диспергаторов является насос, что значительно упрощает эксплуатацию сооружений [4].

Эжекторные устройства имеют более высокую энергетическую эффективность 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 [4, 10]. 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 водоснабжения и водоотведения не нашли широко применения. Диспергирование поверхностными струями почти в два раза эффективнее по затратам энергии по сравнению с механическим диспергированием [2, 4, 6, 14, 15], 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 $30\text{--}60^\circ$ 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 [1, 2, 4, 6, 7].

При физико-химическом методе диспергации газирование жидкости происходит либо за счет выделения газа из пресыщенного раствора, либо при протекании химической или электрохимической реакции [17, 18].

Газирование жидкости происходит за счет выделения газа из пересыщенного раствора при изменении его растворимости, основано на использовании повышенного давления или вакуума для создания пересыщенного раствора [7, 17]. 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), причем они формируются непосредственно на поверхности гидрофобных частиц, что обеспечивает высокую эффективность использования данного метода при флотации [7, 17]. Недостатками метода является сложное аппаратное оформление, повышенные затраты энергии, ограниченная степень газирования, которая зависит от растворимости газа при рабочем давлении. Например, растворимость воздуха в воде составляет около 30...50 л воздуха в 1 м³ воды в интервале 0,3...0,5 МПа [7, 17].

Газирование жидкости за счет выделения газа 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 [7, 18, 19]. 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 [7, 18, 19].

На кафедре водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов Брестского государственного технического университета предложен пневмогидравлический метод диспергирования газа высокотурбулентным потоком жидкости в пористой трубе. Данный метод разрабатывается для получения мелких газовых дисперсий с диаметром пузырьков менее 1 мм, необходимых в

процессах флотации, озонирования, обескислороживания. В отличие от выше-рассмотренных 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 [11, 12, 20].

Принцип данного метода диспергирования поясняется на рисунке 1.

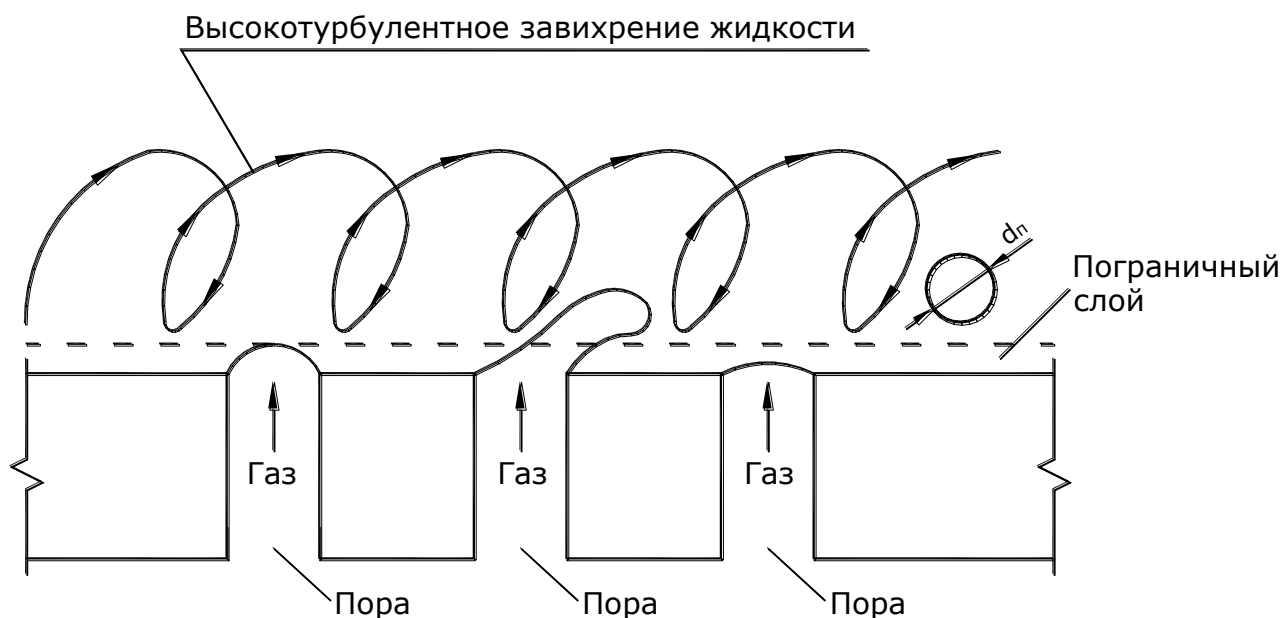
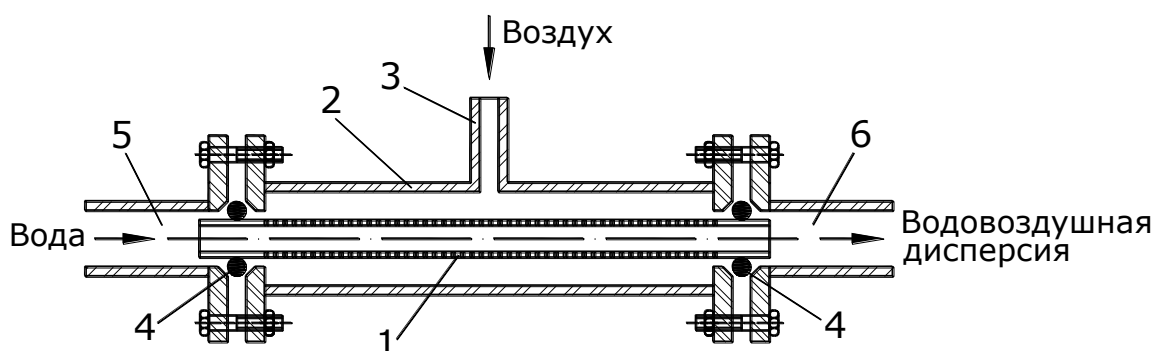


