

CFD-моделирование вертикальной камеры электрофлотации на основе экспериментальных данных

Рецензия эксперта на статью получена
17.03.2026 [The expert review of the article
was received on March 17, 2026]

Развитие методов вычислительной гидродинамики (Computational Fluid Dynamics, CFD) существенно расширило возможности исследования и проектирования сооружений для очистки сточных вод. Методы CFD применяются для анализа структуры потоков, распределения скоростей, зон рециркуляции и гидравлических неоднородностей, а также для обоснования конструктивных и режимных решений в аппаратах водоочистки и очистки сточных вод [1]. В отечественной научнотехнической литературе численные и математические методы также применяются при исследовании сооружений биологической очистки, в том числе аэротенков. В работах В. И. Баженова и соавторов рассматривались вопросы использования компьютерной симуляции гидродинамики потоков для оптимизации конструкции аэротенка, а также математического моделирования биологической очистки сточных вод с учётом гидродинамических и нестационарных условий [2, 3].

Особенно целесообразно применение CFD в тех случаях, когда эффективность аппарата определяется внутренней гидродинамикой, а прямое экспериментальное изучение процессов в рабочем объёме затруднено. Это в полной мере относится к газожидкостным и электрохимическим системам очистки сточных вод, для которых результат процесса зависит от локального распределения скоростей, давления, газовой фазы и траекторий движения дисперсных частиц. Для электрохимических реакторов в литературе отмечается, что развитие расчётных моделей необходимо как для интерпретации протекающих процессов, так и для последующего масштабирования и совершенствования конструкции аппаратов. Необ-

ходимость изучения газовых дисперсий во флотационных камерах для повышения эффективности очистки воды отмечена Е. В. Алексеевым [4].

Для флотационных аппаратов гидродинамика имеет определяющее значение, поскольку структура течения и распределение пузырьков влияют на вероятность контакта газовой фазы с извлекаемыми загрязнениями, время пребывания пузырьков в объёме и условия разделения фаз. На сегодняшний день накоплен определённый опыт CFD-моделирования установок напорной флотации, где численные расчёты использовались для анализа течения, распределения пузырьков и сопоставления расчётных результатов с экспериментальными измерениями [6]. Эти работы важны прежде всего как подтверждение применимости CFD-подхода к исследованию внутренних процессов во флотационных аппаратах [6].

Вместе с тем электрофлотация имеет ряд особенностей, отличающих её от других флотационных процессов. Газовая фаза в электрофлотаторе образуется непосредственно на поверхности электродов в результате электролиза, а интенсивность газовыделения определяется режимом работы аппарата, в частности силой тока. Преимущества электрофлотации во многом связаны с генерацией мелких пузырьков, однако вопросы численного описания гидродинамики электрофлотаторов и распределения газовой фазы в их объёме освещены в литературе существенно слабее, чем для систем напорной флотации [5].

Таким образом, актуальной задачей является разработка CFD-модели электрофлотатора, опирающейся на экспериментальные данные по выходу газа.

УДК: 628.316.12. Научная специальность: 2.1.4.

CFD-моделирование вертикальной камеры электрофлотации на основе экспериментальных данных

Ярослав Артурович Глушков, аспирант, кафедра «Водоснабжение и водоотведение», Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)

Рассмотрена разработка CFD-модели лабораторного электрофлотатора на основе экспериментальных данных по выходу газа. Экспериментально определена зависимость выхода газа от силы тока, использованная для задания параметров газовой фазы в расчётной модели. В результате моделирования получены распределения скорости и траектории движения пузырьков газа в рабочем объёме аппарата. Показано, что в электрофлотаторе формируется циркуляционная структура течения с восходящими потоками в пристеночных областях и нисходящим движением жидкости в центральной части. Установлена несимметричность поля скоростей и распределения пузырьков, вероятно связанная с нарушением регулярности электродного пакета. Показано, что разработанная модель может использоваться для анализа гидродинамики электрофлотатора и оценки влияния конструкции аппарата на распределение газовой фазы.

