



## АНАЛИЗ МЕТОДОВ СНИЖЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ УГЛЕКИСЛОТЫ НА СТАНЦИЯХ ОБЕЗЖЕЛЕЗИВАНИЯ

Приведены возможные количественные содержания газов в подземной воде, представлены методы дегазации воды, иллюстрируются различные конструктивные схемы дегазаторов по удалению углекислоты, впервые обобщённо даются способы подачи воды на барботажные дегазаторы. Приведены сравнительные результаты исследований барботажных дегазаторов.

Растворенные газы в подземных водах, углекислота, методы дегазации, десорбция, барботажные дегазаторы, гравийный дегазатор, перегородчатый дегазатор.

В условиях Тюменского региона в качестве источников хозяйственно-питьевого водоснабжения широко используются подземные воды, особенностью качественного состава которых является высокое содержание органических примесей (окисляемость 11,7–23,0 мг/дм<sup>3</sup>), растворенных форм железа (1,14–12,0 мг/дм<sup>3</sup>) и марганца (0,02–4,0 мг/дм<sup>3</sup>), углекислоты (20,0–220,0 мг/дм<sup>3</sup>), сероводорода (0,2–1,95 мг/дм<sup>3</sup>), метана (0,5–29,0 мг/дм<sup>3</sup>) [1].

Обогащение подземных вод углекислотой может осуществляться: при инфильтрации поверхностных вод в результате биохимических процессов в почвах [2] и в процессах активной миграции газов метаморфического, магматического и нефтегазового происхождения сквозь трещины и поры горных пород в водоносные горизонты [3].

При обезжелезивании наличие углекислоты является негативным фактором, влияющим на процессы окисления железа и марганца, в связи с низкими значениями pH и Eh воды, завоздушиванием загрузки фильтров, блокирующим образование каталитической пленки, формирующейся на зернах загрузки. С целью снижения отрицательного влияния CO<sub>2</sub> и повышения эффективности очистки подземной воды от примесей, в технологическую схему включают сооружения по удалению растворенных газов.

Методы дегазации воды подразделяются на физические и химические [4, 5]. Химические методы удаления из воды растворённых газов заключаются в их химическом связывании введением реагентов или фильтрованием через специальные загрузки.

Для целей хозяйственно-питьевого назначения избыточное содержание углекислоты преимущественно удаляется физическими методами, которые осуществляются:

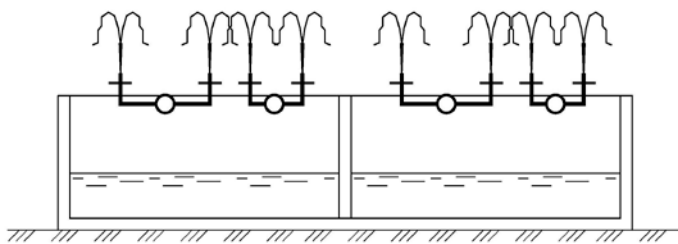
- аэрированием – вода, содержащая удаляемый газ, приводится в соприкосновение с воздухом, парциальное давление которого в нем близко к нулю;

- созданием условий, при которых растворимость газа в воде становится минимальной – воду нагревают или доводят до кипения, или понижают давление до величины, при которой вода кипит без дополнительного подогрева в вакуумных дегазаторах.

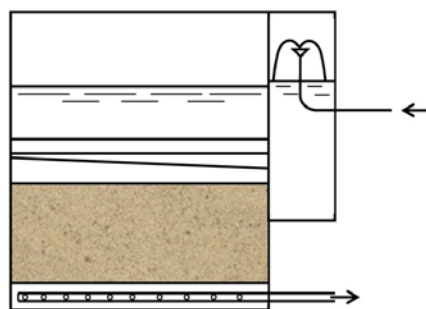
К физическим методам дегазации относятся: 1) свободный излив; 2) разбрызгивание над водной поверхностью (без и с принудительной подачей воздуха) – брызгальные установки; 3) упрощенная аэрация; 4) дегазация-аэрация на градирнях (без и с принудительной подачей воздуха) – насадочные дегазаторы; 5) эжекционная дегазация-аэрация; 6) барботаж (в свободном объеме, двойного действия, пенного типа, с гравийной загрузкой); 7) вихревая дегазация (без и с принудительной подачей воздуха); 8) вакуумная, 9) термическая и 10) ультразвуковая деаэрация; 11) волновая дегазация; 12) мембранная [5–13]. Некоторые из приведенных физических способов дегазации воды применяются только при водоподготовке (теплоэнергетика) – эжекционная дегазация-аэрация, термическая, вихревая, ультразвуковая деаэрация; ряд других – при водоочистке для хозяйственно-питьевых нужд и отдельные находятся в стадии экспериментальных.

