

# ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ УДАЛЕНИЯ РАСТВОРЕННОГО МЕТАНА В БАРБОТАЖНЫХ ДЕГАЗАТОРАХ

**Проведены исследования по десорбции метана на модели барботажного дегазатора. Получены экспериментальные зависимости для проектирования дегазаторов барботажного типа. Установлены оптимальные режимы работы барботажных десорберов.**

## Введение

**Н**еобходимость удаления метана из подземных вод в процессе их очистки на станциях обезжелезивания определяется не столько технологическими требованиями, сколько требованиями по взрыво- и пожаробезопасности [1]. Исследования по десорбции метана, проведенные на различных конструкциях дегазаторов, показали, что наибольший эффект газоудаления наблюдается в аппаратах барботажного типа [2]. Теоретические исследования десорбции метана в барботажных дегазаторах позволили выявить причины их высокой эффективности, а также установить, что в общем виде процесс десорбции в дегазаторах барботажного типа описывается выражением [3]:

$$Nu = A Re^m Pr^n, \quad (1)$$

где  $Nu$  – диффузионный критерий Нуссельта;  $Pr$  – диффузионный критерий Прандтля;  $Re$  – критерий Рейнольдса.

Раскрыв критерии и переписав выражение относительно  $K_v$ , получена зависимость изменения объемного коэффициента массопередачи  $K_v$ :

$$K_v = A \frac{D_{ж}}{d_{п}^2} \left( \frac{U_{ж} d_{п}}{v_{ж}} \right)^m \left( \frac{v_{ж}}{D_{ж}} \right)^n \quad (2)$$

где  $d_{п}$  – диаметр пузырьков, м;  $D_{ж}$  – коэффициент диффузии удаляемого газа в воде,  $m^2/c$ ;  $v_{ж}$  – кинематический коэффициент

вязкости воды,  $m^2/c$ ;  $U_{ж}$  – средняя скорость движения воды в дегазаторе,  $m/c$ .

## Материалы и методы исследования

**Д**ля изучения процесса десорбции метана в лабораторных условиях на модели дегазатора был проведен ряд экспериментов. Диаметр модели, для исключения влияния пристеночного эффекта, принят равным 0,145 м, минимальная толщина продуваемого слоя – 0,6 м, полная высота модели – 2,5 м. Воздухораспределительное устройство выполнено из перфорированных труб. Диаметр отверстий, для предотвращения кольматации окисляющимися железом фосфатными комплексами, на основании опыта эксплуатации станций водоподготовки городов Сургута, Лангепаса и др. составил 2 мм. Для исключения попадания воздуха в отводящий трубопровод воздухо-распределительная система установлена на высоте 0,6 м от дна аппарата, а ниже запроектирована отстойная зона для выделения пузырьков воздуха из обработанной воды. Подача исходной воды осуществлялась в верхнюю часть модели и с помощью перфорированного дырчатого листа распределялась по площади дегазатора. Отвод дегазированной воды производился с помощью трубопровода, врезанного на высоте 0,3 м от дна аппарата. Схема лабораторной установки приведена на *рис. 1*. Диапазон изменения скоростей движения воды  $U_{ж}$ , воздуха  $U_{г}$  и удельного расхода воздуха в дегазаторе  $q_{уд}$  приняты в соответствии с режимами работы промышленных аппаратов равными:  $U_{ж} = 0,1...2,0$  см/с,  $U_{г} = 1,0...10$  см/с,  $q_{уд} = 1,0...15,0$   $m^3$  воздуха на 1  $m^3$  воды.

