

УДК 628.351
DOI 10.35776/VST.2026.08.03

Современные исследования влияния поверхностно-активных веществ на перенос кислорода в аэрационных системах

М. М. Пукемо¹, А. А. Кадысева²



М. М. Пукемо



А. А. Кадысева

¹ Пукемо Михаил Михайлович, кандидат технических наук, председатель совета директоров, Alta Group 115280, Россия, Москва, Автозаводская ул., 25, стр. 10, e-mail: 2336122@alta-group.ru

² Кадысева Анастасия Александровна, доктор биологических наук, доцент, профессор кафедры строительства систем и сооружений водоснабжения и водоотведения, Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе 117485, Россия, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 23, e-mail: kadyseva@mail.ru

Для цитирования: Пукемо М. М., Кадысева А. А. Современные исследования влияния поверхностно-активных веществ на перенос кислорода в аэрационных системах // Водоснабжение и санитарная техника. 2026. № 8. С. 23–31. DOI: 10.35776/VST.2026.08.03.

Представлен обзор современных мировых исследований, посвященных влиянию поверхностно-активных веществ на перенос кислорода в системах аэрации сточных вод. Систематизированы данные о механизмах воздействия ПАВ на объемный коэффициент массопереноса k_{La} , включая снижение коэффициента массопередачи жидкой фазы k_L на 20–70%, образование диффузионных барьеров на границе раздела фаз, изменение размеров пузырьков и межфазной поверхности. Показано, что альфа-фактор для мелкопузырчатых аэраторов при обработке городских сточных вод составляет 0,4–0,8 и существенно зависит от концентрации ПАВ. Рассмотрены различия в воздействии анионных, ка-

тионных, неионогенных и амфотерных ПАВ, а также био-ПАВ. Обсуждаются нестандартные эффекты, включая возможное повышение эффективности переноса кислорода в присутствии ПАВ при определенных условиях. Сформулированы практические рекомендации по проектированию систем аэрации с учетом содержания ПАВ в сточных водах и определены ключевые направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: сточные воды, поверхностно-активные вещества, перенос кислорода, коэффициент массопереноса, альфа-фактор, аэрация, критическая концентрация мицеллообразования.

WASTEWATER TREATMENT

Recent research on the effect of surfactants on oxygen transfer in aeration systems

М. М. Pukemo¹, А. А. Kadyseva²

¹ Pukemo Mikhail, Ph. D. (Engineering), Alta Group Chairman of Board of Directors Block 10, 25 Avtozavodskaya St., Moscow, 115280, Russian Federation, e-mail: 2336122@alta-group.ru

For citation: Pukemo M. M., Kadyseva A. A. Resent research on the effect of surfactants on oxygen transfer in aeration systems. *Vodosnabzhenie i Sanitarnaya Tekhnika*, 2026, no. 8, pp. 23–31. DOI: 10.35776/VST.2026.08.03. (In Russian).

A review of the recent global research on the effect of surfactants on oxygen transfer in wastewater aeration systems is presented. The data on the mechanisms of surfactants affecting the volumetric mass transfer coefficient k_{La} , including a 20–70% reduction in the liquid phase mass transfer coefficient k_L , the formation of diffusion barriers at the interface, and changes in bubble size and interfacial surface area are systematized. It is shown that the alpha factor for fine-bubble aerators in the process of municipal wastewater treatment ranges from 0.4 to 0.8 and significantly depends on the surfactant concentration. The differences in the effects of anionic, cationic, nonionic, and amphoteric surfactants, as well as biosurfactants, are examined. Outsize effects are discussed, including possible increasing of oxygen transfer efficiency in the presence of surfactants under certain conditions. Practical recommendations for designing aeration systems with account of the surfactant concentration in wastewater are formulated; and the key areas for further research are identified.

Key words: wastewater, surfactants, oxygen transfer, mass transfer coefficient, alpha factor, aeration, critical micelle concentration.

Введение

Биологическая очистка сточных вод с помощью активного ила является наиболее распространенной технологией обработки городских и промышленных стоков во всем мире, включая Российскую Федерацию. Центральным элементом данной технологии является система аэрации, обеспечивающая подачу кислорода, необходимого для жизнедеятельности аэробных микроорганизмов активного ила. Аэрация представляет собой один из наиболее энергоемких процессов на сооружениях биологической очистки сточных вод. По различным оценкам, затраты на аэрацию составляют от 40 до 60% общего энергопотребления очистных сооружений [1; 2], что делает оптимизацию систем подачи воздуха ключевой задачей при проектировании и эксплуатации станций водоочистки.

Эффективность переноса кислорода из газовой фазы в жидкую определяется комплексом факторов, среди которых особое место занимает состав обрабатываемых сточных вод. Поверхностно-активные вещества (ПАВ) являются повсеместными загрязнителями городских и промышленных сточных вод, поступающими с бытовыми стоками (синтетические моющие средства, средства личной гигиены, бытовая химия), а также с производственными сточными водами текстильной, пищевой, нефтехимической и фармацевтической промышленности [3]. Типичные концентрации ПАВ в городских сточных водах составляют 1–20 мг/л, тогда как в промышленных стоках они могут достигать 50–100 мг/л и выше [4; 5]. В условиях современного города, где потребление синтетических моющих средств неуклонно возрастает, содержание ПАВ в городских стоках имеет тенденцию к увеличению.