Рисунок 1 – Схема образования пузырька газа при выходе из единичной поры в быстродвижущейся жидкости

На условия отрыва пузырька в потоке быстродвижущейся 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 можно использовать экспериментальное устройство, конструкция которого приведена на рисунке 2.



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

Рисунок 2 – 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 [11, 12, 20].

Заключение

Сравнение различных систем диспергирования газа показывает, что наименьшими энергетическими затратами на диспергирование обладает барботажный метод, однако он позволяет получать только сравнительно крупные газовые дисперсии. Механическое и гидродинамическое диспергирование газа позволяет получать более мелкие газовые дисперсии, но при более высоких удельных затратах энергии. Наиболее мелкие газовые дисперсии получаются при выделении газа в результате его выделения из раствора или при проведении электрохимической реакции на электродах. Однако недостатками данного метода являются невозможность получения больших удельных расходов газа (при выделении воздуха из водного раствора – 30...50 литров на один метр кубический воды, а при осуществлении электрохимической реакции на электродах газовыделение ограничено предельной плотностью тока), большими затратами энергии, ограничением химического состава получаемых газовых дисперсий. Поэтому является актуальной разработка метода диспергирования газа, сочетающего в себе такие преимущества, как невысокие затраты энергии и мелкий диаметр получаемых пузырьков, который позволит эффективно диспергировать газ в обрабатываемую жидкость.

По мнению авторов наиболее предпочтительным является пневмогидравлический метод, так как требует невысоких 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.).

Список использованных 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. Пилинович, В. В. Савич. – Минск : Тонпик, 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. 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.
9. 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.
10. Лямаев, Б. Ф. Гидроструйные насосы и установки / Б. Ф. Лямаев. – Л. : Машиностроение, 1988. – 256 с.
11. 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.
12. Пневмогидравлический диспергатор газа : пат. ВУ 12838 / С. Г. Белов, Г. О. Наумчик. – Оpubл. 28.02.2022.
13. Сивак, В. М. Аэраторы для очистки природных и сточных вод / В. М. Сивак, Н. Е. Янушевский. – Львов : Вища школа, 1984. – 124 с.
14. Ксенофонтов, Б. С. Использование процессов струйной аэрации в процессах флотационной очистки сточных вод / Б. С. Ксенофонтов // Сантехника. – 2022. – № 6. – С. 32–37.
15. Ксенофонтов, Б. С. Повышение эффективности струйной аэрации в процессах флотационной очистки сточных вод / Б. С. Ксенофонтов // Сантехника. – 2020. – № 4. – С. 36–39.
16. Ксенофонтов, Б. С. Интенсификация флотационной очистки сточных вод с использованием струйных аэраторов и эжекторов / Б. С. Ксенофонтов, Е. С. Стельмах // Водоочистка. – 2018. – № 6. – С. 25–35.
17. 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.
18. Гафаров, Г. А. Электрофлотационная очистка сточных вод от нефтепродуктов / Г. А. Гафаров // Водоснабжение и канализация. – 2011. – № 5. – С. 80–83.
19. Кинетика электрофлотационной очистки судовых сточных вод от нефтепродуктов / И. А. Минаева, В. А. Колесников, Ю. И. Капустин, Е. В. Матвеева // Химическая промышленность сегодня. – 2009. – № 10. – С. 32–38.
20. 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.