

# ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ТРУБОПРОВОДА С РАССРЕДОТОЧЕННЫМ СБРОСОМ РАССОЛА В АКВАТОРИЮ

В. В. Миронов<sup>1</sup>, Ю. А. Иванюшин<sup>1</sup>, Д. А. Суглобов<sup>1</sup>, Д. В. Миронов<sup>2</sup>,  
А. А. Кадысева<sup>3</sup>, Е. А. Ерофеев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

<sup>2</sup> ООО «ЭЛЕКТРОРАМ», Тюмень, Россия

<sup>3</sup> Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К. А. Тимирязева,  
Москва, Россия

## HYDRAULIC CALCULATION OF THE PIPELINE WITH DISPERSED DISCHARGE OF BRINE INTO THE WATER AREA

Victor V. Mironov<sup>1</sup>, Yuriy A. Ivanyushin<sup>1</sup>, Daniil A. Suglobov<sup>1</sup>, Dmitry V. Mironov<sup>2</sup>,  
Anastasia A. Kadyseva<sup>3</sup>, Evgeniy A. Erofeev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

<sup>2</sup> LLC "ELECTRORAM", Tyumen, Russia

<sup>3</sup> Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia

**Аннотация.** При получении воды с использованием опреснительных технологий образуются значительные объемы высококонцентрированных рассолов. Решение проблемы утилизации данных отходов является важным общемировым вопросом систем охраны водных ресурсов, что подтверждает анализ исследований последнего десятилетия. В статье рассмотрен экологически безопасный способ рассредоточенного равномерного сброса рассола в акваторию, представлено разработанное техническое решение и описан принцип его действия. Приведен пример расчета диаметров отверстий распределительного трубопровода для равномерного по длине сброса рассола. Выполнен расчет радиуса и расхода рассеивающей струи на заданном расстоянии от отверстия в распределительном трубопроводе. Установлено, что разница в концентрациях

**Abstract.** When producing water using desalination technologies, significant volumes of highly concentrated brines are formed. The solution of the problem of wastes recycling is an important global issue for water protection organizations, and the studies of the last decade confirm this. The article discusses an environmentally friendly method of dispersed uniform brine discharge into the water area, presents the developed technical solution and describes the principle of its operation. As an example, the authors calculate the hole diameters of the distribution pipeline for uniform brine discharge along the length. We calculated the radius and the scattering jet rate at a given distance from the hole in the distribution pipeline. The difference in brine salt concentrations at a depth of 20 m from the discharge point between the background concentration in the sea and the salt concentration

солей рассола на глубине 20 м от точки сброса между фоновой концентрацией в море и концентрацией соли составляет от 0.439 до 0.524 % по длине сбросного трубопровода. При наличии морских течений растворение рассолов до безопасных концентраций становится еще более интенсивным. Результаты могут быть использованы при проектировании и эксплуатации соответствующих систем.

**Ключевые слова:** опреснение морской воды, рассол, рассредоточенный сброс рассола в акваторию, фоновая концентрация

**Для цитирования:** Гидравлический расчет трубопровода с рассредоточенным сбросом рассола в акваторию / В. В. Миронов, Ю. А. Иванюшин, Д. А. Суглобов [и др.]. – DOI 10.31660/2782-232X-2024-1-68-78. – Текст : непосредственный // Архитектура, строительство, транспорт. – 2024. – № 1 (107). – С. 68–78.

**For citation:** Mironov, V. V., Ivanyushin, Yu. A., Suglobov, D. A., Mironov, D. V., Kadyseva, A. A., & Erofeev, E. A. (2024). Hydraulic calculation of the pipeline with dispersed discharge of brine into the water area. *Architecture, Construction, Transport*, (1(107)), pp. 68-78. (In Russian). DOI 10.31660/2782-232X-2024-1-68-78.

## 1. Введение

Рассол – это отход, который образуется при опреснении морской воды. Опреснительные установки производят примерно 128 652 тыс. м<sup>3</sup>/день рассола по всему миру [1]. Содержание соли в концентрате после опреснения морской воды зависит от солености исходной морской воды и степени ее очистки. Соленость рассола, получаемого с помощью мембранных технологий, колеблется в диапазоне 60–85 г/л [1, 2].

