



## Определяющие параметры для расчета барботажных дегазаторов

А. Г. Жулин, О. В. Сидоренко ✉

Тюменский индустриальный университет

Тюмень, ул. Володарского, 38, 625000, Российская Федерация

✉ [sidorenkoov@tyuiu.ru](mailto:sidorenkoov@tyuiu.ru)



**Аннотация.** К достаточно эффективным способам удаления растворенных газов, в частности углекислого, относится физическая десорбция, осуществляемая в процессе барботажа воды в свободном объеме. Барботажные дегазаторы отличаются технологичностью, простотой конструктивной части, надежностью эксплуатации независимо от сезона года. В ряде случаев выводы по исследованию барботажных явлений носят теоретический характер без учета большинства показателей физико-химического состава и конструктивных особенностей установок, что в итоге заканчивается «близостью» вида расчетных уравнений к результатам лабораторных данных или рекомендациями с учетом дополнительных условий. Учет физических явлений, происходящих в процессе барботажа, при необходимости отражения основного явления для практического использования, как правило, обеспечивается применением π-теоремы или метода планирования эксперимента. Обобщение теоретических и экспериментальных данных по определению расчетных параметров барботажных дегазаторов позволило сделать вывод о нецелесообразности оперирования коэффициентом диффузии. В качестве определяющих параметров для расчета при отсутствии данных по коэффициенту десорбции рекомендовано принимать водо-воздушное соотношение и продолжительность контакта в зависимости от ожидаемого эффекта удаления углекислого газа.

**Ключевые слова:** удаление углекислого газа, барботаж, десорбция, коэффициент десорбции, пузырьчатые явления

**Для цитирования:** Жулин А. Г., Сидоренко О. В. Определяющие параметры для расчета барботажных дегазаторов. *Архитектура, строительство, транспорт*. 2025;5(4):36–49. <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-4-36-49> EDN: LQTEJE

## Key parameters for calculating bubbling degassers

Alexander G. Zhulin, Olga V. Sidorenko ✉

Industrial University of Tyumen

Tyumen, 38 Volodarskogo St., 625000, Russian Federation

✉ [sidorenkoov@tyuiu.ru](mailto:sidorenkoov@tyuiu.ru)



**Abstract.** Physical desorption, achieved through water bubbling in a free volume, is a fairly effective method for removing dissolved gases, particularly carbon dioxide. Bubbling degassers are characterized by their

technological effectiveness, simple design, and reliable operation regardless of the season. In some cases, studies of bubbling plants are theoretical in nature and don't take into account most of their physicochemical composition parameters and design features of the units. As a result, the calculation equations become approximations for laboratory data or recommendations with additional conditions. Physical phenomena, as they need to be described during bubbling for practical application, are explained by the  $\pi$ -theorem or the experimental design method. A summary of theoretical and experimental data for determining the calculating parameters of bubbling degassers let us conclude that using the diffusion coefficient is inappropriate. In the absence of data on the desorption coefficient, we recommended to use the water-air ratio and the contact time, depending on the expected effect of carbon dioxide removal, as determining parameters for calculation.

**Keywords:** carbon dioxide removal, bubbling, desorption, desorption coefficient, bubbly phenomena

**For citation:** Zhulin A. G., Sidorenko O. V. Key parameters for calculating bubbling degassers. *Architecture, Construction, Transport*. 2025;5(4):36–49. (In Russ.) <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-4-36-49>



## 1. Введение / Introduction

В подземных водах Тюменского региона, забираемых для хозяйственно-питьевых и производственных целей, содержатся растворенные газы, удаление которых является важной задачей, обеспечивающей процесс обезжелезивания, защиту водопроводной сети и теплоэнергетического оборудования от коррозионных явлений. Концентрация газов в воде зависит от физической природы газа, степени насыщения, давления и температуры. Удаление углекислого газа из подземной воды рекомендуется проводить физическими методами [1–3].

Создание поверхности контакта воздушной и водяной фаз при физических методах может быть осуществлено в пленочном варианте, капельном или посредством барботирования объема.

В градирных создание поверхности контакта воздушной и водяной фаз в пленочном варианте осуществляется растеканием капель по поверхности оросителя – листового (полиэтиленового), речного (деревянного) или насыпного (керамических, пластмассовых насадок), то есть с некоторым приближением можно предполагать толщину контактной пленки. Однако методы расчета теплообмена сводятся к использованию объемного коэффициента теплоотдачи, отнесенного к 1 м<sup>3</sup> оросителя [3]. Коэффициенты теплоотдачи и массоотдачи определены для некоторых типов градирен по  $\pi$ -теореме с привлечением экспериментальных данных [4, 5].

Попытки переноса методов расчета тепловых процессов на десорбционные малоэффективны, так как явления, проходящие при этих процессах, значительно отличаются при одинаковых состояниях сред. Тепловые процессы – волновые, а десорбционные – молекулярно-кинетические, в них взаимодействуют силы межмолекулярные и поверхностного натяжения [6].

Первоначальные исследования по снижению агрессивных характеристик воды с избыточным газосодержанием (углекислоты, сероводорода, метана и др. газов) физическими методами проводились при изливе воды из отверстий – через дырчатые лотковые оросители (дождевание) [7]. Но, так как фиксирование площади поверхности контакта с воздухом затруднительно, теоретические исследования в этом направлении осуществляются недостаточно. Попытки использования упрощенного подхода к назначению поверхности контакта, проведенные Л. П. Румянцевой, не дали положительных результатов и завершились использованием частного варианта экспериментальных данных для конкретного объекта [8]. Метод капельного разбрызгивания используется при обезжелезивании воды, при этом процесс снижения газосодержания рассматривается как сопутствующий, зависящий от высоты расположения отверстий излива или напора у насадок. Метод не технологичен из-за высокой влажности в закрытых помещениях и замерзания воды в открытых бассейнах.

Принцип работы барботажного дегазатора основан на выравнивании концентрации газовых составляющих контактом с воздухом, имеющим минимальные парциальные давления удаляемого газа, с целью достижения количественного равновесия в воде и воздухе.

Концентрация растворенной углекислоты в воде, моль/л, выражается уравнением [9]

$$C_{CO_2} = K_{CO_2} \cdot p_{CO_2} = K_{CO_2} \cdot (p_{общ} - p_{H_2O}), \quad (1)$$

где  $K_{CO_2}$  – константа Генри, которая выражается через коэффициент абсорбции углекислоты в воде, моль/(л·Па),

$p_{CO_2}$  – парциальное давление углекислоты в газовой среде, Па,

$p_{общ}$  – общее давление газовой среды, Па,

$p_{H_2O}$  – давление водяных паров, Па.