В хозяйственно-питьевом водоснабжении нашли применение следующие конструктивные решения: излив воды (из воронки, отверстий и сопел, ступенчатый), градирни (насадочные, контактные), эжекционные и барботажные (рис. 1) [7, 8, 12].

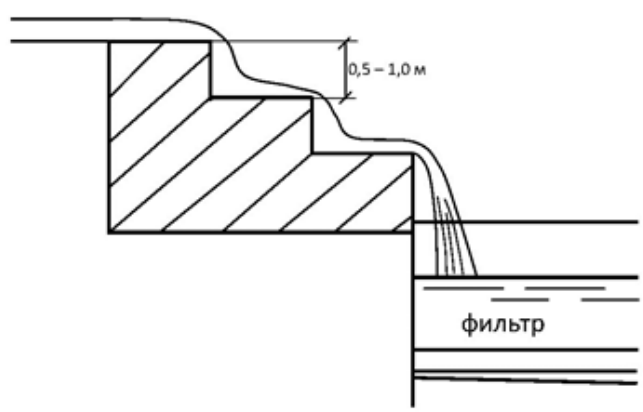
При принудительной подаче воздуха в сооружения с целью достижения высокой эффективности его использования применяют различные способы подачи воды на дегазаторы (рис. 2). Максимальное использование воздуха достигается при сочетании процесса разбрызгивания воды с последующей ее продувкой (рис. 2в), но способ требует дополнительных затрат.