Рассол утилизируют различными методами, в том числе с получением товарных продуктов в значимых объемах. Одним из способов получения коммерчески значимых объемов поваренной соли является обработка рассола на электродиализных аппаратах. При этом методе рассол подвергается обработке в электродиализных аппаратах, где происходит разделение ионов соли на положительные и отрицательные частицы. Этот процесс позволяет получить коммерчески значимые объемы поваренной соли, не сбрасывая рассол в водный объект, но для его применения необходимо высокое содержание

was found to be from 0.439 % to 0.524 % along the length of the discharge pipeline. Dissolution of brines to safe concentrations becomes even more intense in the presence of sea currents. The research results can be used in the design and operation of such systems.

**Key words:** seawater desalination, brine, dispersed brine discharge into the water area, background concentration

начальной концентрации рассола и экономическая целесообразность [3]. Иногда часть рассола добавляют в дистиллированную воду. Это позволяет уменьшить его концентрацию и сделать его менее вредным для окружающей среды. Однако важно обеспечить экономическую целесообразность такого процесса и определить оптимальное соотношение рассола и дистиллированной воды [4]. Другим способом утилизации рассола является использование выпарных бассейнов. В таких бассейнах рассол подвергается нагреванию, что приводит к испарению воды и образованию соли. Эта соль может быть далее использована в различных отраслях промышленности или на продажу. Кроме того, можно применять кристаллизаторы соли. Кристаллизация соли от раствора рассола – это процесс получения соли путем охлаждения или испарения раствора, что приводит к образованию кристаллов соли. Этот процесс широко применяется в различных областях. Эта соль в дальнейшем используется в пищевой, химической, медицинской и других отраслях промышленности.

Наиболее простой и недорогой способ утилизации рассола – сброс его в акваторию моря. Однако сброс рассола в водные объекты является серьезной проблемой для окружающей среды и оказывает негативное экологическое воздействие вследствие изменения физико-химических свойств воды морских акваторий, таких как соленость, pH и температура. Увеличение солености влияет на содержание кислорода в воде, развитие и темпы размножения многих морских организмов. Также прибрежные акватории, в которые осуществляется сброс рассола, подвергаются тепловому загрязнению. Рассол, который содержит большое количество солей, может нанести значительный вред экосистеме водных объектов, привести к гибели растительного и животного мира. Кроме того, рассол может содержать остатки различных химических веществ [5, 6, 7], например, антискалантов (полифосфаты, фосфонаты и поликарбоновые кислоты), флокулянтов (катионные полимеры) и коагулянтов ( $FeCl_3$ ,  $Fe_2(SO_4)_3$ ), образующихся на нескольких стадиях процесса опреснения, таких как промывка оборудования, предварительная обработка или последующая обработка, которые могут быть особенно опасны для морских организмов.

Исследования предыдущих лет показывают, что толерантность к повышению степени солености сильно варьируется по различным видам флоры и фауны. Например, морские травянистые растения гибнут при повышении солености морской воды на 5 %, тогда как на жизнедеятельность кораллов не оказывает влияние повышение солености свыше 10 % по отношению к первоначальной [8, 9]. Суммарная биомасса и скорость роста фитопланктона, зоопланктона и донных бактерий практически не зависят от повышения солености, но структура сформированной экосистемы и ее биологическое разнообразие часто изменяются [8, 10]. Каждая порода рыб может выживать при определенной солености воды, поэтому необходимо проводить индивидуальные оценки солености воды для различных пород [11, 12, 13]. Таким образом, для того, чтобы минимизировать негативное воздействие на морскую среду, необходимо учитывать допустимую соленость воды в зонах выброса рассола.