Однако в подземной воде, кроме равновесной абсорбированной углекислоты, присутствующей согласно закону Генри – Дальтона, есть равновесная в химической связи, поддерживающая углекислотное равновесие в виде соединений угольной кислоты, и свободная (агрессивная) [10]



Исследования эффективности снижения содержания углекислого газа с использованием математического обоснования относительно активно проводятся для пузырьчатых явлений [11].

При барботаже воды довольно затруднительно констатировать площадь контакта воздушных пузырьков (практически нереально). Размеры пузырьков сильно разнятся – от 0.1 мм до 2 см и более [12, 13, 14], – и любые усреднения или расчеты по вероятностям дают настолько большие отклонения от изменения любого исходного или эксплуатационного параметра процесса, что приходится обращаться к экспериментальным данным. Площадь контакта микропузырьков не участвует в десорбционном процессе, так как силы поверхностного натяжения превышают диффузионные. Размеры пузырей, в которых снижается влияние поверхностного натяжения, существенно зависят от температуры контактных сред и химического состава воды [15]. При незначительной турбулизации потоков воздушные пузыри изменяют диаметры и форму, что способствует неустойчивому развитию поверхности контакта (при этом, как правило, суммарная площадь контакта фаз в верхней части дегазатора снижается). «Сложность барботажного процесса такова, что вряд ли можно разработать его количественную теорию», – считает В. Г. Левич [13].

В расчетах сооружений по удалению угольной кислоты из подземной воды используется понятие общего коэффициента десорбции  $K_{ж}$  [10, 16], которое введено из-за ряда трудностей использования основного расчетного уравнения вида (для двухфазных систем взаимный переход веществ характеризуется коэффициентом десорбции [17]):

$$G = K_{ж} \cdot F \cdot \Delta C_{cp}, \quad (3)$$

где  $G$  – количество десорбируемой углекислоты, кг/ч,

$F$  – площадь поверхности контакта воды и воздуха, м<sup>2</sup>,

$\Delta C_{cp}$  – средняя движущая сила процесса десорбции, кг/м<sup>3</sup>.

Согласно теории процесса десорбции, при контакте воздушной и водной фаз на границе перехода молекулы испытывают сопротивление водной  $R_1$  и воздушной  $R_2$  сред, формирующих двойной пограничный слой [9] (двухслойное поглощение [18]). Эти сопротивления выражают через частные коэффициенты десорбции в пленке воды  $K_{ж}$  и газа  $K_z$ :

$$K_{ж} = 1/R_1 \text{ и } K_z = 1/R_2. \quad (4)$$

В большинстве приводимых рекомендаций сопротивление воздушной среды для слаборастворимых газов считается столь малым, что его можно исключить [16], т. е. процесс десорбции определяется переносом из жидкой фазы [17].

Общий коэффициент десорбции  $K_{ж}$ , зависящий от конструкции десорбера, обычно устанавливается экспериментальным путем и приводится в виде функциональной зависимости, которую выражают в безразмерных критериальных параметрах [6, 19–21]:

$$Sh = f(Re, Sc, ...), \quad (5)$$

где  $Sh$  – критерий Шервуда, характеризует интенсивность диффузионного потока вещества (для массообменных процессов):

$$Sh = \frac{K_{ж} \cdot d_n}{D}, \quad (6)$$

где  $d_n$  – средний диаметр пузырька воздуха, м,

$D$  – коэффициент диффузии удаляемого газа в жидкой среде,  $m^2/c$ ,

$Re$  – критерий Рейнольдса:

$$Re = \frac{u \cdot d}{\nu}, \quad (7)$$

где  $u$  – скорость движения жидкости, м/с,

$d$  – характерный линейный размер барботера, м,

$\nu$  – коэффициент кинематической вязкости жидкости,  $kg/(m \cdot c)$  [Па·с],

$Sc$  – критерий Шмидта, характеризует связь скоростного и концентрационного полей:

$$Sc = \frac{\nu}{D}. \quad (8)$$

В упрощенных критериальных уравнениях для определения общего коэффициента десорбции (6) за определяющий размер принят диаметр воздушного пузырька  $d_n$ . Анализ экспериментальных и расчетных данных о размерах пузырей воздуха показал отсутствие единой расчетной зависимости, отражающей влияние свойств среды и размеров отверстия на диаметр пузыря [22]. По А. А. Кастальскому [1], при диаметре отверстий истечения воздуха 2 мм диаметр воздушных пузырей принят 0.0038 м, в работе [23]  $d_n = 0.005 \div 0.008$  м. Коэффициент десорбции в зависимости от исходных условий может значительно изменяться, поэтому, по мнению А. А. Кастальского, при получении для конкретных условий его нельзя распространять на другие отличные условия. В. Г. Айнштейн [6] отмечает, что недостатки использования коэффициентов массоотдачи проявляются особенно ярко, когда они зависят от движущей силы  $\Delta C$ .

Общий вид зависимости коэффициента десорбции, кроме параметров, обозначенных в уравнениях (5–8), может включать дополнительные параметры, и выражаться в виде [24]

$$K_{ж} = f(\Delta C, D, L, d_n, u, a, \nu, q_{y\partial}), \quad (9)$$

где  $L$  – характерный линейный размер барботера, м,

$d_n$  – средний диаметр пузырька воздуха, м,

$u$  – скорость движения воды в барботере, м/с,

$\nu$  – коэффициент кинематической вязкости жидкости,  $m^2/c$ ,

$a$  – газосодержание барботажного слоя;

$q_{y\partial}$  – удельный расход воздуха,  $m^3/m^3$ .

Данные по коэффициенту десорбции уголекислоты из подземных вод, принятые в водоснабжении, носят необобщенный характер и по разным источникам имеют различные значения. Неодинаковость

величин связывается с тем, что коэффициент молекулярной диффузии – переменная величина, зависящая от температуры, давления, первоначальной концентрации удаляемого газа, его структуры и величины, солесодержания. Согласно [21], «для приближенного определения коэффициентов диффузии в жидкостях пользуются различными формулами». Для субъективных расчетных параметров десорбции авторы в качестве исходных данных принимают конструктивные [1, 25], физико-химические [21] или кинетические [17, 26] параметры в зависимости от индивидуального подхода и текущих требований.

В реальных условиях значение коэффициента будет разным и ограничивается условиями проведения эксперимента [8, 20, 23, 27].

В основных процессах, используемых в химической технологии, как правило, рассматриваются абсорбционные или сорбционные явления. Десорбция в этих процессах выступает в качестве сопутствующего явления при регенерации обменных материалов или как процесс восстановления части исходного материала. В литературе по вопросу десорбции данные представлены слабо, в ряде случаев после представления значительного объема информации по абсорбции даются незначительные рекомендации по их применению к десорбции. В газовой среде молекулы перемещаются с более высокой скоростью, чем в жидкой, соответственно, сорбционный процесс проходит быстрее, чем десорбция газа из жидкости в результате более плотного расположения молекул и меньшей скорости перемещения в плотной среде.