ПАВ, адсорбируясь на границе раздела фаз «газ — жидкость», существенно изменяют процессы массопереноса кислорода, что выражается в снижении объемного коэффициента массопе-

реноса k_{La} и, соответственно, альфа-фактора — отношения k_{La} в реальных сточных водах к k_{La} в чистой воде. Согласно систематическому обзору, охватившему 54 исследования [4], снижение коэффициента массопереноса жидкой фазы k_L может составлять от 20 до 70%, что приводит к значительному перерасходу энергии на аэрацию. Данная проблема имеет как экономическое (увеличение эксплуатационных затрат), так и экологическое (повышение углеродного следа очистных сооружений) значение.

Несмотря на многочисленные исследования, проведенные в последние десятилетия, комплексный обзор современного состояния знаний о влиянии ПАВ на массоперенос кислорода в системах аэрации сточных вод, учитывающий последние публикации 2020–2026 годов, в отечественной литературе отсутствует. Целью настоящего обзора является систематизация современных данных о влиянии различных типов ПАВ на перенос кислорода, анализ механизмов этого влияния, рассмотрение диапазонов альфа-фактора для различных типов аэрационного оборудования и условий эксплуатации, а также формулирование практических рекомендаций для проектирования и эксплуатации аэрационных систем с учетом содержания ПАВ в обрабатываемых сточных водах.

Методы

Работа представляет собой систематический обзор и критический анализ литературных данных, опубликованных в рецензируемых научных журналах за период 1985–2026 годов. Поиск источников проводился в базах данных Scopus, Web of Science, Google Scholar и eLibrary по ключевым словам: «поверхностно-активные вещества», «перенос кислорода», «коэффициент массопереноса», «альфа-фактор», «аэрация», «сточные воды», «surfactants», «oxygen

transfer», «mass transfer coefficient», «alpha factor», «aeration», «wastewater». Глубина поиска охватывала фундаментальные работы, заложившие теоретические основы (модели Льюиса—Уитмана, Хигби, Данквертса), и современные исследования 2020–2026 годов с акцентом на экспериментальные данные, полученные на лабораторных, пилотных и полномасштабных установках. Анализировались работы, содержащие количественные оценки влияния ПАВ на k_{La} , k_L , a и альфа-фактор, а также исследования гидродинамики пузырьков и механизмов адсорбции [1–31].

Данные систематизированы по следующим категориям: тип ПАВ (анионные, катионные, неионогенные, амфотерные, биогенные), тип аэрационного оборудования (мелкопузырчатые диффузоры, крупнопузырчатые аэраторы, поверхностные аэраторы, эжекторные аэраторы), тип сточных вод (городские, промышленные, модельные растворы), а также гидродинамические условия (глубина погружения, интенсивность перемешивания, размер пузырьков). Для анализа зависимостей использовались теоретические модели массопереноса и эмпирические корреляции, предложенные в оригинальных работах.

Результаты и обсуждение Теоретические основы переноса кислорода и механизмы влияния ПАВ

Перенос кислорода из газовой фазы в жидкую представляет собой процесс массопередачи через границу раздела фаз, движущей силой которого является разность между концентрацией насыщения и текущей концентрацией растворенного кислорода. Скорость этого процесса описывается основным уравнением массопереноса [6]:

$$dC/dt = k_{La}(C_s - C), \quad (1)$$

где C — текущая концентрация растворенного кислорода в жидкой фазе, мг/л; C_s — концентрация насыщения кислорода, мг/л; k_{La} — объемный коэффициент массопереноса, с⁻¹; t — время, с.

$$k_{La} = k_L a, \quad (2)$$

где k_L — коэффициент массопередачи жидкой фазы, м/с, характеризующий интенсивность переноса кислорода через единицу площади межфазной поверхности; a — удельная межфазная поверхность, м²/м³, определяющая площадь контакта газовой и жидкой фаз в единице объема аппарата.

Для теоретического описания массопередачи на границе раздела фаз предложен ряд моделей. Двухпленочная модель Льюиса—Уитмана (1924 г.) предполагает существование неподвиж-

ных ламинарных пленок по обе стороны границы, через которые перенос осуществляется молекулярной диффузией. Для кислорода основное сопротивление сосредоточено в жидкой пленке:

$$k_L = D/\delta, \quad (3)$$

где D — коэффициент молекулярной диффузии кислорода в воде; δ — толщина жидкой пленки [6].

Модель обновления поверхности Хигби (1935 г.) учитывает периодическую замену жидкости у поверхности:

$$k_L = 2(D/\pi\tau)^{0.5}. \quad (4)$$

Данная модель лучше описывает процессы массопереноса при турбулентном режиме течения жидкости вблизи поверхности пузырьков [10].