Сосредоточенный и рассеивающий выпуски [8, 14, 15] являются двумя основными методами сброса рассолов в акватории. После выпуска загрязненной струи в акваторию она перемешивается с окружающей водной средой. В результате процессов перемешивания и разбавления происходит снижение концентрации загрязняющих веществ. В случае, если в точке сброса превышены предельно допустимые или фоновые концентрации (в зависимости от выдвигаемых к водному объекту и выпуску требований), следует говорить о загрязнении (влиянии) выпусков на водный объект. При сосредоточенном выпуске рассол сбрасывается в определенной точке, что может привести к увеличению концентраций вредных веществ в ограниченной области и нарушению экосистемы данной зоны.

Существующие технологии рассредоточенного сброса рассола в водные объекты предполагают выпуск рассола в непосредственной близости от дна акватории [16], при этом в придонном слое морская флора и фауна наиболее уязвимы к загрязнениям.

Широкое распространение получили конструкции водовыпусков для сброса рассола с наклонными струями [17, 18] с различным углом к горизонтали. При сбросе поток рассола поднимается до конечной высоты, а затем опускается (за счет гравитации) до тех пор, пока не достигнет дна, где происходит его растекание по донной поверхности. Такой способ более сложен в организации, требует определенного значения остаточного давления для подъема рассола выше уровня сбросного выпуска и, соответственно, большей мощности насосного оборудования.

Рассеивающий выпуск [15, 19] предполагает равномерное распределение рассолов по всей акватории, что может привести к более широкому и, соответственно, щадящему воздействию на окружающую среду и ее биологическое разнообразие. При этом в случае сброса рассола через отверстия трубопровода выпуска вертикально вниз [19] глубина проникновения струй рассола будет увеличиваться с увеличением плотности струй.

В настоящей статье рассматривается разработанное коллективом авторов техническое

решение по рассредоточенному равномерному сбросу рассола на уровне поверхности акватории и его рассеиванию в стоячей воде до безопасной концентрации по мере движения разбавленного рассола ко дну. В случае наличия течений рассеивание загрязнений будет более интенсивным.

В отличие от существующих технологий, предложенное решение применимо для утилизации рассолов не только от крупных опреснительных заводов, но также от малых технологических комплексов, привод которых действует за счет энергии морской волны [20, 21].

Рассредоточенный равномерный сброс рассола на поверхности акватории включает гибкий и волнообразный трубопровод с путевым отбором рассола и последующим разбавлением загрязнений до безопасной концентрации. С целью соблюдения единства терминологии с классическими положениями гидравлических основ расчета трубопроводов далее по тексту публикации под процессом путевого отбора понимается сброс рассола из трубопровода в акваторию через отверстия, распределенные по длине трубопровода.

Для обеспечения равенства расходов на трубопроводе в вершинах волн выполняют отверстия разных диаметров, увеличивающихся по длине трубопровода, для обеспечения равенства расходов, отбираемых по длине трубопровода рассола. На вершинах волн устанавливают

поплавки с положительной плавучестью, а на впадинах – грузы с отрицательной плавучестью, обеспечивающие касание впадин трубопровода с дном акватории. В каждой впадине устанавливают датчики контроля качества воды, которые дистанционно измеряют концентрацию загрязнений на дне акватории в режиме реального времени для предотвращения превышения допустимых значений. Схема сброса рассола в акваторию представлена на рис. 1.

Поплавки с положительной плавучестью (1) и донные грузы с отрицательной плавучестью поочередно размещают на гибком трубопроводе с путевым отбором жидкости (3). На донных грузах (2) устанавливают датчики дистанционного контроля концентрации загрязнений в акватории (4). В местах установки поплавков с положительной плавучестью (1) на трубопроводе (3) размещают точки равномерного сброса рассола в акваторию (5) в виде отверстий разных диаметров, увеличивающихся по длине трубопровода (3), для обеспечения равномерного отбора жидкости из всех отверстий на трубопроводе (3).