В водоснабжении и теплоэнергетике в связи с трудностями в выявлении поверхности контакта *вода – воздух* и нечеткостью в назначении коэффициента десорбции используются эмпирические коэффициенты десорбции поверхностной, или объемной, массоотдачи  $K_{ж}$ , коэффициент характеризует сумму компонентов системы *вода – воздух*, влияющих на массообмен. Согласно различным теориям, значения коэффициента десорбции определяются по уравнениям: в пленочной –  $K_{ж} = D/\delta_{пл}$ , в пенетрационной (обновления поверхности фазового контакта – модель проникания) –  $K_{ж} = 2[D/(\pi \cdot \tau)]^{0.5}$ , диффузионного пограничного слоя (гидродинамической аналогии) –  $K_{ж} = (DS)^{0.5}$ , где:  $\delta_{пл}$  – толщина пленки,  $\tau$  – продолжительность процесса обновления,  $S$  – площадь поверхности контакта. При этом  $\delta_{пл}$  и  $S$  непосредственно определить невозможно без введения дополнительных допущений. «Приведенные модели можно использовать для расчета процессов только в частных случаях, так как вследствие чрезвычайной сложности турбулентных двухфазных потоков практически невозможно определение в них поверхности контакта фаз, распределения концентраций в фазах и других параметров, необходимых для расчета», – отмечается в [28].

Коэффициент массоотдачи связывают с коэффициентом молекулярной диффузии  $D$  соотношением [1, 6]

$$K_{ж} \approx D^n, \quad (10)$$

где  $n$  – безразмерный показатель степени, изменяющийся в зависимости от принимаемой теории в интервале от 0 до 1. В расчетах процессов и аппаратов по массопереносу большинство исследователей рекомендуют принимать его равным 0.5 или определять через толщину пограничного слоя, что вносит дополнительную путаницу в рассматриваемых явлениях, так как в одних случаях толщину слоя связывают с величиной молекул межфазных поверхностей, а в других принимают, согласно рассуждениям, как возможную величину

$$\frac{D \cdot t}{\delta} = K_{ж}, \quad (11)$$

где  $t$  – продолжительность десорбции, с,  
 $\delta$  – толщина пограничного слоя воды, м.

Но считать, что в массопереносе активно осуществляется диффузия, некорректно: диффузия – направленный молекулярный процесс, десорбция газа – физический перенос, обусловленный разностью плотностей.



Газовый компонент при барботировании удаляется из воды в основном в процессе обновления поверхностного слоя на пузыре. При турбулизации объема воды происходит активное переформирование межмолекулярного строения слоя, обволакивающего воздушный пузырь, газовые включения в меньшей степени заземлены молекулами воды с более плотной структурой. В результате снижения толщины пограничного слоя и нарушения поверхностного натяжения на воздушном пузыре происходит активный переход газа из жидкой среды в газообразную, имеющую малое парциальное давление.

Несмотря на широкое применение коэффициентов массоотдачи, критериальные уравнения не в полной мере учитывают влияющие факторы в связи с недостаточными знаниями о механизме процесса.

Расчет сооружений для практического использования более реально проводить по результатам исследований на пилотных установках.

Многообразие субъективных подходов к выбору расчетных параметров барботажных дегазаторов для решения практических задач предложено осуществлять экспериментальным путем с использованием независимого параметра водо-воздушного соотношения.

Опыт эксплуатации станций обезжелезивания тюменского региона показал, что снижение содержания углекислого газа в подземной воде в большей степени зависит от величины легко регулируемого и доступного параметра – водо-воздушного соотношения [19]. Первоначальное назначение параметра водо-воздушного соотношения (с целью конструктивного оформления дегазатора) осуществляется экспериментальным путем и в процессе эксплуатации регулируется в зависимости от требуемой эффективности снижения содержания углекислого газа.

Целью настоящего исследования являлось выявление определяющих параметров для расчета барботажных дегазаторов. В задачи входило:

- определить значения коэффициентов десорбции для различных высот слоя воды и площадей поверхности воды в стационарном режиме в зависимости от продолжительности контакта фаз;
- определить значение динамической составляющей десорбционного коэффициента (турбулентной десорбции) при барботировании воды воздухом;
- показать некорректность использования коэффициента диффузии в барботажном процессе снижения содержания углекислого газа;
- выявить факторы, влияющие на эффективность удаления углекислоты из подземной воды на барботажных дегазаторах;
- обосновать целесообразность применения предварительных экспериментов по дегазации воды с назначением соответствующего водо-воздушного соотношения для достижения требуемой эффективности дегазатора.

## **2. Материалы и методы / Materials and methods**

Исследования по десорбции углекислоты проводились в лабораторных и производственных условиях на пилотной установке и действующем (производственном) дегазаторе.

В лабораторных условиях определялось изменение содержания углекислоты через открытую неподвижную поверхность контакта воды с воздухом (стационарный режим) и при турбулизации объема воды путем барботажа воздухом. В первом случае процесс изучался при условиях, что вода имеет свободную поверхность раздела с воздухом, она абсолютно горизонтальна, жидкость имеет бесконечную глубину (по отношению к размерам молекул), температура обеих фаз постоянна. Высота слоя воды изменялась в пределах 0.03–0.15 м.

Режим барботажа исследовался в цилиндрах путем подачи воздуха с различной интенсивностью от компрессора через пористые аэраторы при высоте слоя воды 0.15 м.

В производственных условиях рассматривался противоточный режим подачи воды и воздуха на пилотной установке (колонке) диаметром 0.1 м. Продолжительность контакта воды с воздухом изменялась за счет увеличения слоя воды в колонке.

Измерения содержания углекислого газа в воде проводились согласно методике ЦВ 1.01.17-2004<sup>1</sup>.

### 3. Результаты и обсуждение / Results and discussion

При использовании коэффициента десорбции в расчетах принимаемая величина в обобщенном виде представляется суммой диффузии в стационарном и динамическом (турбулентном) состоянии системы по уравнению

$$\frac{dc}{dt} = D + D_{\text{турб}}. \quad (12)$$

В большинстве случаев при применении теории пограничного слоя предлагается не учитывать в расчетах сопротивление газо-воздушной среды ввиду малости. Но при определении коэффициента турбулентной диффузии приходится применять упрощенные модели, т. е. некоторые явления переноса газовых компонентов не учитываются, а принимаются на основе фактических данных (по обстоятельствам) с целью получения расчетных выражений. Уравнение скорости массообмена включает две неизвестные составляющие: поверхность соприкосновения  $dF$  и сопротивление к переходу из одной фазы (среды) в другую  $R$ .

$$dM = \frac{\Delta C \cdot dF}{R}. \quad (13)$$

Частное  $1/R$  заменяют на  $K = 1/R$ , и вводится обозначение коэффициента массопередачи.