**Д.В. Глазков\***,  
кандидат  
технических наук,  
доцент, доцент  
кафедры  
«Гидравлика,  
водоснабжение,  
водные ресурсы  
и экология»,  
ФГБОУ ВПО  
Сибирский  
государственный  
университет путей  
сообщения

\* Адрес для корреспонденции: [gdv@myttk.ru](mailto:gdv@myttk.ru)

## Результаты и их обсуждение

Исследования проводились в несколько этапов. На первом этапе изучались массообменные процессы, а именно: устанавливалась зависимость коэффициента десорбции от скорости и удельного расхода воздуха, определялось влияние удельного расхода воздуха на снижение остаточных концентраций метана, а также изучалась зависимость коэффициента массопередачи от скорости движения воды в аппарате. Основные результаты испытаний приведены на рис. 2–5. Анализ полученных результатов позволил сделать следующие выводы:

- 1) подача воздуха в количествах свыше  $15 \text{ м}^3$  на  $1 \text{ м}^3$  обрабатываемой воды практически не оказывает влияния на величину коэффициента десорбции и не отвечает экономическим показателям;
- 2) значение коэффициента десорбции возрастает прямо пропорционально скорости движения обрабатываемой воды;
- 3) влияние приведенной скорости воздуха на величину коэффициента массопередачи практически исчезает при скоростях более  $5 \text{ см/с}$ ;
- 4) количество метана в отдуваемом воздухе при любых режимах работы не достигает взрывоопасной концентрации  $5 \text{ об.}\%$ .

На втором этапе исследовались основные параметры барботажного слоя: размеры и скорость пузырей, газосодержание, продольное перемешивание.

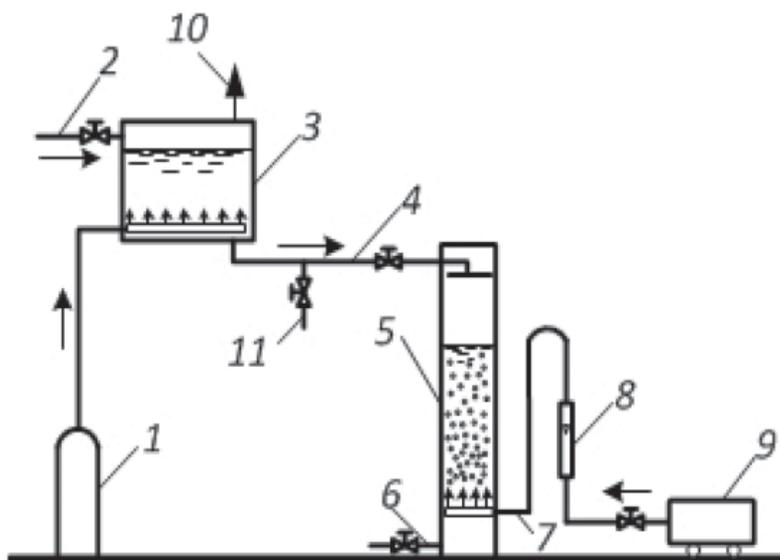


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

1 – баллон с метаном; 2 – подача водопроводной воды; 3 – бак для приготовления исследуемой воды; 4 – трубопровод подачи газированной воды; 5 – дегазатор; 6 – отвод дегазированной воды; 7 – подача воздуха; 8 – ротаметр; 9 – компрессор; 10 – отвод избыточного газа; 11 – проботборник.

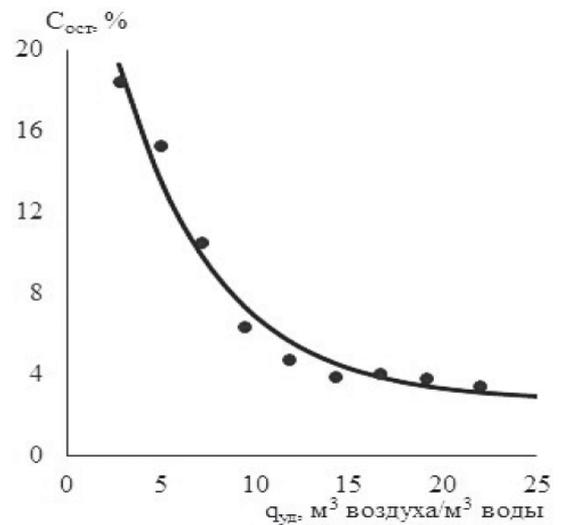


Рис. 2. Зависимость снижения остаточных концентраций от удельного расхода воздуха.