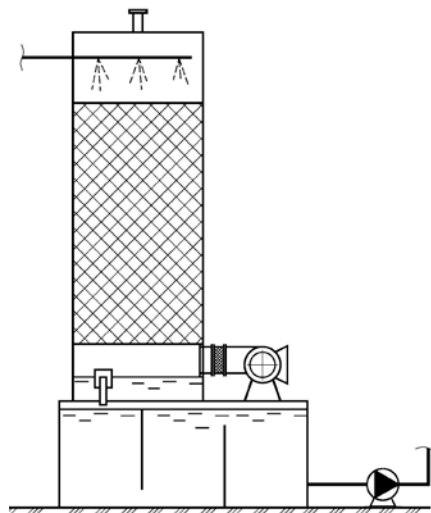
а) излив – разбрызгивание



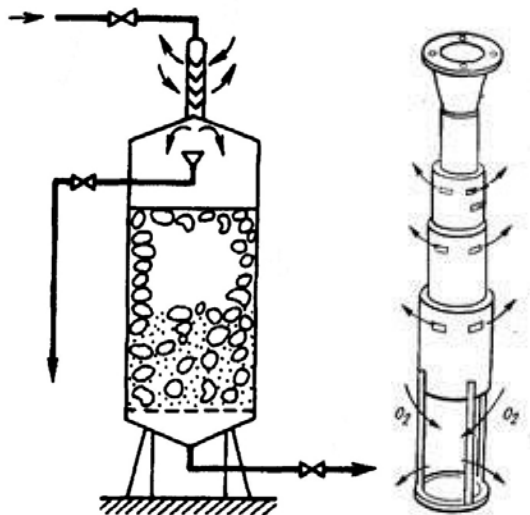
б) излив из воронки



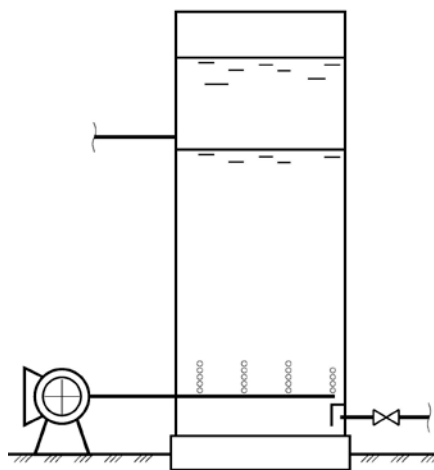
в) ступенчатый каскад



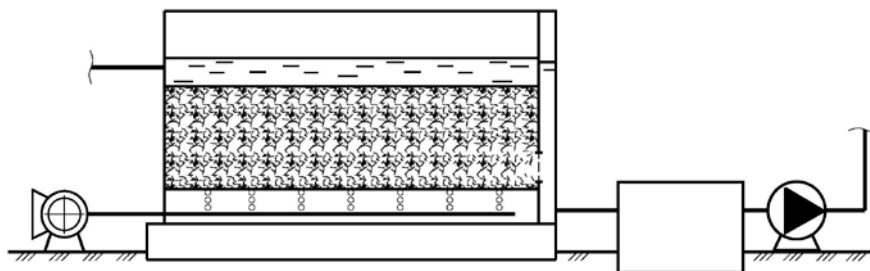
г) насадочная градирня



д) эжекционный

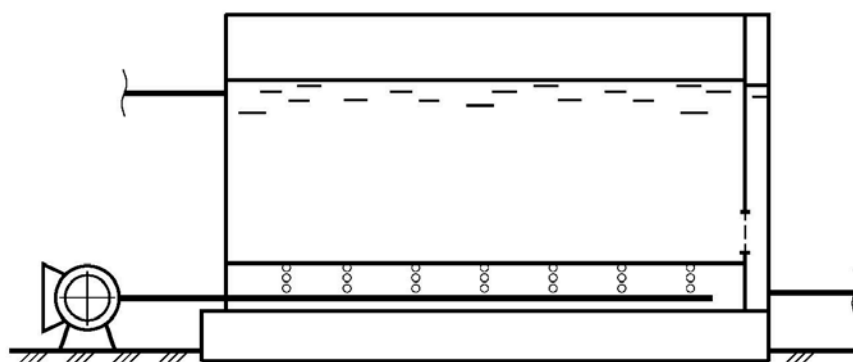


е) барботажный

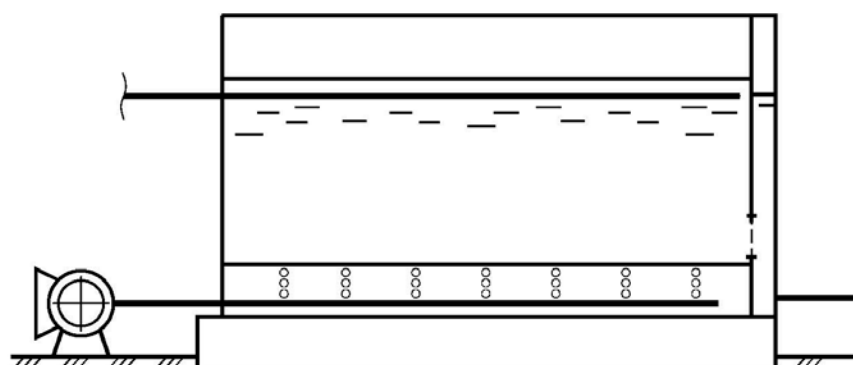


ж) гравийный

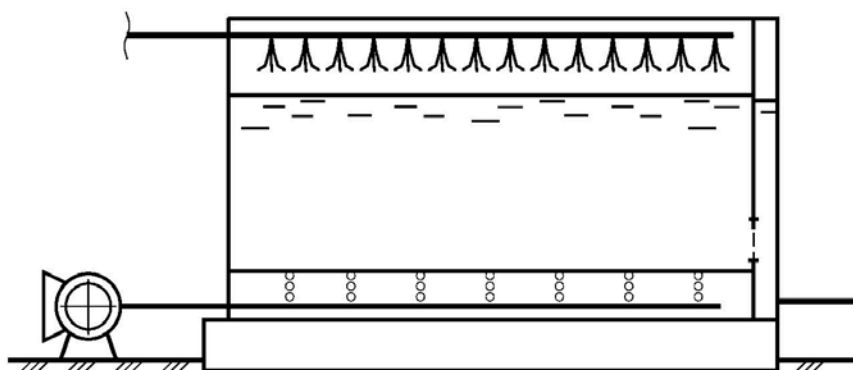
Рис. 1. Конструкции, применяемые для дегазации воды в хозяйственно-питьевом водоснабжении