Модель случайного обновления Данквертса (1951 г.) вводит частоту обновления s :

$$k_L = (Ds)^{0.5}. \quad (5)$$

Согласно этой модели, чем выше турбулентность у поверхности, тем чаще происходит обновление и тем выше k_L [10]. Именно механизм обновления поверхности наиболее существенно подавляется при адсорбции ПАВ, что объясняет значительное снижение k_L .

Анализ механизмов влияния ПАВ показывает, что их воздействие носит комплексный характер. С одной стороны, ПАВ адсорбируются на границе раздела фаз «газ — жидкость», формируя мономолекулярные пленки, которые создают дополнительный диффузионный барьер для молекул кислорода и снижают k_L . Снижение k_L в присутствии ПАВ составляет от 20 до 70% в зависимости от типа и концентрации ПАВ, а также от гидродинамических условий [4; 18]. Важнейшим механизмом является эффект Маранго-ни — возникновение градиентов поверхностного натяжения вдоль поверхности пузырька, приводящее к иммобилизации границы раздела фаз и подавлению конвективного массопереноса [10; 19]. Согласно моделям Хигби и Данквертса, ПАВ подавляют турбулентные пульсации вблизи поверхности и снижают скорость обновления поверхностных элементов, что эквивалентно снижению параметра s (частоты обновления), и, соответственно, k_L [20].

Sardeing и соавторы [21] выделили три характерные зоны по диаметру пузырьков, в которых влияние ПАВ на k_L существенно различается. Для пузырьков диаметром менее 1,5 мм поверхность практически полностью иммобилизована ПАВ, пузырьки ведут себя как жесткие сферы с

неподвижной поверхностью, значение k_L составляет порядка 10^{-4} м/с и слабо зависит от концентрации ПАВ. В переходной зоне (диаметр 1,5–3,5 мм) поведение определяется балансом между сорбцией ПАВ и гидродинамическими силами; k_L чувствителен к концентрации и типу ПАВ. Для пузырьков диаметром более 3,5 мм влияние ПАВ ослаблено вследствие интенсивных гидродинамических возмущений [21]. Это объясняет тот факт, почему мелкопузырчатые аэраторы (генерирующие пузырьки диаметром 2–5 мм) наиболее подвержены влиянию ПАВ, а крупнопузырчатые – менее чувствительны.

С другой стороны, ПАВ оказывают существенное влияние на удельную межфазную поверхность a . Адсорбция молекул ПАВ создает электростатический или стерический барьеры, препятствующие коалесценции пузырьков [18; 22]. Подавление коалесценции приводит к сохранению мелких пузырьков на протяжении всего пути их подъема. В работе Prades-Mateu и соавторов [18] показано, что анионные ПАВ, такие как додецилсульфат натрия (SDS), снижают средний диаметр пузырьков (d_{32}) в колонне с мелкопузырчатым диффузором на величину до 50%, что приводит к значительному увеличению a , поскольку $a = 6\epsilon g/d_{32}$. Газосодержание также возрастает в присутствии ПАВ: увеличение составляет приблизительно 2% на каждый мг/л SDS [18].

García-Figueroa и соавторы [13] исследовали взаимосвязь между гидрофобностью бензолсодержащих ПАВ и их способностью подавлять коалесценцию пузырьков. Введенная авторами концепция HCIC (hydrophobicity coalescence inhibition connection) позволяет количественно оценить эффективность подавления коалесценции различными ПАВ на основании их молекулярной структуры и гидрофобности.

Таким образом, возникает характерный **парадокс**: ПАВ одновременно увеличивают a (через уменьшение размера пузырьков и подавление коалесценции) и снижают k_L (через формирование адсорбционных барьеров и эффект Марангони). Суммарный эффект по формуле (2) определяется соотношением этих двух противоположных тенденций. В большинстве практических случаев суммарный эффект является отрицательным, т. е. снижение k_L превышает увеличение a , что приводит к снижению общей эффективности массопереноса [4; 18; 22].

Ключевым параметром, определяющим поведение ПАВ в растворе, является критическая концентрация мицеллообразования (ККМ) – концентрация, при которой молекулы ПАВ начинают образовывать мицеллы.

Зависимость снижения k_{La} от концентрации ПАВ носит нелинейный характер с выходом на плато при концентрациях, существенно ниже критической концентрации мицеллообразования. Mateus и соавторы [16] установили, что максимальное снижение k_{La} при добавлении SDS составляет 41% и достигается уже при концентрации 0,07 мМ, что значительно ниже критической концентрации мицеллообразования SDS в водопроводной воде (1,57 мМ). Авторами предложена математическая модель:

$$\beta = \beta_{\max} - \beta_{\max} \exp(-\mu C_{\text{SDS}}), \quad (6)$$

где $\beta_{\max} = 0,41$ – максимальное относительное снижение k_{La} ; $\mu = 19,3 \text{ мМ}^{-1}$ – коэффициент, характеризующий скорость нарастания эффекта с увеличением концентрации ПАВ; C_{SDS} – молярная концентрация SDS, мМ [16].