При изменяющемся во времени исходном подводимом расходе рассола, образующемся при опреснении морской воды, возможно применение буферной емкости для стабилизации расхода сбрасываемого рассола. Поддержание постоянства расхода рассола достигается устройством у буферной емкости гибкого подключения, регулируемого по высоте в режиме реального

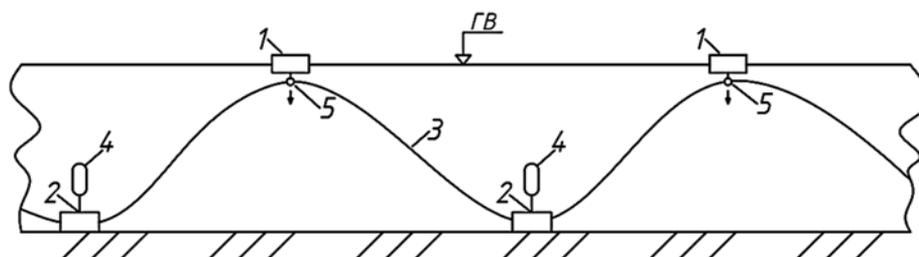


Рис. 1. Принципиальная схема сброса рассола в акваторию: 1 – поплавки с положительной плавучестью; 2 – донные грузы с отрицательной плавучестью; 3 – гибкий трубопровод с путевым отбором жидкости; 4 – датчики постоянного дистанционного контроля концентрации загрязнений в придонной части акватории; 5 – дискретные точки равномерного сброса рассола в акваторию

Fig. 1. Principal scheme of brine discharge into water area: 1 - floats with positive buoyancy; 2 - bottom weights with negative buoyancy; 3 - flexible pipeline with route water sampling; 4 - sensors of constant remote control of pollution concentration in the bottom part of water area; 5 - discrete points of uniform brine discharge into water area

времени, либо установкой отводящих сбросных трубопроводов на различной высоте (рис. 2).

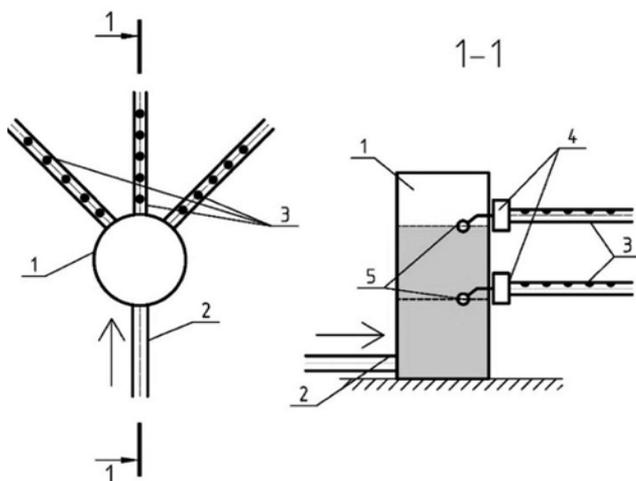


Рис. 2. Схема применения буферной емкости: 1 – буферная емкость; 2 – подводящий трубопровод рассола; 3 – трубопроводы с путевым отбором жидкости; 4 – регулятор давления после себя; 5 – поплавковый клапан

Fig. 2. Scheme of buffer tank application: 1 - buffer tank; 2 - brine supply pipeline; 3 - pipelines route water sampling; 4 - regulator for reducing and maintaining the set water pressure at the valve outlet; 5 - float valve

## 2. Материалы и методы

Для определения диаметра отверстия  $d_i$  необходимо решить систему уравнений (1), (2), (3), (4), полученную с использованием известных в механике жидкости зависимостей [22]:

$$H_n - \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot \frac{\Delta L}{D} \cdot \frac{Q_i^2 \cdot 4^2}{2g \cdot (\pi \cdot D^2)^2} = \frac{q^2}{\mu^2 \cdot \omega_i^2 \cdot 2g}, \quad (1)$$

где  $H_n$  – напор в начале трубопровода, м;

$\lambda_i$  – коэффициент гидравлического трения на  $i$ -м участке трубопровода, определяемый по формуле (2);

$\Delta L$  – длина участка между отверстиями в распределительном трубопроводе, м;

$D$  – диаметр трубопровода, м;

$Q_i$  – расход рассола на  $i$ -м участке трубопровода, определяется по формуле (3),  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$q$  – интенсивность равномерного отбора рассола,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$\mu = 0,62$  – коэффициент расхода через отверстие из справочных данных [16];

$\omega_i$  – площадь живого сечения  $i$ -го отверстия, определяется по формуле (4),  $\text{м}^2$ .