Ключевые слова: электрофлотация, электрофлотатор, CFD-моделирование, гидродинамика, газовыделение, дискретная фаза, пузырьки газа, распределение скоростей, очистка сточных вод.

UDC: 628.316.12. Scientific specialty number: 2.1.4.

CFD simulation of a vertical electrofloatation cell based on experimental data

Yaroslav Ar. Glushkov, postgraduate student, the Department of Water supply and water disposal, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University)

This article discusses the development of a CFD model of a laboratory electrofloatation unit based on experimental data on gas yield. The dependence of gas yield on current density was experimentally determined and used to specify the gas-phase parameters in the computational model. The simulation results yielded distributions of the velocity and trajectories of gas bubbles within the unit's working volume. It is shown that a circulation flow structure forms in the electrofloatation cell, with upward flows in the wall regions and downward liquid motion in the central part. An asymmetry in the velocity field and bubble distribution was established, likely associated with irregularities in the electrode pack. It is shown that the developed model can be used to analyze the hydrodynamics of the electrofloatator and to assess the influence of the apparatus design on the distribution of the gas phase.

Key words: electrofloatation, electrofloatator, CFD simulation, hydrodynamics, gas release, discrete phase, gas bubbles, velocity distribution, wastewater treatment.

Использование таких данных при постановке задачи позволяет связать параметры газовой фазы с реальным режимом работы аппарата и тем самым повысить физическую обоснованность модели. Это, в свою очередь, даёт возможность анализировать характеристики, которые трудно определить прямым экспериментом: распределения скоростей и давления, траектории движения пузырьков, зоны рециркуляции и особенности переноса газовой фазы в рабочем объёме аппарата [1, 4].

Целью данной работы является разработка и проверка CFD-модели вертикальной камеры электрофлотации на основе экспериментальных данных по выходу газа. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: получены и обобщены экспериментальные данные по выходу газа при различных значениях силы тока; сформирована расчётная область, соответствующая внутреннему объёму камеры; выполнено задание параметров газовой фазы на основе экспериментальных данных; проведён численный расчёт гидродинамики аппарата; выполнен анализ распределений скоростей, давления и траекторий движения пузырьков газа; дана оценка применимости разработанной модели для описания процессов в электрофлотаторе [4, 5].

Экспериментальные исследования проводились на лабораторной установке электрофлотации. К пакету электродов, размещённому в нижней части камеры, от источника постоянного тока подводилось электрическое питание. Для контроля силы тока в электрическую цепь был включён амперметр. Измерение выхода газа осуществлялось с помощью мерного цилиндра, предварительно заполненного водой и установленного в ёмкость. Газовая смесь, образующаяся в процессе электролиза, отводилась из камеры флотации по трубке в мерный цилиндр, где по объёму вытесненной воды определялся выход газа.

Серия измерений была выполнена на лабораторном электрофлотаторе, заполненном 5 л воды, при различных значениях силы тока. Полученные экспериментальные данные по выходу газа в зависимости от силы тока представлены в табл. 1. Поскольку при электрофлотации интенсивность газовыделения определя-

ется режимом электролиза, экспериментально установленный выход газа может рассматриваться как один из ключевых параметров для последующего задания газовой фазы в расчётной модели. Такой подход позволяет связать численное описание процесса с реальными характеристиками работы аппарата, что особенно важно при моделировании электрохимических систем очистки воды [4, 5].

Применение CFD целесообразно, когда эффективность аппарата определяется внутренней гидродинамикой, а прямое экспериментальное изучение процессов в рабочем объёме затруднено. Это относится к газожидкостным и электрохимическим системам очистки сточных вод

После завершения экспериментальных исследований была разработана гидродинамическая модель лабораторного электрофлотатора. Построение модели включало несколько последовательных этапов: подготовку геометрии расчётной области, генерацию расчётной сетки, задание граничных условий, выполнение численного расчёта и последующую обработку результатов.