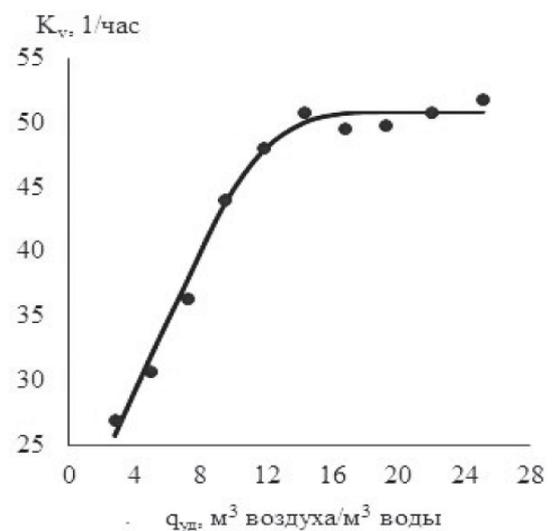


Рис. 3. Зависимость коэффициента десорбции от удельного расхода воздуха.

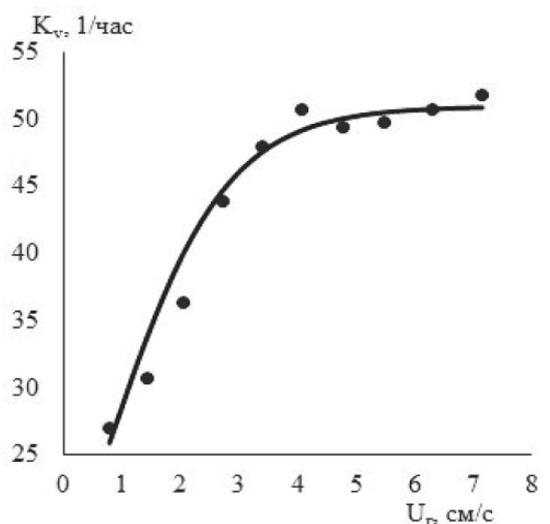
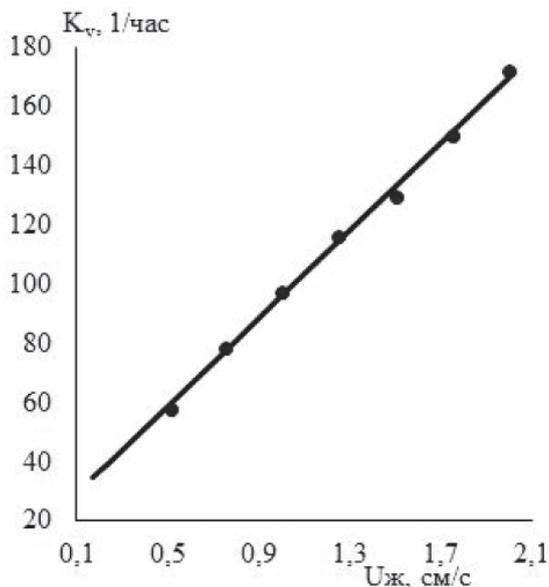


Рис. 4. Зависимость коэффициента десорбции от приведенной скорости продуваемого воздуха.



**Рис. 5.** Зависимость коэффициента десорбции от приведенной скорости воды.

В результате опытов было определено, что при скоростях продуваемого воздуха  $U_r$  до 5,5 см/с в аппарате устанавливается пузырьковый режим, при котором диаметры пузырей малы, их коалесценция по высоте практически отсутствует, а движение равномерно. При скоростях от 5,5 см/с до 7,15 см/с устанавливается режим турбулентных вихрей. В этом случае скорость коалесценции газовых пузырей существенно возрастает, в потоке одновременно присутствуют как мелкие, так и крупные пузыри, всплывающие с различными скоростями. Средние диаметры пузырей в поставленных опытах изменялись примерно от 6 до 8 мм, при этом уменьшение размеров происходило с увеличением скорости продуваемого воздуха.