а) выпуск под уровень



б) дырчатая труба под уровень



в) разбрызгивание над поверхностью

Рис. 2. Способы подачи исходной воды в дегазаторы

На кафедре «Водоснабжение и водоотведение» ТИУ проведены исследования по изучению процесса десорбции углекислоты из подземной воды на дегазаторах барботажного типа. В общем случае барботажным дегазаторам характерна конструктивная и эксплуатационная простота, возможность регулирования эффекта удаления углекислоты; их недостатком является относительно низкая эффективность использования подаваемого воздуха. С целью повышения эффективности удаления углекислоты при барботаже проведены исследования по интенсификации процесса десорбции.

При барботаже подземной воды скорость десорбции углекислоты зависит от: величины поверхности контакта фаз, концентрационного напора, физико-химических свойств газа и жидкости, скоростей движения фаз и конструктивных особенностей массооб-

менного аппарата [14]. Следовательно, для повышения эффективности массопереноса необходимо создать гидродинамические условия, обеспечивающие: 1) развитие поверхности контакта фаз вода–воздух; 2) противоточность движения фаз, при которых эффекты выше по сравнению с другими способами движения (прямоток, перекрестный ток и др.); 3) интенсивную турбулизацию взаимодействующих фаз.

Как показали исследования гравийного дегазатора [1], наибольшая активация массопереноса наблюдается в загрузке, у которой в малом межпоровом пространстве создаются активные зоны турбулизации. Но при высокой эффективности данного дегазатора (более 80%), в загрузке имеет место отложение оксидов железа, что требует ее регенерации, к тому же малые скорости противотока обуславливают необходимость повышения площади сооружения.

С целью увеличения эффективности использования воздуха по удалению углекислоты из подземной воды была предложена конструкция барботажного дегазатора, оснащенного поперечными направляющими перегородками – турбулизаторами воды (рис. 3) [15].

Обобщенные результаты исследований по снижению содержания углекислоты на дегазаторах различного типа, проведенных в производственных условиях на подземных водах Тюменского региона, сведены в табличную форму (табл.).