Все компоненты правой части являются неизвестными. Разность концентрации даже при решении расчетным уравнением подставляется как ожидаемая, но в реальных условиях при использовании теории пограничного слоя она имеет отклонение. Величина коэффициента массопередачи является функцией многих переменных, и единого уравнения для его определения нет [6].

В расчетном виде в формулах при переходе к коэффициенту массопередачи используется значение коэффициента диффузии, что не совсем корректно. В режиме снижения концентрации углекислого газа в процессе десорбции коэффициент не может представлять диффузию, так как в связи со снижением концентрации газа в водной среде движущая сила процесса непрерывно снижается при продолжительности контакта и не имеет постоянного значения.

В ряде случаев для теоретического обоснования процесса десорбции рассматривается применение теории пограничного слоя, состоящего из двух слоев (жидкой и газообразной фазы), каждый слой создает сопротивление переходу газов из жидкой фазы. В неподвижном слое такое объяснение процесса десорбции допустимо, но в вопросе определения толщины пограничного слоя в настоящее время нет единого мнения.

Зависимость снижения содержания углекислого газа в воде в стационарном состоянии от высоты слоя воды представлена на рис. 1.

Скорость изменения содержания углекислого газа в воде уменьшается в результате снижения движущей силы процесса, связанной с концентрацией в объеме, и, соответственно, изменяется

---

<sup>1</sup> ЦВ 1.01.17-2004. ФР.1.31.2005.01580. Качество воды. Методика выполнения измерений содержания свободной углекислоты в пробах питьевых и природных вод. Титриметрический метод. Санкт-Петербург, 2005. URL: <http://gost.gtsever.ru/Data2/1/4293797/4293797540.pdf> (дата обращения: 12.08.2025).

коэффициент диффузии (теряя свойства коэффициента). При длительном контакте в верхнем слое воды концентрируется малое количество молекул, и система переходит в равновесное состояние. С увеличением высоты слоя увеличивается продолжительность перехода в равновесное состояние (рис. 1).

В неподвижном состоянии воды процесс перемещения углекислого газа имеет молекулярный характер, обусловленный межмолекулярными взаимодействиями, и относится к броуновскому движению.

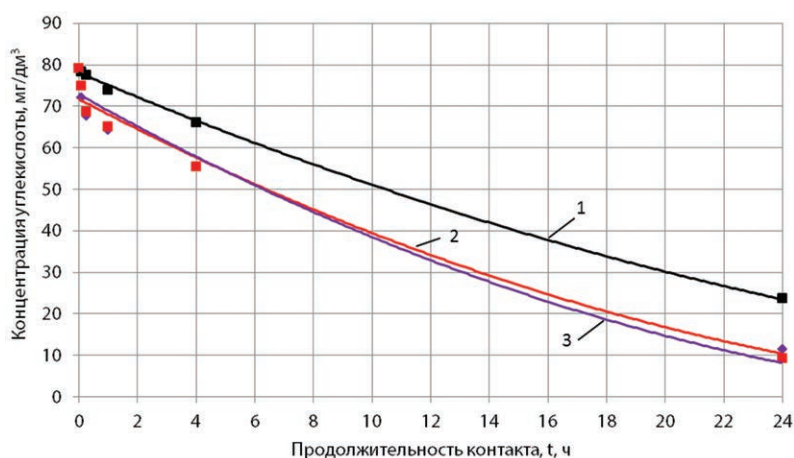


Рис. 1. Зависимость снижения концентрации углекислоты от продолжительности контакта в неподвижном объеме при различной толщине слоя воды: 1 – 0.1 м; 2 – 0.05 м; 3 – 0.03 м (график составлен авторами)

Fig. 1. Dependence of the carbon dioxide concentration decrease on the contact duration in a fixed volume at different thickness of the water layer: 1 – 0.1 m; 2 – 0.05 m; 3 – 0.03 m (graph constructed by the authors)

Десорбция  $\text{CO}_2$  из неподвижного слоя воды осуществляется через беспорядочное тепловое движение молекул, т. е. любая молекула в каждый момент равновероятно может иметь любое направление движения. При диффузии происходит направленный постоянный перенос молекул из областей высоких концентрации в более низкие. Перенос описывается статистическими уравнениями, они применимы лишь к массам, состоящим из большого числа диффундирующих молекул, при расстояниях и продолжительностях, которые намного больше средних путей пробега и времени между последовательными столкновениями.

Концентрация «С» растворенного газа в воде в процессе десорбции изменяется согласно уравнению

$$D_{\partial} \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} = \frac{\partial c}{\partial t}. \quad (14)$$

Скорость переноса растворенного газа через единицу поверхности любой плоскости, параллельной поверхности жидкости, составляет

$$R_x = -D_{\partial} \left( \frac{\partial c}{\partial x} \right)_{x=0}, \quad (15)$$

где  $x$  – толщина слоя воды, из которого десорбируется газ,

$D_{\partial}$  – коэффициент десорбции растворенного газа,

$(\partial c / \partial x)_{x=0}$  – градиент концентрации у поверхности, являющейся функцией времени.

В статических условиях коэффициент десорбции – результирующая молекулярного взаимодействия в объеме и на поверхности слоя воды. Значение коэффициента зависит от площади поверх-



ности контакта и высоты слоя: чем меньше высота слоя воды, тем меньше коэффициент десорбции. При этом коэффициент отнесен к площади контакта и определяется по основному уравнению массопереноса (3).

В динамических условиях десорбционный процесс характеризуется поверхностным явлением, зависящим от скорости противотока и размера воздушных пузырей, что приводит к постоянному обновлению поверхности контакта и увеличению количества удаляемого газа.

По результатам исследований получены значения коэффициентов десорбции из неподвижного объема (рис. 2) и при барботировании объема жидкости в лабораторных условиях (рис. 3).

Пример зависимости коэффициентов десорбции, характеризующих эффективность процесса удаления углекислоты на пилотной установке в сравнении с производственным дегазатором, от исходного содержания  $\text{CO}_2$  в воде, продолжительности дегазации и удельного расхода воздуха ( $q_{y\partial}$  – количество воздуха на  $1 \text{ м}^3$  воды) приведен на рис. 4, 5.