На первом этапе была сформирована трёхмерная геометрическая модель внутреннего пространства камеры электрофлотации. В расчётную область были включены объём жидкости, внутренние стенки аппарата, поверхности электродов и область выхода газа. Такой подход соответствует общепринятой практике CFD-моделирования аппаратов очистки сточных вод, при которой основное внимание уделяется описанию течения в рабочем объёме и корректному заданию границ, определяющих структуру потока [1].

На следующем этапе по построенной геометрии была сформирована расчётная сетка. Поверхностная сетка создавалась с минимальным и максимальным размером ячейки 0,5 и 5 мм, соответственно. После выделения характерных зон, включая область ввода газовой фазы и объём

жидкости, была сформирована объёмная сетка из многогранных ячеек с максимальным размером элемента 6 мм. Для уточнения описания течения вблизи твёрдых границ дополнительно задавались три приграничных слоя. Общее число ячеек составило 979 586. Сетка оценивалась по показателям ортогонального качества и отношения сторон ячеек. Минимальное значение ортогонального качества составило 0,217, максимальное значение отношения сторон ячейки — 49,55. Полученные параметры можно считать допустимыми для выполнения расчёта и последующего анализа гидродинамической структуры потока. Локальное измельчение сетки вблизи электродов и стенок аппарата обусловлено повышенными градиентами скорости в этих областях [1, 7].

При моделировании камеры электрофлотации жидкая фаза рассматривалась как сплошная среда, а газовая — как дискретная фаза, представленная пузырьками газовой смеси, образующейся в процессе электролиза.

Для описания турбулентного движения жидкости использовалась модель $k-\epsilon$, широко применяемая при расчёте внутренних течений в инженерных аппаратах благодаря вычислительной устойчивости и приемлемой точности при анализе интегральной структуры потока. Газовая фаза задавалась в лагранжевой постановке путём инъекции дискретных частиц с поверхности электродов. Для дискретной фазы задавались свойства газовой смеси и параметры ввода пузырьков в расчётную область. Такой подход позволяет анализировать траектории движения пузырьков, особенности их переноса потоком жидкости и неравномерность распределения газовой фазы в объёме аппарата [1, 7].

Граничные условия задавались в соответствии с конструкцией аппарата и наблюдаемыми особенностями эксперимента. Для жидкой фазы на твёрдых стенках аппарата принималось стандартное условие прилипания. Для дискретной газовой фазы на всех твёрдых границах, включая поверхности электродов и внутренние стенки флотационной камеры, задавалось условие отражения частиц, необходимое для корректного описания отрыва пузырьков от поверхности электродов. Поскольку в расчётной постановке поверхностные свойства стенок не учитывались, а в эксперименте заметного удержания пузырьков у стенок не наблюдалось, влиянием их возможного прилипания на данном этапе можно было пренебречь. Верхняя часть расчётной области соответствовала зоне выхода газа из аппарата.

⌘ Экспериментальные данные по выходу газа при различных значениях силы тока табл. 1

№	Сила тока, А	Выход газа, мл/мин.
1	1,36	12,44
2	1,16	10,09
3	0,99	9,09
4	0,87	7,74

№	Сила тока, А	Выход газа, мл/мин.
5	0,67	5,79
6	0,48	4,18
7	0,18	1,89

Параметры ввода дискретной фазы определялись по экспериментальным данным о выходе смеси водорода и кислорода при силе тока 1,36 А. Скорость инъекции рассчитывалась как отношение измеренного расхода газа к суммарной площади поверхности пакета электродов. При этом предполагалось, что газовыделение равномерно распределено по поверхности электродного пакета, участвующей в процессе электролиза. Тем самым характеристики газовой фазы в модели были связаны с реальным режимом работы камеры электрофлотации, а не задавались произвольно, что повышает физическую обоснованность расчётной постановки.