Физическое объяснение связано с изотермой адсорбции: при низких концентрациях степень заполнения поверхности быстро возрастает, а выше ККМ избыточные молекулы образуют мицеллы в объеме, не участвуя в адсорбции [16; 20].

Для характеристики снижения эффективности массопереноса в реальных сточных водах по сравнению с чистой водой используется альфа-фактор [1]:

$$\alpha = k_{La(\text{сточная вода})} / k_{La(\text{чистая вода})}. \quad (7)$$

Альфа-фактор существенно зависит от типа аэрационного оборудования. Мелкопузырчатые диффузоры, характеризующиеся высокой эффективностью переноса кислорода в чистой воде (SOTE 25–35%), наиболее подвержены влиянию ПАВ: типичные значения α составляют 0,4–0,8 [1; 11]. Крупнопузырчатые аэраторы менее чувствительны: $\alpha = 0,7–0,9$ [1; 2]. Поверхностные (механические) аэраторы характеризуются диапазоном $\alpha = 0,6–1,2$ [1; 2]. В табл. 1 обобщены данные о значениях альфа-фактора для различных типов оборудования и сточных вод.

Rosso и Stenstrom установили, что α пропорционален $(\sigma/\sigma_0)^{1,85}$, где σ – динамическое поверхностное натяжение сточной воды, σ_0 – поверхностное натяжение чистой воды [1]. Schwarz и соавторы [12] показали, что среднее значение α при мониторинге полномасштабных очистных сооружений составляет 0,7 с неопределенностью измерений $\pm 3,7\%$.

Особый интерес представляют данные о значениях альфа-фактора в двухступенчатых системах активного ила. В работе Schwarz и соавторов [11] на первой ступени (высоконагружаемая биологическая очистка) среднее значение α составило 0,45 (минимум 0,33, максимум 0,54).

Таблица 1

Тип аэратора	Тип сточных вод	α (диапазон)	Источник
Мелкопузырчатый диффузор	Городские	0,4–0,8	[1; 11]
Мелкопузырчатый диффузор (первая ступень)	Городские (высоконагружаемая биологическая очистка)	0,33–0,54	[11]
Мелкопузырчатый диффузор (вторая ступень)	Городские (нитрификация)	0,69–0,91	[11]
Крупнопузырчатый аэратор	Городские	0,7–0,9	[1; 2]
Поверхностный аэратор	Городские	0,6–1,2	[11]
Мелкопузырчатый диффузор	Промышленные (высокое содержание ПАВ)	0,25–0,4	[1; 5]
Эжекторный аэратор (Вентури)	Вода с ПАВ (SDS)	$> 1^*$	[23]
Аэрируемая лагуна (первая ступень)	Городские	0,68	[15]
Аэрируемая лагуна (четвертая ступень)	Городские	0,91	[15]
* Возможно увеличение k_{La} до 60% за счет интенсивного диспергирования пузырьков.			

На второй ступени (нитрификация) средний альфа-фактор составил 0,8 (минимум 0,69, максимум 0,91). Различие средних значений α между ступенями составляет 0,35 (78% относительного увеличения). Это объясняется тем, что ПАВ и основная масса органических соединений удаляются преимущественно на первой ступени посредством сорбции на хлопьях активного ила и биологического окисления [3; 11]. Mitru и соавторы [3] показали, что эффективность удаления ПАВ в системе активного ила может достигать 90–97%.

Альфа-фактор не является постоянной величиной и существенно варьирует во времени. Schwarz и соавторы [15] разработали подход к динамическому прогнозированию α с использованием методов машинного обучения (random forest, gradient boosting). Суточные вариации α обусловлены изменениями состава поступающих сточных вод: в периоды пиковых расходов увеличение нагрузки по ПАВ приводит к снижению α . В системах лагунной очистки α закономерно возрастает от первой к последней лагуне: от 0,68 до 0,91 [15].

В табл. 2 представлены данные о влиянии различных типов ПАВ на коэффициент массопередачи k_L .

Анионные ПАВ являются наиболее изученной группой. Значения k_L в присутствии SDS

варьируют в широком диапазоне — от $1,6 \cdot 10^{-4}$ до $3,52 \cdot 10^{-3}$ м/с [4]. Длина углеводородной цепи существенно влияет на способность снижать массоперенос: ПАВ с более длинными цепями оказывают более выраженное воздействие при меньших молярных концентрациях [4; 22]. Masutani и Stenstrom [23] показали, что динамическое поверхностное натяжение является лучшим предиктором снижения массопереноса, чем равновесное.

Неионогенные ПАВ (Тритон X-100, Твин 80, Плурионик F68) занимают растущую долю рынка моющих средств, однако их влиянию на массоперенос кислорода посвящено лишь 13% исследований [4]. Механизм воздействия отличается от ионогенных отсутствием электростатических взаимодействий, однако объемные полиоксидиленовые группы создают значительный стерический барьер [17].

Катионные ПАВ (СТАВ, НТАС) наименее изучены — им посвящено лишь 7,4% исследований [4]. Они обладают выраженными антимикробными свойствами, что может дополнительно влиять на активность микроорганизмов активного ила.