Коэффициент гидравлического трения на  $i$ -м участке трубопровода при турбулентном режиме определяется по формуле А. Д. Альтшуля:

$$\lambda_i = 0.11 \cdot \left[ \left( \frac{68 \cdot v}{D \cdot \frac{4Q_i}{\pi \cdot D^2}} \right) + \frac{ke}{D} \right]^{0.25}, \quad (2)$$

где  $ke$  – коэффициент шероховатости, м;

$v$  – кинематическая вязкость жидкости (рассола),  $\text{м}^2/\text{с}$ .

Расход рассола на  $i$ -м участке трубопровода:

$$Q_i = Q_n - (i-1) \cdot q, \quad (3)$$

где  $Q_n$  – расход рассола в начале участка.

Площадь живого сечения  $i$ -го отверстия:

$$\omega_i = \frac{\pi \cdot d_i^2}{4}, \quad (4)$$

где  $d_i$  – диаметр  $i$ -го отверстия, м.

Расход рассола в рассеивающейся затопленной струе на расстоянии  $x1$  от отверстия определяется по известной [22] формуле (5):

$$Q = 2.2 \cdot q \cdot \left[ \left( a \cdot \frac{x1}{r0} \right) + 0.29 \right], \quad (5)$$

где  $q$  – расход истечения жидкости через отверстие  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$x1$  – расстояние, на котором струя коснется дна акватории, м;

$r0$  – радиус отверстия, м;

$a = 0.08$  – коэффициент, характеризующий влияние турбулентности струй на его расширение.

Радиус струи на расстоянии  $x1$  от отверстия рассчитывается по формуле (6) [22]:

$$R = (3.4 \cdot x1 \cdot a) - \left( 0.29 \cdot \frac{r0}{a} \right). \quad (6)$$

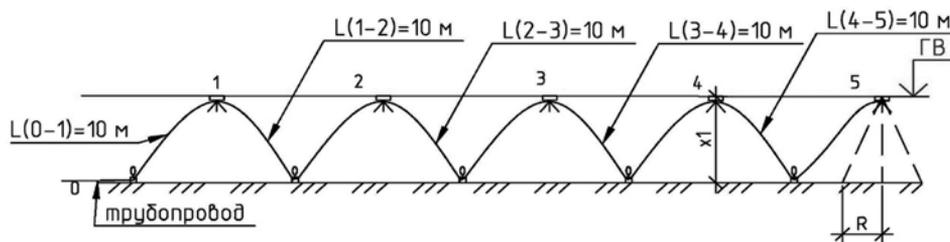


Рис. 3. Расчетная схема для гидравлического расчета сброса рассола в акваторию  
 Fig. 3. Calculation diagram for hydraulic calculation of brine discharge into the water area

Из формул (5) и (6) мы видим, что чем больше диаметр отверстия  $r0$ , тем выше будет расход рассола в рассеивающей затопленной струе  $Q$  и радиус струи на расстоянии  $x1$  от отверстия  $R$ .

Остаточная концентрация соли  $C_1$  на расстоянии  $x1$  от отверстия рассчитывается по формуле (7):

$$C_1 = \frac{C_0 \cdot q + (Q - q) \cdot C_\phi}{Q}, \quad (7)$$

где  $C_0$  – концентрация сбрасываемого рассола, г/л;

$C_\phi$  – фоновая концентрация соли в морской воде.

### 3. Результаты и обсуждение

В качестве исходных данных для расчета гипотетического примера трубопровода сброса рассола приняты следующие характеристики: материал трубопровода – полиэтилен;  $D = 100$  мм = 0.1 м – диаметр трубопровода,  $ke = 0.007 \cdot 10^{-3}$  м – коэффициент эквивалентной шероховатости для полиэтиленовой трубы;  $H_0 = 10$  м – напор в начале участка трубопровода;  $Q_0 = 0.028$  м<sup>3</sup>/с – принятый объемный расход рассола в начале трубопровода;  $L = 50$  м – длина трубопровода с путевым отбором;  $n = 5$  – количество отверстий в трубопроводе с путевым отбором рассола;  $\Delta L = 10$  м – длина между точками сброса;  $x1 = 20$  м – глубина акватории. Буферная емкость для стабилизации сбрасываемого расхода отсутствует.