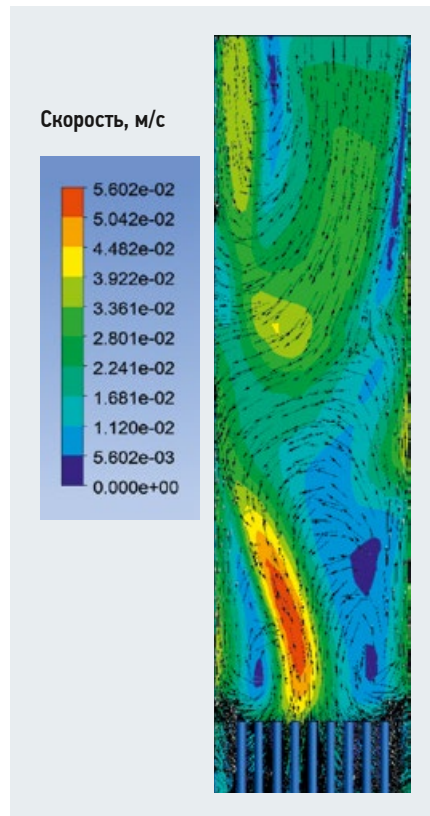
Отметим, что для электрохимических реакторов именно связь между интенсивностью газообразования, током и гидродинамикой рассматривается как один из ключевых факторов, определяющих структуру потока и распределение дисперсной фазы [4, 5, 7].

После задания расчётной области, сетки и граничных условий выполнялся стационарный численный расчёт. По достижении сходимости решения проводилась обработка результатов моделирования. В качестве основных результатов были получены распределения скорости и давления в характерных сечениях флотационной камеры, а также траектории движения газовых пузырьков.

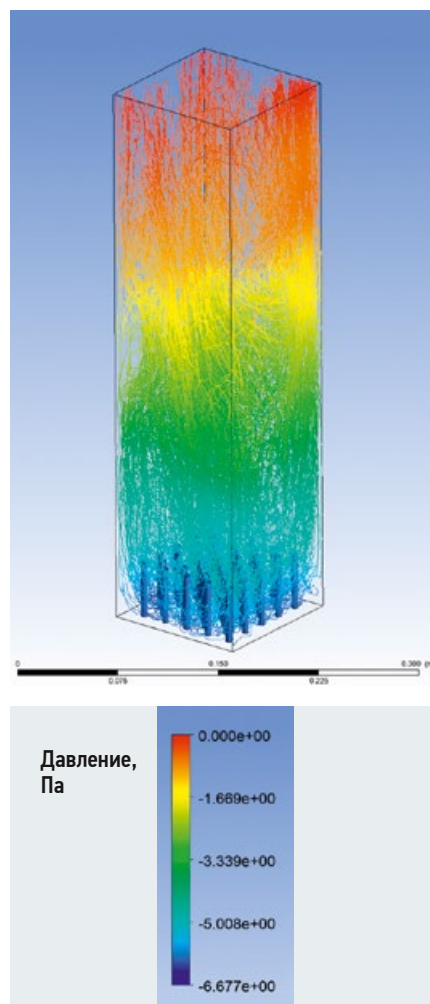
Анализ указанных данных позволяет выявить особенности гидродинамической структуры потока, оценить наличие зон рециркуляции и проследить характер распределения газовой фазы в рабочем объёме аппарата, что представляет практический интерес при исследовании и дальнейшем совершенствовании конструкции камеры [1, 7].

Результаты численного моделирования показали, что в рабочем объёме камеры электрофлотации формируется выраженная циркуляционная структура течения. В продольном сечении аппарата наблюдается восходящее движение жидкости в пристеночных областях и нисходящий поток в центральной части объёма (рис. 1). Подобная организация течения в целом соответствует физике газожидкостных флотационных систем, для которых движение жидкости во многом определяется подъёмной силой, создаваемой восходящими пузырьками газа, и возникающей вследствие этого рециркуляцией потока [8].

Вместе с тем рассчитанное поле скоростей имеет заметно несимметричный характер. На одной стороне аппарата формируется локальная область повышенных скоростей, тогда как противополож-



:: Рис. 1. Распределение скоростей и векторное поле в продольном сечении вертикальной камеры электрофлотации



:: Рис. 2. Траектории движения пузырьков газа в объёме вертикальной камеры электрофлотации

ная часть сечения характеризуется менее интенсивным восходящим движением и смещением центральной рециркуляционной зоны.