И в первом и во втором случаях весь газожидкостный слой разбивался на три зоны. Первая зона располагалась непосредственно над газораспределительным устройством, в ней происходило распределение пузырей по сечению дегазатора. Вторая зона, зона барботажа, занимала большую часть объема аппарата и располагалась над первой. В этой зоне воздух распределялся в воде в виде пузырьков, поведение которых определялось гидродинамикой потока и физико-химическими свойствами жидкости. В третьей зоне, в верхней части барботажного слоя, происходила коалесценция газовых пузырей. Как показали эксперименты, границы зон зависели от приведенной скорости воздуха. При увеличении последней граница третьей зоны смещается вниз, а первой – вверх. Средняя скорость подъема пузырей в барботажном

режиме составила примерно 0,25 м/с, в режиме турбулентных вихрей – 0,5 м/с.

Изучение газосодержания барботажного слоя  $\phi$  выявило, что оно зависит от приведенной скорости воздуха и высоты продуваемого слоя  $H_0$ . При этом величина газосодержания возрастает с увеличением скорости подаваемого воздуха или с уменьшением высоты слоя. Обзор литературных источников [4-7 и др.] и проведенные эксперименты позволили установить, что наиболее точно значения  $\phi$  для различных режимов аппроксимирует уравнение Хикита [4], которое и принято для дальнейших расчетов.

Исследования продольного перемешивания жидкой и газообразной фазы показали, что коэффициент продольного перемешивания  $D_L$ , характеризующий гидродинамическую структуру движущегося потока, не зависит от высоты газожидкостного слоя и увеличивается с возрастанием скорости воздуха, что объясняется увеличением степени циркуляции воды в аппарате. Вместе с этим, во всех работах по изучению продольного перемешивания отмечается увеличение  $D_L$  с увеличением диаметра аппарата за счет усиления поперечной неравномерности [5, 8, 9 и др.]. Заключительным этапом лабораторных исследований стало получение зависимости изменения коэффициента десорбции  $K_v$ , позволяющей аналитическим путем находить значение  $K_v$  для заданных условий работы десорбера. Для этой цели было использовано критериальное уравнение массообмена (1) с преобразованиями, сделанными на основании обработки данных исследований на модели барботажного дегазатора. С учетом проведенных экспериментов оно приняло вид

$$Nu = A Re^m Pr^{0,5}, (3)$$

или в развернутом виде

$$\frac{K_v d_{п\text{ ср}}^2}{D_{ж}} = A \left( \frac{U_{ж} d_{п\text{ ср}}}{(1-\phi)v_{ж}} \right)^m \left( \frac{v_{ж}}{D_{ж}} \right)^{0,5}. (4)$$

Показатель степени  $u$  критерия Прандтля для наблюдаемого режима барботажа, на основании работ [5, 6, 8] и ряда других ученых, принят равным 0,5. Преобразуя данное выражение к виду  $Nu / Pr^{0,5} = A Re^m$  и логарифмируя его, получена линейная зависимость. Используя метод наименьших квадратов, были вычислены коэффициенты регрессии

$$y = 0,66x + 0,29. (5)$$

При уровне значимости  $\alpha=0,05$ , как показала проверка, это уравнение адекватно описывает экспериментальные данные. Проводя

обратные преобразования, было получено критериальное уравнение десорбции метана в барботажных дегазаторах

$$Nu = 1,94 Re^{0,66} Pr^{0,5} . (6)$$

Выразив отсюда  $K_v$ , получаем экспериментальную зависимость изменения коэффициента десорбции от влияющих факторов

$$K_v = \frac{AD_{ж}}{d_{п\text{ ср}}^2} \left( \frac{U_{ж} d_{п\text{ ср}}}{(1-\varphi)v_{ж}} \right)^{0,66} \left( \frac{v_{ж}}{D_{ж}} \right)^{0,5} . (7)$$

Таким образом, определив по заданным условиям работы дегазатора количество компонента G, передаваемого при десорбции из одной фазы в другую и среднюю движущую силу десорбции  $\Delta C_{ср}$  [3], и рассчитав по выражению (7)  $K_v$ , можно установить требуемый объем рабочей части аппарата V, или, зная площадь поперечного сечения, непосредственно рабочую высоту H.