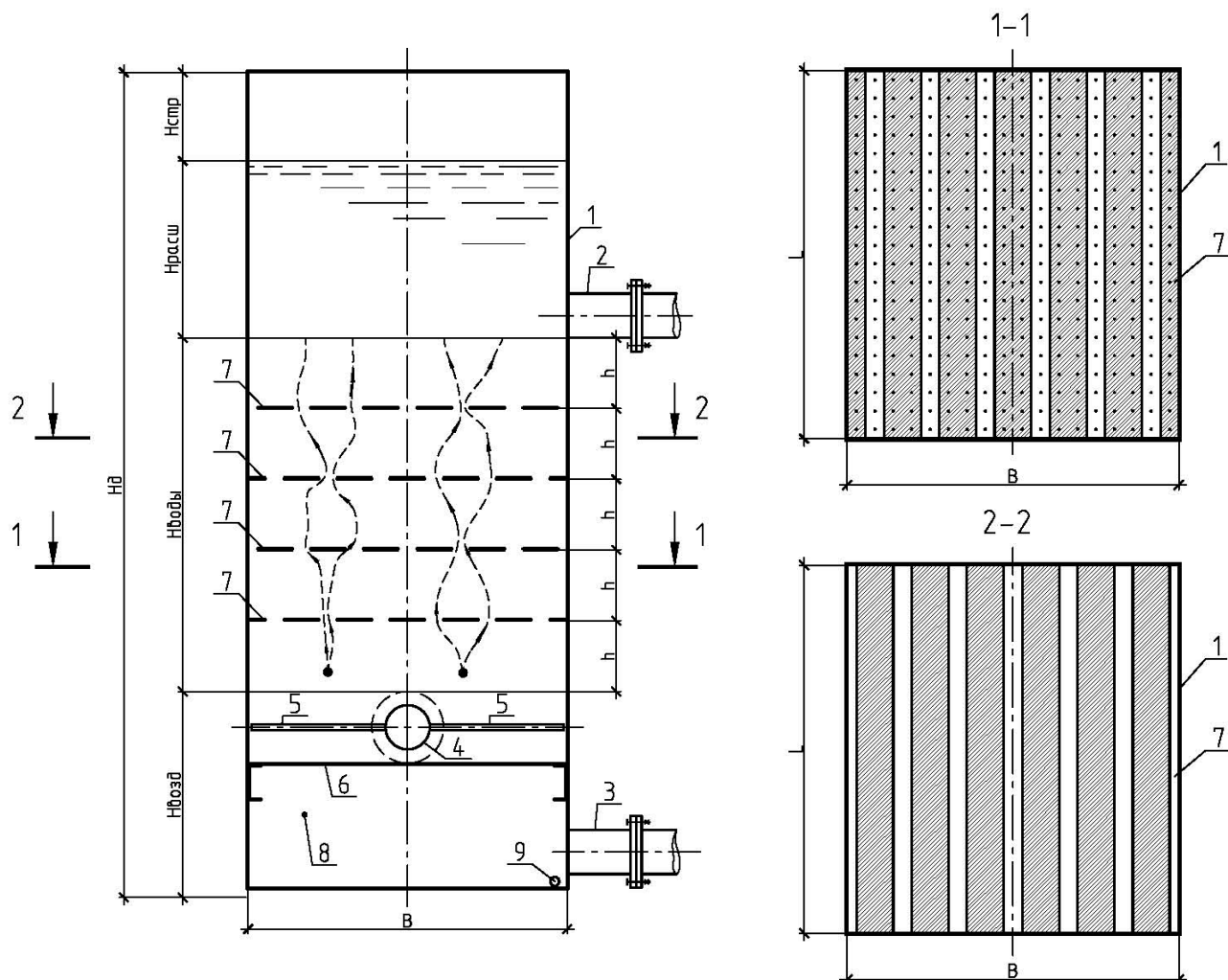


Рис. 3. Перегородчатый дегазатор для удаления углекислоты:  
 1 – корпус, 2 – подводящий трубопровод воды, 3 – отводящий трубопровод дегазированной воды,  
 4 – коллектор воздухоподачи, 5 – воздухораспределительные трубы с отверстиями,  
 6 – дырчатое днище для равномерного отвода воды, 7 – ряды горизонтальных перегородок  
 с проходами в шахматном порядке, 8 – поддонное пространство, 9 – дренажный трубопровод

Таблица

### Основные рабочие параметры дегазаторов

Тип дегазатора	Основные рабочие параметры и зависимости					
	Исходное содержание $CO_2^{исх}$ , мг/дм <sup>3</sup>	Эффективность, %	Удельные расходы воздуха, м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	Тип распределителей воздуха	Скорость движения воды, м/ч	Особые параметры
Излив из отверстий	До 60	33	-	-	-	с высоты 0,5–1,5 м
Барботаж в свободном объеме	До 100	До 60	4–12	- отверстия $d_{отв} = 3–6$ мм; - колпачок ВОДГЕО	до 40	-
Гравийно-щебеночный	До 200	До 80	4–6	колпачок ВОДГЕО	5–20 (5 мин продувка)	диаметр фракций 5–10 мм и 10–20 мм; высота слоя загрузки 1,0 м
Перегородчатый	До 200	До 80	4–14	отверстия $d_{отв} = 5–6$ мм	20–120	количество перегородок – 1–5 штук

Расчетные зависимости для различных типов дегазаторов имеют вид:

1. Излив из отверстий:

$$C_{кон} = 0,769C_{исх} + 752 \cdot d - 7,36 \cdot h - 0,42. \quad (1)$$

2. Барботаж в свободном объеме:  
дырчатый распределитель воздуха

$$CO_2^{кон} = 40,64 + 0,67 \cdot CO_2^{исх} + 0,56 \cdot q_{y\partial} - 38,14 \cdot h_{воды} - 0,27 \cdot V_{воды} - 0,022 \cdot CO_2^{исх} \cdot q_{y\partial} + 10 \cdot h_{воды}^2 \quad (2)$$

колпачок ВОДГЕО

$$\beta_v = 0,02 \frac{D \cdot a \left( \frac{\omega \cdot d}{v} \right)^{1,45} \left( \frac{v}{D} \right)^{0,5}}{d_n} q_{y\partial}^{0,55}. \quad (3)$$