Полученная асимметрия течения, по-видимому, связана с нарушением регулярности электродного пакета вследствие отсутствия одного из стержней. При такой конфигурации можно ожидать локального перераспределения интенсивности газовыделения по площади электродного блока, что, в свою очередь, должно приводить к неравномерному распределению подъёмной силы и перестройке общей гидродинамической картины. В литературе по электрохимическим реакторам также отмечается, что расположение электродов, интенсивность газообразования и характеристики пузырьков относятся к числу факторов, в наибольшей степени влияющих на структуру потока в аппарате [7].

Следует, однако, отметить, что выполненный расчёт позволяет уверенно зафиксировать сам факт асимметрии гидродинамического режима, но не даёт возможности строго доказать, что её единственной причиной является отсутствие одного электродного стержня. Для окончательного подтверждения этой гипотезы целесообразно выполнить сравнительное моделирование для симметричной конфигурации электродного пакета при прочих равных условиях. Тем не менее наблюдаемое смещение восходящего потока и нарушение симметрии рециркуляционных зон хорошо согласуются с предположением о влиянии геометрической неоднородности нижнего электродного узла на структуру течения.

Траектории движения пузырьков газа (рис. 2) подтверждают выявленную неравномерность гидродинамического поля. Пузырьки распределяются по объёму аппарата неодинаково: в одних зонах наблюдается более интенсивный восходящий перенос газовой фазы, тогда как в других плотность траекторий заметно ниже. Это указывает на неравномерное газонаполнение рабочего объёма камеры.

Такой результат является закономерным, поскольку движение пузырьков в лагранжевой постановке определяется не только их плавучестью, но и структурой течения сплошной фазы, включая локальные зоны рециркуляции и области пониженных скоростей.

Для флотационных аппаратов именно распределение пузырьков и связанная с ним неоднородность газовой фазы рассматриваются как один из ключевых факторов, определяющих условия разделения и эффективность процесса [8, 9].

С практической точки зрения полученные результаты позволяют предположить наличие в объёме флотационной камеры зон с пониженной обеспеченностью газовой фазой. В таких областях условия для контакта пузырьков с извлекаемыми загрязнениями могут быть менее благоприятными по сравнению с участками, где траектории пузырьков более плотны и восходящий перенос выражен сильнее. Важно подчеркнуть, что в рамках настоящей модели непосредственно не рассчитывалось взаимодействие пузырьков с частицами загрязнений, поэтому речь идёт не о количественной оценке степени извлечения, а о гидродинамической предпосылке к возможной неравномерности эффективности флотации по объёму аппарата. Подобный подход соответствует общепринятой практике CFD-анализа водоочистных систем, когда моделирование используется прежде всего для выявления зон, потенциально неблагоприятных с точки зрения массообмена и разделения фаз [1, 9, 10].

Таким образом, выполненное моделирование показало, что гидродинамика исследуемой камеры электрофлотации определяется не только общими закономерностями газожидкостного течения, но и особенностями конструкции электродного блока. Выявленная асимметрия поля скоростей и связанная с ней неравномерность распределения пузырьков указывают на возможность локального ухудшения условий флотации в отдельных зонах аппарата. Это позволяет рассматривать разработанную модель как инструмент для анализа влияния конструктивных дефектов и геометрических особенностей электродного пакета на структуру потока и распределение газовой фазы в рабочем объёме флотационной камеры [7, 8].

Заключение

В работе представлены результаты экспериментального исследования выхода газа и разработки CFD-модели лабораторного электрофлотатора, предназначенной для анализа гидродинамической структуры потока и распределения газовой фазы в рабочем объёме аппарата. Расчётная постановка была сформирована на основе экспериментальных данных по выходу газа при различных значениях силы тока, что позволило связать параметры ввода газовой фазы с реальным режимом работы установки.