Однако при проектировании промышленных аппаратов большого диаметра ( $D_c \geq 0,2$  м) величина коэффициента десорбции, рассчитанного по уравнению (7), может давать завышенные значения. Это связано с тем, что при увеличении диаметра аппарата растет поперечная неравномерность, неизбежно приводящая к повышению коэффициентов продольного перемешивания. Усиление перемешивания, в свою очередь, приводит к снижению продольного градиента концентрации и, как следствие, к уменьшению средней движущей силы, изменение которой оказывает непосредственное влияние на зна-

**Ключевые слова:**  
растворенные газы,  
десорбция метана,  
барботажный  
дегазатор

чение коэффициентов массопередачи. Поэтому для аппаратов, диаметр которых превышает 0,145...0,2 м, пригодность уравнения (7) необходимо проверять.

## Заключение

**П**одача воздуха в количествах более 15 м<sup>3</sup> на 1 м<sup>3</sup> обрабатываемой воды практически не оказывает влияния на величину коэффициента десорбции и газоудаления.

Значение коэффициента десорбции возрастает прямо пропорционально скорости движения обрабатываемой воды.

Влияние приведенной скорости воздуха на величину  $K_v$  практически исчезает при  $U_{г} > 5$  см/с, уменьшение скорости ниже этой величины вызывает резкое снижение значения  $K_v$ .

Зависимость изменения коэффициента десорбции метана в дегазаторах барботажного типа диаметром 0,145...0,2 м при  $Re = 8,5...100$  определяется уравнением (7).

Оптимальный режим работы дегазатора, соответствующий наибольшей эффективности процесса десорбции и минимальным экономическим затратам, осуществляется при следующих параметрах:

- ◆ удельный расход воздуха от 1 до 15 м<sup>3</sup> воздуха на 1 м<sup>3</sup> воды;
- ◆ приведенная скорость движения воздуха 4...5 см/с;
- ◆ скорость движения воды должна удовлетворять перечисленным условиям, т.е.  $U_{ж} = q_{уд} / U_{г}$



Количество метана в отдуваемом воздухе не достигает взрывоопасной концентрации 5 об.%, при любых режимах работы, что удовлетворяет требованиям технологии и требованиям по взрывобезопасности.

#### *Литература*

1. Артеменок Н.Д. Очистка подземных вод нефтегазоносных регионов Западной Сибири для целей хозяйственно-питьевого водоснабжения. Дис. д-ра. техн. наук. С.-Петербург, 1992. 318 с.
2. Глазков Д.В. Оценка методов удаления растворенных газовых примесей из подземных вод Западно-Сибирского мегабассейна // Вопросы гидравлики, водоснабжения, водоотведения: Сб. науч. тр. Новосибирск, 2001. С. 28-33.
3. Глазков Д.В. Теоретические исследования десорбции метана из подземных вод Западно-Сибирского мегабассейна в дегазаторах барботажного типа // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. 2010. № 3. С. 52 – 55.

4. Hikita H. Gas hold-up in bubble columns / H. Hikita, S. Asai, K. Tanigawa, K. Segawa, M. Kitao // The Chemical Engineering Journal. 1980. V. 20. P. 59-67.
5. Рамм В.М. Абсорбция газов. М.:Химия, 1966. 768 с.
6. Кастальский А.А. Проектирование устройств для удаления из воды растворенных газов в процессе водоподготовки. М.: Госстройиздат, 1957. 148 с.
7. Кутателадзе С.С. Гидродинамика газожидкостных систем / С.С. Кутателадзе, М.А. Стырикович. М.: Энергия, 1976. 296 с.
8. Кафаров В.В. Основы массопередачи. М.: Высшая школа, 1979. 439 с.
9. Жукова Т.Б. Исследование и моделирование барботажных реакторов колонного типа / Т.Б. Жукова, В.В. Кафаров. М.: ВИНТИ, 1991. 100 с.



D.V. Glazkov

## DYNAMICS OF DISSOLVED METHANE REMOVAL IN BUBBLE DEGASSER

Methane desorption has been studied with bubble degasser being a model. The experimental correlations were obtained and used for bubble degasser design. The optimum operating conditions for bubbling stripper were fixed.

**Key words:** dissolved gas, methane desorption, bubble degassing