3. Гравийно-щебеночный дегазатор:

$$\beta = A \frac{D}{d_{cp}} \left( \frac{\omega \cdot d}{v} \right)^a \left( \frac{v}{D} \right)^{0,5} q_{y\partial}^{0,18} \quad (4)$$

$$CO_{2кон} = 80,04 - 1755,64 \cdot d_{cp} - 0,72 \cdot q_{y\partial} - 339,57 \cdot t + 8,9 \cdot h + 1323,87 \cdot d_{cp} \cdot t + 763,39 \cdot t^2 + 23,14 \cdot t \cdot h - 16,12 \cdot h^2 \quad (5)$$

4. Перегородчатый дегазатор:

$$N_{треб} = 8,12 + 0,03 \cdot CO_2^{исх} - 0,63 \cdot q_{y\partial} - 0,12 \cdot CO_2^{треб} + 0,03 \cdot q_{y\partial}^2 \quad (6)$$

$$CO_2^{кон} = 9,99 + 0,997 \cdot CO_2^{исх} - 4,55 \cdot q_{y\partial} - 7,81 \cdot N_{пер} - 0,001 \cdot (CO_2^{исх})^2 + 0,27 \cdot q_{y\partial}^2 - 0,018 \cdot CO_2^{исх} \cdot q_{y\partial} \quad (7)$$

при  $V_{воды} = 20 \text{ м}^3/\text{ч}$

где  $C_{исх}$  – концентрация углекислоты в исходной воде, мг/дм<sup>3</sup>;  $d$  – диаметр отверстий, м;  $h$  – высота падения струи, м;  $C_{кон}$  – концентрация углекислоты после дегазации, мг/дм<sup>3</sup>;  $CO_2^{исх}$  – исходного содержания углекислоты в воде, мг/дм<sup>3</sup>;  $h_{воды}$  – высоты слоя воды в барботере, м;  $V_{воды}$  – скорости движения воды, м/ч;  $q_{y\partial}$  – удельный расход воздуха, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;  $CO_2^{кон}$  – остаточного содержания углекислоты после дегазации, мг/дм<sup>3</sup>;  $\beta_v$  – объемный коэффициент десорбции;  $D$  – коэффициент диффузии, м<sup>2</sup>/с;  $a$  – удельная поверхность контакта фаз, м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>;  $d_n$  – диаметр пузырька воздуха, м;  $\omega$  – скорость движения воды в дегазаторе, м/с;  $v$  – коэффициент кинематической вязкости жидкости, м<sup>2</sup>/с;  $d$  – линейный размер дегазатора (диаметр), м;  $A$  и  $a$  – экспериментальные коэффициенты [1];  $a$  (показатель степени) – удельная поверхность контакта фаз, м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>;  $d_{cp}$  – средний диаметр гравийной загрузки, м;  $CO_{2кон}$  – концентрация углекислоты после дегазации, мг/дм<sup>3</sup>;  $h$  – высота слоя загрузки в барботере, м;  $t$  – продолжительность продувки, ч;  $N_{треб}$  – необходимого количества перегородок в дегазаторе, шт;  $CO_2^{треб}$  – требуемое содержание углекислоты после дегазации, мг/дм<sup>3</sup>;  $N_{пер}$  – количество перегородок, шт.

Подробные методики расчета по данным конструктивным решениям дегазаторов приведены в публикациях [16–19].

В статье представлен краткий обзор физических способов дегазации воды и сооружений для удаления углекислоты. В производственных условиях на реальных подземных водах с целью снижения содержания

углекислоты исследованы различные типы барботажных дегазаторов и излив из отверстий. Приведены расчетные зависимости по определению коэффициентов десорбции и возможного остаточного содержания углекислоты после дегазации.

## Литература

1. Жулин, А. Г. Барботажные дегазаторы станций обезжелезивания (общие рекомендации к применению и расчёту) / А. Г. Жулин, О. В. Сидоренко, Л. В. Белова // Известия вузов. Строительство. – 2012. – № 3. – С. 39–48.

2. Перельман, А. И. Геохимия природных вод / А. И. Перельман. – Москва : Наука, 1982. – 154 с.