БиоПАВ — поверхностно-активные вещества микробного или растительного происхождения (рамнолипиды, сапонины, липопептиды) — являются наименее изученной группой: лишь 5,6%

Таблица 2

Тип ПАВ	Представители	Снижение k_L , %	Доля исследованных, %	Источник
Анионные	SDS, SDBS, LAS, ABS	20–70	31	[4; 16; 18]
Неионогенные	Triton X-100, Tween 80, Pluronic F68	15–50	13	[4; 17]
Катионные	СТАВ, НТАС	10–45	7,4	[4]
Амфотерные	САРВ, бетаины	5–30	—	[14]
Биосурфактанты (биоПАВ)	Рамнолипиды, сапонины, липопептиды	5–25	5,6	[4]

исследований посвящены их влиянию на массоперенос кислорода [4]. Имеющиеся данные свидетельствуют о том, что биоПАВ вызывают менее выраженное снижение k_L по сравнению с синтетическими ПАВ [4].

Нестандартные эффекты и новые данные

Наряду с хорошо документированным негативным влиянием ПАВ, в литературе описан ряд случаев повышения эффективности переноса кислорода при определенных условиях. Campbell и Wang [24] показали, что добавление SDS в концентрации 10 мг/л привело к увеличению ОТЕ при возрасте ила (SRT) 10 и 20 суток. При концентрации SDS 50 мг/л наблюдалось увеличение ОТЕ при SRT = 20 суток, однако снижение — при SRT = 40 суток. Ключевым выводом является то, что морфологические параметры активного ила (средний размер хлопьев, фрактальная размерность), а не концентрация SDS как таковая, являются наиболее значимыми факторами [24]. ПАВ, изменяя структуру хлопьев ила (дефлокуляция), могут снижать вязкость иловой смеси и улучшать доступ кислорода к клеткам микроорганизмов.

Therrien и соавторы [25] установили, что SDS увеличивает k_{La} на величину до 60% в аэраторах эжекторного типа (Вентури). Этот эффект объясняется тем, что в аэраторах Вентури основным механизмом является дробление газовой фазы, и ПАВ, подавляя коалесценцию образовавшихся мелких пузырьков, усиливает эффект диспергирования. В результате увеличение α значительно превышает снижение k_L , что приводит к общему увеличению k_{La} [25].

Xia и соавторы [14] исследовали влияние амфотерного биоПАВ CAPB (кокоамидопропилбетаин) на процесс аэробной стабилизации избыточного активного ила. Было показано, что CAPB способствует повышению эффективности аэробного сбраживания за счет улучшения доступности субстрата для микроорганизмов путем разрушения хлопьевой структуры ила и солюбилизации органических веществ [14].

Практические рекомендации для проектирования

На основании проведенного анализа литературных данных могут быть сформулированы следующие практические рекомендации для проектирования систем аэрации сточных вод с учетом влияния ПАВ.

Выбор расчетного значения альфа-фактора. При проектировании мелкопузырчатых аэрационных систем для городских сточных вод с ти-

пичным содержанием ПАВ (1–20 мг/л) рекомендуется принимать $\alpha = 0,50–0,65$ при стандартной глубине погружения аэраторов (4–6 м) [1; 11]. Для одноступенчатых систем с полным удалением азота целесообразно принимать $\alpha = 0,55$ в качестве консервативной оценки. При снижении глубины погружения аэраторов (например, до 2 м) сокращается время контакта фаз «газ — жидкость», что при наличии ПАВ приводит к более существенному ингибирующему эффекту, чем на стандартных глубинах. Для проектируемой системы с глубиной погружения аэраторов 2 метра рекомендуется принимать $\alpha = 0,45–0,55$ (консервативно 0,5) [26]. Для промышленных сточных вод с высоким содержанием ПАВ (более 20 мг/л) следует использовать расчетные значения $\alpha = 0,25–0,4$, причем в каждом конкретном случае рекомендуется проведение натурных испытаний [1; 5].

Влияние глубины погружения. Увеличение глубины аэрационных сооружений (более 6 м) приводит к дополнительному накоплению ПАВ на поверхности пузырьков за счет более длительного времени контакта, что может дополнительно снижать эффективность массопереноса [1]. При проектировании глубоких аэрационных бассейнов рекомендуется использовать пониженные значения α или проводить специальные испытания.

Преимущества двухступенчатых схем. Двухступенчатая схема биологической очистки обладает существенным преимуществом: удаление ПАВ и органических загрязнителей на первой ступени позволяет повысить α на второй ступени (нитрификация) до 0,69–0,91 [11]. При этом на первой ступени, где α составляет 0,33–0,54, может быть целесообразно применение крупнопузырчатых или эжекторных аэраторов, менее подверженных влиянию ПАВ.

Энергетические последствия. Снижение альфа-фактора имеет прямые экономические последствия. Уменьшение α с 0,8 до 0,4 приводит к удвоению требуемого расхода воздуха и соответствующему росту энергопотребления.