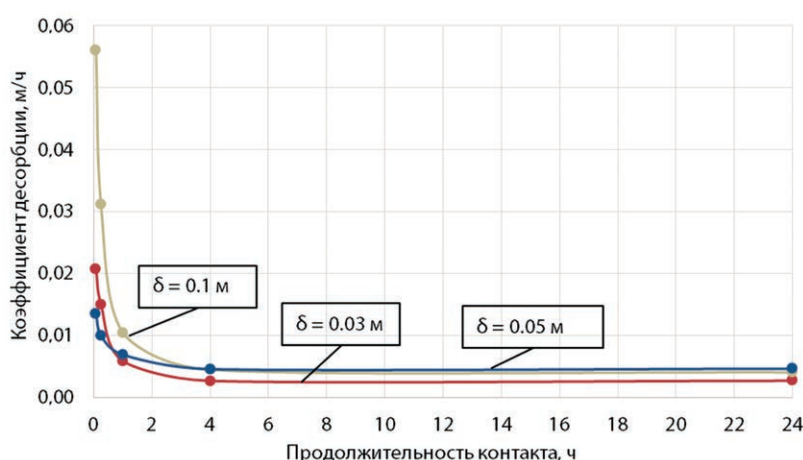


Рис. 2. Коэффициент десорбции углекислоты из неподвижного объема при различной толщине слоя воды  $\delta$  (график составлен авторами)  
Fig. 2. Carbon dioxide desorption coefficient from a stationary volume at different thickness of the water layer  $\delta$  (graph constructed by the authors)

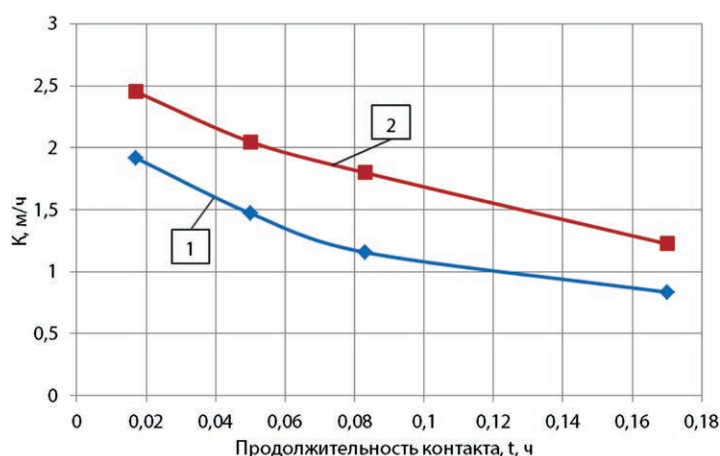


Рис. 3. Коэффициент десорбции углекислоты при разной интенсивности барботажного воздуха: 1 –  $0.7 \text{ л/(с·м}^2\text{)}$ ; 2 –  $3.0 \text{ л/(с·м}^2\text{)}$  (график составлен авторами)  
Fig. 3. Carbon dioxide desorption coefficient at different bubbling intensity: 1 –  $0.7 \text{ л/(с·м}^2\text{)}$ ; 2 –  $3.0 \text{ л/(с·м}^2\text{)}$  (graph constructed by the authors)

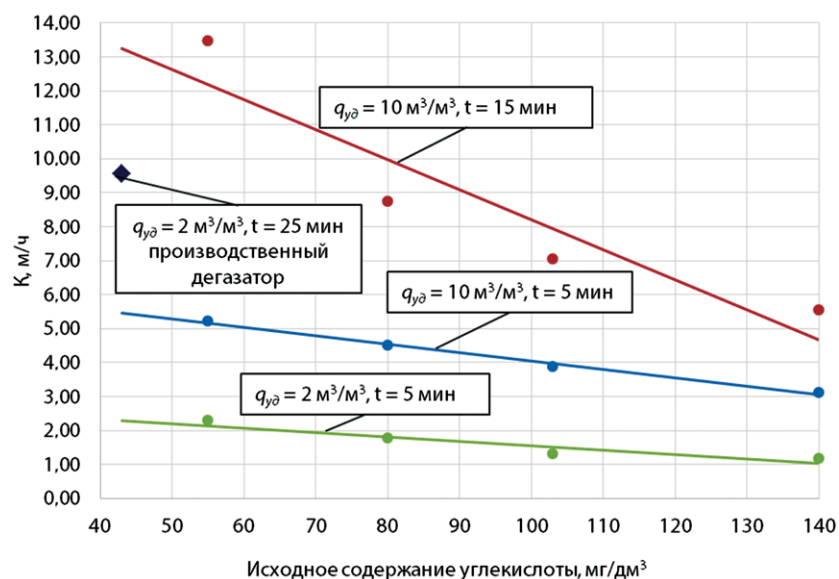


Рис. 4. Изменение коэффициента десорбции углекислоты в проточном режиме в зависимости от исходного содержания углекислоты в воде (график составлен авторами)  
Fig. 4. Change in the coefficient of carbon dioxide desorption during flow mode depending on the initial carbon dioxide content in the water (graph constructed by the authors)

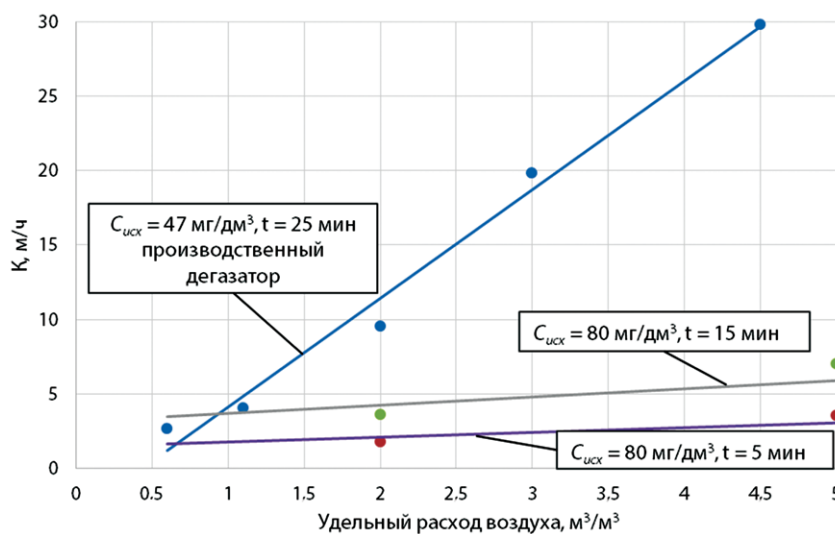


Рис. 5. Изменение коэффициента десорбции углекислоты в проточном режиме в зависимости от удельного расхода воздуха (график составлен авторами)  
Fig. 5. Change in the coefficient of carbon dioxide desorption during flow mode, depending on the specific air flow rate (graph constructed by the authors)

При малых расходах воздуха ( $q_{yd}$  до  $1 \text{ м}^3/\text{м}^3$ ) процесс десорбции происходит медленнее, что подтверждается близкими значениями коэффициентов десорбции при продолжительности процесса 5 и 25 минут при различных исходных содержаниях углекислоты (рис. 5).