3. Матусевич, В. М. Нефтегазовая геология : учебное пособие. Ч. 1. Теоретические основы нефтегазовой гидрогеологии. Ч. 2. Нефтегазовая гидрогеология Западно-Сибирского мегабассейна / В. М. Матусевич, Л. А. Ковяткина // Тюмень : Вектор Бук, 2010. – 115 с.

4. Кастальский, А. А. Проектирование устройств для удаления из воды растворенных газов в процессе водоподготовки / А. А. Кастальский. – Москва : Госстройиздат, 1957. – 186 с.

5. Журба, М. Г. Водоснабжение. Проектирование систем и сооружений : учебное пособие. Том 2 / М. Г. Журба, Л. И. Соколов, Ж. М. Говорова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : АСВ, 2004. – 496 с.

6. Клячко, В. А. Подготовка воды для промышленного и городского водоснабжения / В. А. Клячко, И. Э. Апельцин. – Москва : Издательство литературы по строительству, 1962. – 819 с.

7. Фрог, Б. Н. Водоподготовка : учебное пособие для вузов / Б. Н. Фрог, А. П. Левченко. – Москва : Издательство МГУ, 1996. – 680 с.

8. Румянцева, Л. П. Брызгальные установки для обезжелезивания воды / Л. П. Румянцева. – Москва : Стройиздат, 1973. – 104 с.

9. Дзюбо, В. В. Изучение кинетических параметров процесса аэрации-дегазации подземных вод / В. В. Дзюбо, Л. И. Алферова // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – Томск, 2002. – С. 18–21.

10. Артеменок, Н. Д. Разработка технологии очистки подземных вод для целей питьевого водоснабжения в Западной Сибири / Н. Д. Артеменок // Вестник Сибирского Государственного университета путей сообщения. – 1999. – Вып.1. – С. 54–58.

11. Сучков, В. А. Работа дегазаторов - аэраторов в схеме обезжелезивания подземных вод г. Сургута / В. А. Сучков // Водоснабжение и санитарная техника. – 2001. – № 8. – С. 32–35.

12. Технический справочник по обработке воды : в 2 томах. Том. 1: перевод с французского. – Санкт-Петербург : Новый журнал, 2007. – 878 с.

13. Мембранная дегазация . – URL: <http://www.mediana-filter.ru/degasation.html> (дата обращения 18.10.2019). – Текст : электронный.

14. Кафаров, В. В. Основы массопередачи / В. В. Кафаров. – Москва : Высшая школа, 1979. – 439 с.

15. Патент RU 2620119 C1 Российская Федерация, МПК C02F 1/20, B01D 19/00. Дегазатор воды для

удаления углекислоты : № 2016104144 : заявл. 09.02.2016 : опубл. 23.05.2017, бюл. № 15 / А. Г. Жулин, Л. В. Белова.

16. Жулин, А. Г. Расчетное уравнение к определению остаточного содержания углекислоты при дегазации подземных вод в барботажных устройствах / А. Г. Жулин, Л. В. Белова // Известия вузов. Строительство. – 2008. – № 10. – С. 69–74.

17. Жулин, А. Г. К назначению параметров барботажа при удалении углекислоты из подземной воды

при обезжелезивании / А. Г. Жулин, О. В. Болотова // Известия вузов. Строительство. – 2002. – № 12. – С. 66–70.

18. Жулин, А. Г. К расчету гравийных дегазаторов / А. Г. Жулин, О. В. Болотова // Известия вузов. Строительство. – 2003. – № 7. – С. 108–112.

19. Жулин, А. Г. Снижение концентрации углекислоты в подземных водах на перегородчатом дегазаторе / А. Г. Жулин, Л. В. Белова // Водоснабжение и санитарная техника. – 2011. – № 1. – С. 33–38.

**A.G. Zhulin, L.V. Belova, O.V. Sidorenko**

## **REVIEW OF METHODS OF REDUCING THE AMOUNT OF CARBON DIOXIDE AT THE STATIONS DEFERRIZATION OF WATER**

The article presents the possible quantitative content of gases in the underground water and the methods of degassing water. Various design schemes of the degasser to remove carbonic acid are illustrated. The ways of supplying water to the bubbler degasser are generally given for the first time. Comparative results of studies of different types of bubble degassers are presented.

Dissolved gases in the underground water, carbon dioxide, methods of degassing, desorption, bubbler degasser, gravel degasser, baffled degasser