Выбор типа аэратора. Для сточных вод с высоким содержанием ПАВ целесообразно рассмотреть применение аэраторов эжекторного типа (Вентури), для которых показана возможность увеличения k_{La} в присутствии ПАВ [25], или крупнопузырчатых аэраторов, характеризующихся более высокими значениями α [1].

Мониторинг и адаптивное управление. Необходимость проведения натурных испытаний для определения α не может быть переоценена. Schwarz и соавторы [12] продемонстрировали

возможность мониторинга методом *ex situ* off-gas с точностью $\pm 3,7\%$. Использование методов машинного обучения [15] для прогнозирования α на основе оперативных данных открывает возможность адаптивного управления аэрацией.

Направления дальнейших исследований

Проведенный обзор позволил выявить ряд существенных пробелов в современных знаниях, определяющих приоритетные направления дальнейших исследований.

Биосурфактанты (биоПАВ). Влияние биоПАВ на массоперенос кислорода остается практически неизученным: лишь 3 из 54 проанализированных исследований были посвящены данной теме [4]. Необходимо систематическое изучение рамнолипидов, сапонинов и липопептидов в условиях, имитирующих реальные аэрационные системы.

Масштабный разрыв (лаборатория — производство). Существует значительный разрыв между лабораторными исследованиями и данными натурных наблюдений. Большинство исследований проведены на лабораторных установках с модельными растворами индивидуальных ПАВ, тогда как реальные сточные воды представляют собой сложные многокомпонентные системы [4; 15]. Проведение исследований на полномасштабных и пилотных установках с реальными сточными водами является критически важным.

Сложные водные матрицы. Влияние комбинированных городских и промышленных сточных вод, содержащих смеси различных типов ПАВ в сочетании с другими загрязнителями (масла, жиры, белки, полимеры), требует дальнейшего изучения. По данным de Oliveira и соавторов [4], 92,22% потенциальных комбинаций «вода — ПАВ» остаются неисследованными.

Машинное обучение и цифровые двойники. Применение методов машинного обучения для динамического прогнозирования альфа-фактора [15] открывает перспективы для создания «цифровых двойников» аэрационных систем и систем автоматического управления аэрацией в режиме реального времени.

Новые методы измерения. Развитие оптических методов визуализации массопереноса (PLIF-I [27], PIV) и их адаптация для работы с реальными сточными водами представляет важную методическую задачу.

Отечественные исследования. Для российской практики особый интерес представляет изучение влияния линейных алкилбензолсульфонатов, этоксилированных спиртов и кокоамидопропилбетаина (КАПБ) на параметры массоперено-

са в условиях, характерных для российских климатических зон (низкие температуры) и технологических схем очистки (аэротенки-вытеснители, аэротенки-смесители, окислительные каналы) [28–31].

Выводы

1. Проведенный анализ современных научных публикаций позволяет сделать ряд обобщающих выводов относительно роли поверхностно-активных веществ в процессах переноса кислорода при аэрации сточных вод. Установлено, что воздействие ПАВ на массоперенос носит комплексный характер. Оно включает снижение коэффициента массопередачи в жидкой фазе (k_L) вследствие формирования диффузионных барьеров на границе раздела фаз и подавления эффекта Марангони, а также увеличение удельной поверхности контакта фаз (a) из-за подавления коалесценции и уменьшения диаметра пузырьков. Несмотря на рост межфазной поверхности, результирующее влияние ПАВ на объемный коэффициент массопередачи (k_{La}) чаще всего оказывается отрицательным, причем максимальное ингибирование процесса наблюдается при концентрациях, значительно ниже критической концентрации мицеллообразования.

2. Показано, что альфа-фактор для систем мелкопузырчатой аэрации варьируется в широких пределах (0,4–0,8), демонстрируя существенное снижение при обработке высококонцентрированных промышленных стоков, а также при уменьшении глубины погружения аэраторов. Подтверждена эффективность двухступенчатых технологических схем, обеспечивающих увеличение альфа-фактора на стадии нитрификации за счет предварительного удаления ПАВ, что позволяет достичь значительной экономии энергетических ресурсов. Выявлена динамическая природа альфа-фактора, подверженного суточным и сезонным колебаниям, что обосновывает необходимость внедрения гибких систем управления аэрацией.

3. Анализ воздействия различных типов ПАВ демонстрирует наиболее выраженный эффект для анионных соединений (снижение k_L на 20–70%) и минимальный — для биогенных поверхностно-активных веществ (5–25%). При этом степень изученности катионных и неионогенных ПАВ остается недостаточной, а значительная доля потенциальных комбинаций в системе «вода — ПАВ» еще не исследована, что открывает широкие перспективы для дальнейших научных изысканий. Отмечено, что в специфических условиях, таких как использование эжекторных аэраторов

(увеличение k_{La} до 60%) или определенные параметры активного ила, возможно повышение эффективности массопереноса в присутствии ПАВ, что указывает на необходимость дифференцированного подхода при проектировании.