Данные по снижению содержания углекислоты, полученные на пилотной установке (рис. 6) показывают, что увеличение скорости движения воды позволяет повысить эффект удаления  $\text{CO}_2$  при малых расходах воздуха.

В динамическом режиме основным фактором, влияющим на степень снижения содержания  $\text{CO}_2$ , является переход  $\text{CO}_2$  через слой на границе вода – воздух. Диффузия в объеме воды проявляет себя в малой степени, так как основой перехода является сопротивление пограничного слоя и его непрерывное обновление.

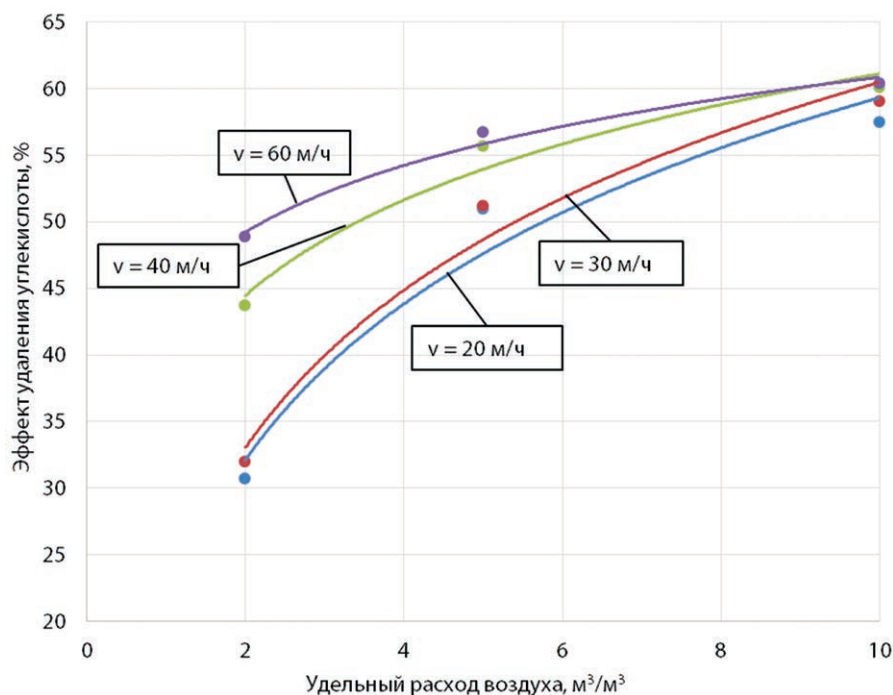


Рис. 6. Эффект удаления углекислоты в барботажном дегазаторе в зависимости от удельного расхода воздуха и скорости движения воды в противоточном режиме (график составлен авторами)

Fig. 6. The effect of carbon dioxide removal in a bubbling degasser, depending on the specific air flow rate and the speed of water movement in countercurrent mode (graph constructed by the authors)

Результаты, полученные на пилотной установке, используются для назначения необходимого расхода воздуха с целью достижения требуемой эффективности удаления углекислоты в производственных условиях. При расчете барботажных дегазаторов в расчетных зависимостях следует принимать значения коэффициентов десорбции, соответствующие принимаемой продолжительности барботажа.

#### 4. Заключение / Conclusions

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Коэффициент диффузии в десорбционном процессе углекислого газа нецелесообразно принимать в расчетной части барботажного дегазатора.
2. В статических условиях значение коэффициента десорбции зависит от высоты слоя воды, а в динамических – главным образом от продолжительности барботажа и водо-воздушного соотношения.
3. При отсутствии данных по коэффициенту десорбции (для конкретного барботера) в качестве определяющих параметров для расчета дегазатора рекомендуется принимать водо-воздушное соотношение и продолжительность контакта в зависимости от ожидаемого эффекта удаления углекислого газа.



**Вклад авторов.** Авторы внесли равный вклад в подготовку публикации.

**Author contributions.** All authors contributed equally to preparing the publication.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Conflict of interest.** The authors declare no relevant conflict of interest.