Принятие именно таких исходных данных для расчета примера обусловлено соизмеримой производительностью и соответствующими условиями размещения в акватории малых технологических комплексов по производству

пресной воды, привод которых действует за счет энергии морской волны [20, 21].

Расчетная схема предоставлена на рис. 3.

В рассматриваемых схемах (рис. 1, 3) будут существовать следующие потери на преодоление местных сопротивлений: вход в трубу из буферной емкости (при ее наличии, рис. 1), плавные повороты трубопровода (ввиду его гибкости) и сопротивление отверстий. При решении поставленной задачи данные потери, за исключением сжатия струи, учитываемого снижением расхода через отверстие (формула (1), коэффициент расхода  $\mu$ ), не определялись.

В случае применения буферной емкости потери напора при входе в трубу (с острыми кромками) не будут превышать 5 % от величины потерь напора на преодоление сопротивлений по длине (для представленного примера). Потери напора в плавных поворотах зависят в числе прочего от радиуса и угла поворота [22]. При радиусах поворота, значительно превышающих диаметр трубопровода, и малых углах поворота местные потери напора будут несоизмеримо меньше в сравнении с потерями по длине. Вести их учет необходимо при выполнении поперечных расчетов критических состояний сбросного трубопровода.

Расход рассола через одно отверстие определяется по формуле (8):

$$q = \frac{Q_0}{n} = \frac{0.028}{5} = 5.56 \cdot 10^{-3} \text{ (м}^3 \text{ / с)} = 5.56 \text{ (л / с)}. \quad (8)$$

Для определения потерь напора  $\Delta H$ , м, между отверстиями в трубопроводе с путевым отбором жидкости из него необходимо выполнить гидравлический расчет на каждом участке трубопровода. Гидравлический расчет гибкого

трубопровода сведен в таблицу 1. Определение диаметров отверстий с использованием формул (1)–(4) в узловых точках гибкого трубопровода представлено в таблице 2.

Диаметры отверстий по результатам расчета (таблица 2) составили от 31 до 37 мм. Расход рассола в рассеивающейся струе на расстоянии  $x_1 = 20$  м от отверстия, определенный по формуле (5), через первое отверстие (узловая точка 1) составил  $Q_1 = 1.275$  м<sup>3</sup>/с, при этом радиус струи, определенный по формуле (6), составил  $R_1 = 5.384$  м. Для пятой точки (узловая точка 5) в сечении на расстоянии  $x_1 = 20$  м от отверстия расход рассола в рассеивающей струе составит  $Q_5 = 1.069$  м<sup>3</sup>/с при радиусе струи  $R_5 = 5.373$  м.

Необходимо определить концентрацию соли на расстоянии  $x_1 = 20$  м через 1 и 5 отверстие по формуле (7). Для определения концентрации

соли принята фоновая концентрация соли  $C_{\phi}$  для морских акваторий 30 г/л. Концентрация сбрасываемого рассола принята равной  $C_0 = 60$  г/л (получение из исходной морской воды 50 % пресной воды). Остаточная концентрация соли  $C_1$  на расстоянии  $x_1 = 20$  м от отверстия, рассчитанная по формуле (7) для узловых точек 1 и 5, составила 30.132 и 30.157 г/л соответственно.

Таким образом, при сбросе рассола со средним расходом 0.028 м<sup>3</sup>/с ( $\approx 2400.0$  м<sup>3</sup>/сут) с концентрацией 60 г/л при решении вышеуказанной задачи соленость в струе на глубине 20 м от точки сброса практически не изменяется.