4. Практическая значимость полученных результатов для отечественной практики водоочистки обусловлена потребностью в корректном проектировании аэрационных систем, особенно на сооружениях, принимающих стоки с высоким

содержанием ПАВ. Наиболее перспективными направлениями повышения энергоэффективности биологической очистки являются применение двухступенчатых схем, оперативный мониторинг альфа-фактора (метод *ex situ off-gas*, динамическая тензиометрия), внедрение адаптивных алгоритмов управления аэрацией на основе методов машинного обучения и обоснованный выбор типов аэрационного оборудования с учетом конкретного состава сточных вод.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Rosso D., Stenstrom M. K. Surfactant effects on alpha-factors in aeration systems. *Water Research*, 2006, v. 40, no. 7, pp. 1397–1404. DOI: 10.1016/j.watres.2006.01.044.
2. Hwang H. J., Stenstrom M. K. Evaluation of fine-bubble alpha factors in near full-scale equipment. *Journal WPCF*, 1985, v. 57, no. 12, pp. 1135–1141.
3. Mitru D., Nechifor G. et al. Removal and effects of surfactants in activated sludge system. *Revista de Chimie*, 2020, v. 71, no. 1, pp. 173–180. DOI: 10.37358/rc.20.1.7819.
4. de Oliveira L., dos Reis D. R., de Oliveira S. B., Formiga K. T. M. Systematic map of chemical and biological surfactant effects on oxygen transfer at the air-water interface. *Water Environment Research*, 2026, v. 98, pp. e70084. 10.1002/wer.70271.
5. Chen X., Liu G. H. et al. Effects of surfactant contamination on oxygen mass transfer in fine bubble aeration process. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2013, v. 30. DOI: 10.1007/s11814-013-0092-x.
6. Eckenfelder W. W. *Water quality engineering for practicing engineers*. New York, Barnes and Noble, 1970, 328 p.
7. Xuefei Li, Sheng Miao, Chao Liu, Xiang Shen, Changqing Liu. A novel theoretical model for predicting volumetric mass transfer coefficients in bubble aeration systems. *Physics of Fluids*, 2025, v. 37 (9), pp. 095167. DOI: 10.1063/5.0288044.
8. Боровкова И. С., Волхин В. В., Казаков Д. А. Влияние растворенных органических веществ на скорость транспорта кислорода через границу фаз газ – жидкость // Вестник Пермского государственного технического университета. Химическая технология и биотехнология. 2011. № 12. С. 127–137.
Borovkova I. S., Vol'khin V. V., Kazakov D. A. [The effect of dissolved organic matter on the rate of oxygen transport across the gas-liquid phase boundary]. *Vestnik Permskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. Chemical Technology and Biotechnology*, 2011, no. 12, pp. 127–137. (In Russian).
9. Wild M., Takors R., Mast Y. Revisiting basics of k_{La} dependency on aeration in bubble columns. *Chemie Ingenieur Technik*, 2023, v. 95. DOI: 10.1002/cite.202200165.
10. Manikantan H., Squires T. M. Surfactant dynamics: hidden variables controlling fluid flows. *Journal of Fluid Mechanics*, 2020, v. 892, pp. P1. DOI: 10.1017/jfm.2020.170.
11. Schwarz M., Behnisch J., Trippel J. et al. Oxygen transfer in two-stage activated sludge wastewater treatment plants. *Water*, 2021, v. 13, no. 14, pp. 1964. DOI: 10.3390/W13141964.
12. Schwarz M., Trippel J., Engelhart M., Wagner M. Determination of alpha factors for monitoring of aeration systems with the *ex situ off-gas* method. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, v. 29, pp. 84718–84734. DOI: 10.1007/s11356-022-21915-2.
13. García-Figueroa A. A., Albijanic B. et al. Hydrophobicity of benzene-based surfactants and its effect on bubble coalescence inhibition. *Molecules*, 2024, v. 29, pp. 5042. DOI: 10.3390/molecules29215042.
14. Xia S., Zhou Y., Zhang Z. Enhancement mechanisms of short-time aerobic digestion for waste activated sludge in the presence of cocoamidopropyl betaine. *Scientific Reports*, 2017, v. 7, pp. 13491. DOI: 10.1038/s41598-017-13223-4.
15. Schwarz M., Trippel J., Engelhart M., Wagner M. Dynamic alpha factor prediction with operating data – a machine learning approach. *Water Research*, 2023, v. 231, pp. 119650. DOI: 10.1016/j.watres.2023.119650.
16. Mateus M. V., Araújo L. S., Leopoldino A. B. et al. Molecular interactions and modeling of anionic surfactant effect on oxygen transfer in a cylindrical reactor. *Environmental Engineering Science*, 2019, v. 36, no. 2, pp. 164–171. DOI: 10.1089/ees.2018.0217.
17. Adenaya A., Stolle C. et al. Effects of natural and artificial surfactants on diffusive boundary dynamics and oxygen exchanges. *Oceans*, 2021, v. 2, p. 43. DOI: 10.3390/oceans2040043.
18. Prades-Mateu O., Monrós-Andreu G., Torró S. et al. Effects of SDS surfactant on oxygen transfer in a fine-bubble diffuser aeration column. *Water*, 2025, v. 17, no. 24, pp. 3473. DOI: 10.3390/w17243473.
19. Ma T., Hessenkemper H., Lucas D., Bragg A. D. Effects of surfactants on bubble-induced turbulence. December 2022. DOI: 10.48550/arXiv:2212.03620.