Результаты моделирования показали, что в объёме камеры электрофлотации формируется циркуляционная структура течения, характерная для флотационных аппаратов: восходящее движение

жидкости развивается в пристеночных областях, тогда как в центральной части наблюдается нисходящий поток. Установлено, что в исследуемой конфигурации поле скоростей и траектории движения пузырьков имеют несимметричный характер. Вероятной причиной выявленной асимметрии является нарушение регулярности электродного пакета, обусловленное отсутствием одного из стержней, что

Полученные результаты следует рассматривать как начальный этап дальнейших исследований. Перспективными направлениями дальнейшей работы являются выполнение дополнительных расчётов для других значений скорости ввода газовой фазы, учёт возможного удержания и прилипания пузырьков у твёрдых границ, а также переход к более детальным многофазным моделям

приводит к неравномерному газовыделению и соответствующему перераспределению гидродинамических характеристик в объёме аппарата.

Показано, что неравномерность структуры потока сопровождается неравномерным распределением газовой фазы в рабочем объёме флотационной камеры. Это позволяет предположить наличие зон с пониженным локальным газонаполнением, в которых условия для контакта пузырьков с извлекаемыми загрязнениями являются менее благоприятными. Тем самым разработанная модель позволяет выявлять потенциально неэффективные зоны аппарата без необходимости прямого экспериментального наблюдения внутренней картины течения.

Теоретическая значимость работы состоит в применении подхода, при котором параметры дискретной газовой фазы задаются на основе экспериментально определённого выхода газа. Это обеспечивает более тесную связь расчётной модели с реальным электрохимическим режимом работы аппарата. Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности использования разработанной модели для анализа влияния конфигурации электродного пакета и геометрии аппарата на структуру течения и распределение пузырьков.

Полученные результаты следует рассматривать как начальный этап дальнейших исследований. Перспективными направлениями дальнейшей работы являются выполнение дополнительных расчётов для других значений скорости ввода газовой фазы, учёт возможного удержания и прилипания пузырьков у твёрдых границ, а также переход к более детальным многофазным моделям. Следующим этапом исследований может стать расчёт проточной камеры электрофлотации для той же геометрической конфигурации, что позволит перейти от анализа замкнутого объёма к моделированию аппарата в условиях реального движения жидкости.

В прикладном отношении дальнейшие исследования могут быть направлены на разработку новой конструкции электрофлотатора с более рациональной геометрией ёмкости и оптимизированным электродным пакетом. Использование моделирования методами вычислительной гидродинамики (CFD) в сочетании с экспериментальными данными по газовыделению может служить эффективным инструментом для обоснования таких конструктивных решений, оценки их влияния на равномерность газораспределения и повышения эффективности процесса электрофлотации. ●

1. Samstag R.W., Ducoste J.J., Griborio A., Nopens I., Batstone D.J., Wicks J.D., Saunders S., Wicklein E.A., Kenny G., Laurent J. CFD for wastewater treatment: An overview. *Water Science and Technology*. 2016. Vol. 74. Issue 3. Pp. 549–563.
2. Баженов В.И., Эпов А.Н., Гусаров О.С. Применение метода компьютерной симуляции гидродинамики потоков для оптимизации конструкции аэротенка // *Водоснабжение и канализация*, 2009. №3. С. 47–55.
3. Баженов В.И., Устюжанин А.В. Математическая модель биологической очистки сточных вод с учётом гидродинамических и нестационарных условий // *Вестник ИрНИТУ*, 2014. №11. С. 128–133.
4. Alekseev E.V. The formation of a dispersed gas system in the flotation cells. *E3S Web of Conferences*. 2009. Vol. 126. Issue 1. No. 00069.
5. Kyzas G.Z., Matis K.A. Electroflotation process: A review. *Journal of Molecular Liquids*. 2016. Vol. 220. Pp. 657–664.
6. Bondelind M., Sasic S., Kostoglou M., Bergdahl L., Pettersson Th.J.R. Single-and two-phase numerical models of