#### 4. Заключение

Наиболее простым и недорогим способом утилизации рассола является его сброс в морскую акваторию. Однако повсеместное нераци-

Таблица 1/ Table 1

Гидравлический расчет гибкого трубопровода  
Hydraulic calculation of a flexible pipeline

Расчетный участок	Расход на $i$ -м участке $Q_i$ , м <sup>3</sup> /с	Диаметр трубопровода $D$ , м	Скорость $v$ , м/с	Длина расчетного участка $\Delta L$ , м	Коэффициент гидравлического трения $\lambda$	Потери напора на участке $\Delta H$ , м
0-1	0.028	0.1	3.54	10	0.014	2.804
1-2	0.022	0.1	2.83	10	0.015	1.872
2-3	0.017	0.1	2.12	10	0.015	1.115
3-4	0.011	0.1	1.42	10	0.017	0.540
4-5	0.0056	0.1	0.71	10	0.02	0.158
<b>Сумма</b>						<b>6.489</b>

Таблица 2/ Table 2

Расчетная таблица для определения диаметра отверстия  
Calculation table for determining the hole diameter

Узловая точка	Расход рассола через отверстие $q$ , м <sup>3</sup> /с	Начальный напор $H_0$ , м	Напор в узловой точке $H_i$ , м	Диаметр отверстия $d$ , м
1	0.0056	10	7.196	0.031
2	0.0056	10	5.324	0.033
3	0.0056	10	4.209	0.035
4	0.0056	10	3.669	0.037
5	0.0056	10	3.11	0.037

ональное применение этого способа может привести к значительным негативным воздействиям на морские экосистемы.

С целью снижения ущерба от высококонцентрированных рассолов предложено использовать трубопровод с равномерным сбросом, включающий гибкий и волнообразный трубопровод с путевым отбором рассола из него и последующим разбавлением загрязнений до безопасной концентрации.

В работе представлены результаты численного моделирования, которые показали, что безопасное растворение рассола в акватории является возможным. В теоретическом расчете обнаружено, что разница в концентрации соли рассола на глубине 20 м от точки сброса между фоновой концентрацией в море и концентрацией соли для 1 и 5 отверстия составляет 0.439 и 0.524 % соответственно. При этом было учтено влияние характеристик трубопровода и свойств жидкости. Важно отметить, что при расчетах учитывалось только

спокойное море, при наличии морских течений растворение рассолов до безопасных концентраций становится еще более интенсивным. Вышеизложенный способ сброса рассола в акваторию позволяет контролировать концентрацию вредных загрязнений в придонной зоне водоемов даже при слабых или отсутствующих течениях в режиме реального времени. Это позволяет исключить превышение допустимых значений концентрации загрязнений и обеспечить безопасный сброс рассола в водные объекты.

Распредоточенный сброс рассола в акваторию может быть применим в различных отраслях промышленности, где генерируются опасные жидкие отходы, а также при опреснении морской воды. Этот способ сброса рассола в акваторию является более безопасным и эффективным по сравнению с рассредоточенным сбросом рассола не с поверхности акватории, при котором трудно достичь безопасной концентрации загрязнений в придонной зоне акватории.