20. Mölder E., Tenno T. Research of oxygen mass transfer through the air-water surface at low bulk concentrations of surfactants. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences*, 2009, v. 58, no. 2, pp. 132–136. DOI: 10.3176/PROC.2009.2.05.
21. Sardeing R., Hébrard G. et al. Effect of surfactants on liquid-side mass transfer coefficients in gas-liquid systems. *Chemical Engineering Science*, 2006, v. 61 (19), pp. 6249–6260.
22. Andersson F., Rezk K., Sandberg M., Lin W. Numerical and experimental analysis of oxygen transfer in bubble columns. *Environmental Technology & Innovation*, 2024, v. 33, pp. 103522. DOI: 10.1016/j.eti.2023.103522.
23. Masutani G. K., Stenstrom M. K. Dynamic surface tension effects on oxygen transfer. *Journal of Environmental Engineering*, 1991, v. 117, no. 1, pp. 126–142. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9372(1991)117:1(126).
24. Campbell K., Wang J. New insights into the effect of surfactants on oxygen mass transfer in activated sludge process. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2020, 8(5):104409.
25. Therrien J. D., Vanrolleghem P. A., Dorea C. C. Characterization of the performance of venturi-based aeration devices. *Water SA*, 2019, v. 45, no. 2, pp. 268–276. DOI: 10.4314/WSA.V45I2.12.
26. Xu Y., Zhu N., Sun J., Liang P., Xiao K., Huang X. Evaluating oxygen mass transfer parameters for large-scale engineering application of membrane bioreactors. *Process Biochemistry*, 2017, v. 60, pp. 13–18. DOI: 10.1016/j.procbio.2017.05.020.
27. Lebrun G., Xu F., Le Men C. et al. Gas-Liquid mass transfer around a rising bubble: Combined effect of rheology and surfactant. *Fluids*, 2021, v. 6, pp. 84. DOI: 10.3390/FLUIDS6020084.
28. Бочаров В. В., Рыжкова О. А. Гигиеническая оценка биологически «жестких» линейных алкилбензолсульфонатов // Гигиена и санитария. 2010. № 3. С. 83–86.
Bocharov V. V., Ryzhkova O. A. [Hygienic estimation of biologically «hard» linear alkylbenzenesulfonates]. *Gigiena i Sanitariia*, 2010, no. 3, pp. 83–86. (In Russian).
29. Янзунув Е. И., Уллах Р., Фаткуллин Д. И. Синергетический эффект композиции сульфонатного ПАВ на основе жирных спиртов при добавлении карбоксилата этоксилированного нонилфенола: сборник трудов IX Международной молодежной научной конференции Tatarstan UpExPro 2025. Казань, 9–12 апреля 2025 г. — СПб.: ООО «Скифия-принт», 2025. С. 86–89. DOI: 10.24412/cl-37425-2025-1-86-89.
Ianzunov E. I., Ullakh R., Fatkulnin D. I. [Synergistic effect of a sulfonate surfactant composition based on fatty alcohols with the addition of ethoxylated nonylphenol carboxylate]. *Proceedings of the IX International Youth Scientific Conference Tatarstan UpExPro 2025, Kazan, April 9–12, 2025. Saint-Petersburg, Skifiia-Print Publ.*, 2025, pp. 86–89. DOI: 10.24412/cl-37425-2025-1-86-89. (In Russian).
30. Варсегов И. С., Пиковской И. И., Сыпалов С. А. и др. Определение кокаמידопропилбетаина в воде плавательного бассейна методом высокоэффективной жидкостной хроматографии — масс-спектрометрии высокого разрешения // Масс-спектрометрия. 2025. Т. 22. № 2. С. 73–81. DOI: 10.25703/MS.2025.22.08.
Varsegov I. S., Pikovskii I. I., Sypalov S. A. et al. [Determining cocamidopropyl betaine in swimming pool water by high-performance liquid chromatography — high-resolution mass spectrometry]. *Mass-Spektrometriia*, 2025, v. 22, no. 2, pp. 73–81. DOI: 10.25703/MS.2025.22.08. (In Russian).
31. Кокоамидопропилбетаин (КАПБ): техническое описание и применение в косметических и моющих средствах. — М.: ООО «МХК». https://mos-chem.ru/catalog/syre_dlya_kosmetiki_bytovoy_khimii_i_moyushchikh_sredstv/kokamidopropilbetain-kupit-optom/.
Kokoamidopropilbeain (KAPB): tekhnicheskoe opisanie i primeneniye v kosmeticheskikh i moiushchikh sredstvakh [Cocoamidopropyl Betaine (CAPB): technical description and application in cosmetics and detergents. Moscow, MKHK Publ.]. https://mos-chem.ru/catalog/syre_dlya_kosmetiki_bytovoy_khimii_i_moyushchikh_sredstv/kokamidopropilbetain-kupit-optom/. (In Russian).