- dissolved air flotation: Comparison of 2D and 3D simulations. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2010. Vol. 365. Issue 1–3. Pp. 137–144.
 7. Bannari R., Hilali Y., Essadki A., Bannari A. Computational fluid dynamic for improving design and performance of an external loop airlift reactor used in electrochemical wastewater treatment. *SN Applied Sciences*. 2019. Vol. 1. No. 1497.
 8. Kostoglou M., Karapantsios T.D., Matis K.A. CFD model for the design of large scale flotation tanks for water and wastewater treatment. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2007. Vol. 46. Issue 20. Pp. 6590–6599.
 9. Satpathy K., Rehman U., Cools B., Verdickt L. CFD-based process optimization of a dissolved air flotation system for drinking water production. *Water Science and Technology*. 2020. Vol. 81. Issue 8. Pp. 1668–1681.
 10. Muñoz-Alegria J.A., Muñoz-España E., Flórez-Marulanda J.F. Dissolved air flotation: A review from the perspective of system parameters and uses in wastewater treatment. *Tecnológicas*. 2021. Vol. 24. Issue 52. Pp. 281–303.
- References — see page 78.

CFD simulation of a vertical electrofloatation cell based on experimental data.
Pp. 18–21.

Yaroslav Ar. Glushkov, postgraduate student, the Department of Water supply and water disposal, National Research Moscow State University of Civil Engineering

1. R.W. Samstag, J.J. Ducoste, A. Griborio, I. Nopens, D.J. Batstone, J.D. Wicks, S. Saunders, E.A. Wicklein, G. Kenny, J. Laurent. CFD for wastewater treatment: An overview. *Water Science and Technology*. 2016. Vol. 74. Issue 3. Pp. 549–563.
2. V.I. Bazhenov, A.N. Epov, O.S. Gusarov. *Primenenie metoda komp'yuternoy simulyatsii gidrodinamiki potokov (CFD) dlya optimizatsii konstruksii aerotlenka* [Application of the method of computer simulation of flow hydrodynamics (CFD) for optimization of the aeration tank design]. *Vodosnabzhenie i kanalizatsiya* [Water Supply and Sewerage]. 2009. No. 3. Pp. 47–55.
3. V.I. Bazhenov, A.V. Ustyuzhanin. *Matematicheskaya model' biologicheskoy ochistki stokov s uchetom gidrodinamicheskikh i nestatsionarnykh uslovij* [Mathematical model of biological wastewater treatment taking into account hydrodynamic and non-stationary conditions]. *Vestnik IrNITU* [Bulletin of the Irkutsk National Research Technical University]. 2014. No. 11. Pp. 128–133.
4. E.V. Alekseev. The formation of a dispersed gas system in the flotation cells. *E3S Web of Conferences*. 2009. Vol. 126. Issue 1. No. 00069.
5. G.Z. Kyzas, K.A. Matis. Electroflotation process: A review. *Journal of Molecular Liquids*. 2016. Vol. 220. Pp. 657–664.
6. M. Bondelind, S. Sasic, M. Kostoglou, L. Bergdahl, Th.J.R. Pettersson. Single- and two-phase numerical models of dissolved air flotation: Comparison of 2D and 3D simulations. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2010. Vol. 365. Issue 1–3. Pp. 137–144.
7. R. Bannari, Y. Hilali, A. Essadki, A. Bannari. Computational fluid dynamic for improving design and performance of an external loop airlift reactor used in electrochemical wastewater treatment. *SN Applied Sciences*. 2019. Vol. 1. No. 1497.
8. M. Kostoglou, T.D. Karapantsios, K.A. Matis. CFD model for the design of large scale flotation tanks for water and wastewater treatment. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2007. Vol. 46. Issue 20. Pp. 6590–6599.
9. K. Satpathy, U. Rehman, B. Cools, L. Verdict. CFD-based process optimization of a dissolved air flotation system for drinking water production. *Water Science and Technology*. 2020. Vol. 81. Issue 8. Pp. 1668–1681.
10. J.A. Muñoz-Alegria, E. Muñoz-España, J.F. Flórez-Marulanda. Dissolved air flotation: A review from the perspective of system parameters and uses in wastewater treatment. *Tecnológicas*. 2021. Vol. 24. Issue 52. Pp. 281–303.