#### Список литературы

1. Кастальский А. А. *Проектирование устройств для удаления из воды растворенных газов в процессе водоподготовки*. Москва: Госстройиздат; 1957. 186 с.
2. Шарапов В. И., Сивухина М. А. *Декарбонизаторы водоподготовительных установок систем теплоснабжения*. Москва: Издательство АСВ; 2000. 200 с.
3. Сколубович Ю. Л., Войтов Е. Л., Сколубович А. Ю., Фролов А. Е. Исследования очистки подземной воды в аэраторе-дегазаторе. *Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение*. 2011;(8):44–47. URL: <https://elibrary.ru/ofspn>
4. Гладков В. А., Арефьев Ю. И., Пономаренко В. С. *Вентиляторные градирни*. Москва: Стройиздат; 1976. 216 с. URL: <https://akvann.ru/sites/default/files/Вентиляторные%20градирни%20Гладков%20Арефьев%20Пonomаренко%201976г.pdf>
5. Моргунова Е. П., Давидханова М. Г. Определение коэффициентов массоотдачи при десорбции диоксида углерода. В сб.: *Повышение энергоресурсоэффективности и экологической безопасности процессов и аппаратов химической и смежных отраслей промышленности (ISTS «EESTE-2021»)*, Москва, 20–21 октября 2021 года. Т. 1. Москва: Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство); 2021. С. 283–286. <https://doi.org/10.37816/eeste-2021-1-283-286>
6. Айнштейн В. Г., Захаров М. К., Носов Г. А., Захаренко В. В., Зиновкина Т. В., Таран А. Л., Костанян А. Е. *Общий курс процессов и аппаратов химической технологии: в 2 т.* Москва: Химия; 2000.
7. Азерьер С. Х. (ред.) *Водоснабжение на железнодорожном транспорте. Т. II*. Москва: Транспортное железнодорожное издательство; 1940. 508 с.
8. Румянцева Л. П. *Брызгальные установки для обезжелезивания воды*. Москва: Стройиздат; 1973. 104 с.
9. Стерман Л. С., Покровский В. Н. *Физические и химические методы обработки воды на ТЭС*. Москва: Энергоатомиздат, 1991; 328 с. URL: <https://djvu.online/file/VgYIHn9Da0p>
10. Фрог Б. Н., Первов А. Г. *Водоподготовка*. Москва: АСВ; 2014. 512 с. [https://www.litres.ru/get\\_pdf\\_trial/17187451.pdf](https://www.litres.ru/get_pdf_trial/17187451.pdf)
11. Иванов А. Е., Волкова О. А., Ключенкова М. И., Беренгартен М. Г. Оптимизация процесса обезжелезивания артезианских вод. *Вода: химия и экология*. 2011;(4):25–31. URL: <https://www.elibrary.ru/ohupun>
12. Лавров Н. А., Скорнякова Е. А. Моделирование процессов очистки жидкости от растворенного в ней газа при барботаже. *Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия Машиностроение*. 2010;(51):155–160. URL: <https://www.elibrary.ru/ncesuh>
13. Левич В. Г. *Физико-химическая гидродинамика*. Москва: Государственное издательство физико-математической литературы; 1959. 700 с. URL: <https://djvu.online/file/cy4jzFbJHOD4E>
14. Базаров Ю. Б., Мешков Д. Е., Мешков Е. Е., Сиволгин В. С. Исследование подъема пузыря воздуха в канале воды квадратного сечения. *Вестник Саровского ФизТеха*. 2005;(8):68–73. URL: <http://videoscan.ru/page/805>
15. Кухтин Б. А., Чернова О. Б. *Поверхностные явления и дисперсные системы*. Владимир: Изд-во ВлГУ; 2021. 153 с. URL: <https://dspace.www1.vlsu.ru/bitstream/123456789/9073/1/02215.pdf>
16. Копылов А. С., Лавыгин В. М., Очков В. Ф. *Водоподготовка в энергетике*. Москва: Издательство МЭИ; 2003. 309 с.
17. Островский Г. М. (ред.) *Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий. Ч. 2*. Санкт-Петербург: НПО «Профессионал»; 2006. 916 с.
18. Кафаров В. В. Основы массопередачи. Москва: Высшая школа; 1979. 439 с.
19. Жулин А. Г., Сидоренко О. В., Белова Л. В. Барботажные дегазаторы станций обезжелезивания (общие рекомендации к применению и расчету). *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2012;(3):39–48. URL: <https://www.elibrary.ru/pashqx>
20. Abdel-Rahman Z. A., Hasanb B. O., Abdullah A. K. A study of mass transfer into a liquid falling film in spiral tubes using CO<sub>2</sub> - water system. *The Iraqi Journal For Mechanical And Material Engineering*. 2010;Special Issue (B):62–70. URL: [https://www.researchgate.net/publication/271135494\\_A\\_STUDY\\_OF\\_MASS\\_TRANSFER\\_INTO\\_A\\_LIQUID\\_FALLING\\_FILM\\_IN\\_SPIRAL\\_TUBES\\_USING\\_CO\\_2\\_-\\_WATER\\_SYSTEM](https://www.researchgate.net/publication/271135494_A_STUDY_OF_MASS_TRANSFER_INTO_A_LIQUID_FALLING_FILM_IN_SPIRAL_TUBES_USING_CO_2_-_WATER_SYSTEM)
21. Рамм В. М. *Абсорбция газов*. Изд-е 2, переработанное и дополненное. Москва: Химия; 1976. 656 с. URL: <https://djvu.online/file/uWpBytFV8pHA9?ysclid=mhcyga4cas342940059>

22. Девянин В. А. Закономерности образования пузырей на отверстиях погруженных дырчатых листов барботажных аппаратов. *Теплоэнергетика*. 2024;(8):42–54. <https://doi.org/10.56304/S0040363624700097>
23. Болотова О. В. *Исследования по снижению содержания углекислоты из подземной воды Тюменского региона: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук*. Нижний Новгород, 2005. 16 с. <https://viewer.rsl.ru/ru/rsl01002973753?page=4&rotate=0&theme=white>
24. Жулин А. Г., Болотова О. В. К назначению параметров барботаж при удалении угле-кислоты из подземной воды при обезжелезивании. *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2002;(12):66–70.
25. Лаптева Е. А., Фарахов М. И. Определение эффективности десорбции коррозионно-активных газов в колоннах с хаотичными и регулярными насадками. *Теплоэнергетика*. 2021;(2):93–98. <https://doi.org/10.1134/S004036362101015X>
26. Flagiello D., Parisi A., Lancia A., Di Natale F. A Review on gas-liquid mass transfer coefficients in packed-bed columns. *ChemEngineering*. 2021;5(3):43. <https://doi.org/10.3390/chemengineering5030043>
27. Echarte R., Campana H., Brlgnole E. A. Effective areas and liquid film mass transfer coefficients in packed columns. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*. 1984;23:349–354.
28. Дытнерский Ю. И. *Процессы и аппараты химической технологии. Часть 2. Массообменные процессы и аппараты*. Изд. 2-е. Москва: Химия; 1995. 368 с. URL: <https://djvu.online/file/9f5bpkurfGX63?ysclid=mhd0g1jj7s967271817>

### References

1. Кастальский А. А. *Design of devices for removing dissolved gases from water during water treatment*. Moscow: Gosstroyizdat; 1957. 186 p. (In Russ.)
2. Sharapov V. I., Sivukhina M. A. *Decarbonizers for water treatment units in heating systems*. Moscow: ASV; 2000. 200 p. (In Russ.)
3. Skolubovich YU. L., Voytov Ye. L., Skolubovich A. Yu., Frolov A. Ye. Research of groundwater purification in an aerator-degasser. *Vodoочистка. Vodopodgotovka. Vodosnabzheniye*. 2011;(8):44–47. (In Russ.) URL: <https://elibrary.ru/ofspn>
4. Gladkov V. A., Aref'yev YU. I., Ponomarenko V. S. *Fan cooling towers*. Moscow: Stroyizdat; 1976. 216 с. (In Russ.) URL: <https://akvann.ru/sites/default/files/Вентиляторные%20градирни%20Гладков%20Арефьев%20Пonomarenko%201976r.pdf>
5. Morgunova E. P., Davidkhanova M. G. Determination of mass rating coefficients at desorption of carbon dioxide. In: *Povysheniye energoresursoeffektivnosti i ekologicheskoy bezopasnosti protsessov i apparatov khimicheskoy i smezhnykh otrasley promyshlennosti (ISTS «EESTE-2021»)*, Moscow, 20–21 October, 2021. Vol. 1. Moscow: A.N. Kosygin Russian State University (Technologies, Design, Art); 2021. P. 283–286. (In Russ.) <https://doi.org/10.37816/eeste-2021-1-283-286>
6. Aynshteyn V. G., Zakharov M. K., Nosov G. A., Zakharenko V. V., Zinovkina T. V., Taran A. L., Kostanyan A. Ye. *General course of processes and apparatuses of chemical engineering: in 2 volumes*. Moscow: Khimiya; 2000. (In Russ.)
7. Azer'yer S. Kh. (eds.) *Water supply in railway transport. Vol. II*. Moscow: Transportnoye zheleznodorozhnoye izdatel'stvo; 1940. 508 p. (In Russ.)
8. Rumyantseva L. P. *Spray systems for iron removal from water*. Moscow: Stroyizdat; 1973. 104 p. (In Russ.)
9. Serman L. S., Pokrovskiy V. N. *Physical and chemical methods of water treatment at thermal power plants*. Moscow: Energoatomizdat, 1991; 328 p. (In Russ.) URL: <https://djvu.online/file/VgYIHnRn9Da0p>
10. Frog B. N., Pervov A. G. *Water treatment*. Moscow: ASV; 2014. 512 p. (In Russ.) [https://www.litres.ru/get\\_pdf\\_trial/17187451.pdf](https://www.litres.ru/get_pdf_trial/17187451.pdf)
11. Ivanov A. E., Volkova O. A., Klyushenkova M. I., Berengarten M. G. *Optimization of iron removal process in artesian waters*. Voda: khimiya i ekologiya. 2011;(4):25–31. (In Russ.) URL: <https://www.elibrary.ru/ohupun>
12. Lavrov N. A., Skornyakova Ye. A. Modeling of processes of liquid purification from dissolved gas during bubbling. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series mechanical engineering*. 2010;(S1):155–160. (In Russ.) URL: <https://www.elibrary.ru/ncesuh>
13. Levich V. G. *Physicochemical Hydrodynamics*. Moscow: Gosudarstvennoye izdatel'stvo fiziko-matematicheskoy literatury; 1959. 700 p. (In Russ.) URL: <https://djvu.online/file/cy4jzFbJHOD4E>
14. Bazarov Yu. B., Meshkov D. Ye., Meshkov Ye. Ye., Sivolgin V. S. Investigation of the rise of an air bubble in a square water channel. *Vestnik Sarovskogo FiZTekha*. 2005;(8):68–73. (In Russ.) URL: <http://videoscan.ru/page/805>



15. Kukhtin B. A., Chernova O. B. *Surface phenomena and dispersed systems*. Vladimir: VISU; 2021. 153 p. (In Russ.) URL: <https://dspace.www1.vlsu.ru/bitstream/123456789/9073/1/02215.pdf>
16. Kopylov A. S., Lavygin V. M., Ochkov V. F. *Water treatment in the energy sector*. Moscow: MPEI; 2003. 309 p. (In Russ.)
17. Ostrovskiy G. M. (eds.) *New Handbook for Chemists and Technologists. Processes and Equipment for Chemical Engineering. Part 2*. Saint Petersburg: NPO «Professional»; 2006. 916 p. (In Russ.)
18. Kafarov V. V. *Fundamentals of Mass Transfer*. Moscow: Vysshaya shkola; 1979. 439 p. (In Russ.)
19. Zhulin A. G., Sidorenko O. V., Belova L. V. Bubbler degassers for iron removal stations (general recommendations for use and calculation). *News of higher educational institutions. Construction*. 2012;(3):39–48. (In Russ.) URL: <https://www.elibrary.ru/pashqx>
20. Abdel-Rahman Z. A., Hasanb B. O., Abdullah A. K. A study of mass transfer into a liquid falling film in spiral tubes using CO<sub>2</sub> - water system. *The Iraqi Journal For Mechanical And Material Engineering*. 2010;Special Issue (B):62–70. URL: [https://www.researchgate.net/publication/271135494\\_A\\_STUDY\\_OF\\_MASS\\_TRANSFER\\_INTO\\_A\\_LIQUID\\_FALLING\\_FILM\\_IN\\_SPIRAL\\_TUBES\\_USING\\_CO\\_2\\_-\\_WATER\\_SYSTEM](https://www.researchgate.net/publication/271135494_A_STUDY_OF_MASS_TRANSFER_INTO_A_LIQUID_FALLING_FILM_IN_SPIRAL_TUBES_USING_CO_2_-_WATER_SYSTEM)
21. Ramm V. M. *Gas Absorption*. 2<sup>nd</sup> edition, revised. Moscow: Khimiya; 1976. 656 p. (In Russ.) URL: <https://djvu.online/file/uWpBytFV8pHA9?ysclid=mhcyga4cas342940059>
22. Devyanin V. A. Regularities of bubble formation on the holes of immersed hole sheets of bubble devices. *Teploenergetika = Thermal Engineering*. 2024;(8):42–54. <https://doi.org/10.56304/S0040363624700097>
23. Bolotova O. V. *Research on the reduction of carbon dioxide content in groundwater in the Tyumen region: abstract of a dissertation for the degree of candidate of technical sciences*. Nizhny Novgorod, 2005. 16 p. (In Russ.) <https://viewer.rsl.ru/ru/rsl01002973753?page=4&rotate=0&theme=white>
24. Zhulin A. G., Bolotova O. V. On the assignment of bubbling parameters for removing carbon dioxide from groundwater during iron removal. *News of higher educational institutions. Construction*. 2002;(12):66–70. (In Russ.)
25. Lapteva E. A., Farakhov M. I. Determining the efficiency of desorption of corrosive-active gases in columns with chaotic and regular nozzles. *Thermal Engineering*. 2021;68(2):165–169. <https://doi.org/10.1134/S0040601521010158>
26. Flagiello D., Parisi A., Lancia A., Di Natale F. A Review on gas-liquid mass transfer coefficients in packed-bed columns. *ChemEngineering*. 2021;5(3):43. <https://doi.org/10.3390/chemengineering5030043>
27. Echarte R., Campana H., Brignole E. A. Effective areas and liquid film mass transfer coefficients in packed columns. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*. 1984;23:349–354.
28. Dytnerskiy Yu. I. *Chemical engineering processes and apparatus. Part 2. Mass transfer processes and apparatus*. 2<sup>nd</sup> edition. Moscow: Khimiya; 1995. 368 p. (In Russ.) URL: <https://djvu.online/file/9f5bpkurfGX63?ysclid=mhd0g1jj7s967271817>



#### Информация об авторах

**Жулин Александр Гаврилович**, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры инженерных систем и сооружений, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация, [zhulinag@tyuiu.ru](mailto:zhulinag@tyuiu.ru)

**Сидоренко Ольга Владимировна**, канд. техн. наук, доцент, заведующая кафедрой инженерных систем и сооружений, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация, [sidorenkoov@tyuiu.ru](mailto:sidorenkoov@tyuiu.ru), <https://orcid.org/0000-0003-3177-3025>

#### Information about the authors

**Alexander G. Zhulin**, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor in the Department of Engineering Systems and Structures, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation, [zhulinag@tyuiu.ru](mailto:zhulinag@tyuiu.ru)

**Olga V. Sidorenko**, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Engineering Systems and Structures, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation, [sidorenkoov@tyuiu.ru](mailto:sidorenkoov@tyuiu.ru), <https://orcid.org/0000-0003-3177-3025>

Получена 04 сентября 2025 г., одобрена 13 ноября 2025 г., принята к публикации 03 декабря 2025 г.

Received 04 September 2025, Approved 13 November 2025, Accepted for publication 03 December 2025