#### Библиографический список

1. Panagopoulos, A. Minimal liquid discharge (MLD) and zero liquid discharge (ZLD) strategies for wastewater management and resource recovery – Analysis, challenges and prospects / A. Panagopoulos, K.-J. Haralambous. – DOI 10.1016/j.jece.2020.104418. – Текст : электронный // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2020. – Vol. 8, No. 5. – P. 104418. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213343720307673> (date of the application: 22.10.2023).
2. ЮНЕП: процесс опреснения морской и океанской воды должен быть безопасным для окружающей среды / Организация объединенных наций (ООН) : сайт. – URL: <https://news.un.org/ru/story/2021/01/1394322> (дата обращения: 30.10.2023). – Текст : электронный.
3. Утилизация рассолов при опреснении минерализованных вод с получением товарных солей и удобрений / Ю. Я. Гранкин, В. А. Тумлерт, Е. В. Тумлерт, Н. В. Гриценко. – Текст : непосредственный // Наука и мир. – 2015. – № 8-1(24). – С. 32–36.
4. Получение воды питьевого качества для населенных пунктов Черноморского побережья / В. В. Бирюк, М. Ю. Анисимов, П. А. Горшкалев [и др.]. – DOI 10.17586/1606-4313-2019-18-4-26-31. – Текст : непосредственный // Вестник Международной академии холода. – 2019. – № 4. – С. 26–31.
5. Discharge of polyphosphonate-based antiscalants via desalination brine: impact on seabed nutrient flux and microbial activity / G. Sisma-Ventura, N. Belkin, M. Rubin-Blum [et al.]. – DOI 10.1021/acs.est.2c04652. – Текст : электронный // Environmental Science & Technology. – 2022. – Vol. 56, No. 18. – P. 13142-13151. URL: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.est.2c04652> (date of the application: 25.11.2023).
6. Characteristics of desalination brine and its impacts on marine chemistry and health, with emphasis on the Persian/Arabian Gulf: a review / M. Omerspahic, H. Al-Jabri, S. A. Siddiqui, I. Saadaoui. – DOI 10.3389/fmars.2022.845113. – Текст : электронный // Frontiers in Marine Science. – 2022. – Vol. 9. – P. 845113. – URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmars.2022.845113/full> (date of the application: 25.11.2023).
7. Review: brine solution: current status, future management and technology development / S. N. Backer, I. Bouaziz, N. Kallayi [et al.]. – DOI 10.3390/su14116752. – Текст : электронный // Sustainability. – 2022. – No. 14 (11). – P. 6752. – URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/11/6752> (date of the application: 25.11.2023).

8. Biological and physical effects of brine discharge from the Carlsbad desalination plant and implications for future desalination plant constructions / K. L. Petersen, N. Heck, B. G. Reguero [et al.]. – DOI 10.3390/w11020208. – Текст : электронный // *Water*. – 2019. – No. 11 (2). – С. 208. – URL: <https://www.mdpi.com/2073-4441/11/2/208> (date of the application: 22.11.2023).
9. Impact of brine and antiscalants on reef-building corals in the Gulf of Aqaba – Potential effects from desalination plants / K. L. Petersen, A. Paytan, E. Rahav [et al.]. – DOI 10.1016/j.watres.2018.07.009. – Текст : электронный // *Water Research*. – 2018. – Vol. 144. – P. 183–191. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135418305414> (date of the application: 27.11.2023).
10. The effect of coagulants and antiscalants discharged with seawater desalination brines on coastal microbial communities: A laboratory and in situ study from the southeastern Mediterranean / N. Belkin, E. Rahav, H. Elifantz [et al.]. – DOI 10.1016/j.watres.2016.12.013. – Текст : электронный // *Water Research*. – 2017. – Vol. 110. – P. 321–331. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135416309472> (date of the application: 27.11.2023).
11. Обзор методов переработки рассолов, образующихся в результате работы дистилляционных установок / Г. А. Сигора, Л. А. Ничкова, Т. Ю. Хоменко [и др.]. – Текст : непосредственный // *Успехи современной науки*. – 2017. – Т. 1, № 12. – С. 140–146.
12. Danoun, R. Desalination Plants: Potential impacts of brine discharge on marine life / R. Danoun. – URL: <https://www.ccc.tas.gov.au/wp-content/uploads/2018/11/Apx-22-Desalination-Plants-Uni-Sydney-Brine-Discharge-Marine-Env-Impact.pdf> (date of the application: 22.10.2023). – Текст : электронный.
13. Water desalination in Egypt; literature review and assessment / Y. Elsaie, S. Ismail, H. Soussa [et al.]. – DOI 10.1016/j.asej.2022.101998. – Текст : электронный // *Ain Shams Engineering Journal*. – 2023. – Vol. 14, No. 7. – P. 101998. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090447922003094> (date of the application: 25.11.2023).
14. Современное состояние водных ресурсов и функционирование водохозяйственного комплекса бассейна Оби и Иртыша / Ю. И. Винокуров, А. В. Пузанов, Д. М. Безматерных [и др.]. – Новосибирск : Издательство Сибирского отделения РАН, 2012. – 236 с. – ISBN 978-5-7692-1293-2. – Текст : непосредственный.
15. Снижение зоны влияния рассеивающего выпуска / С. В. Федоров, А. М. Телятникова, М. И. Алексеев, М. А. Гильмутдинова. – DOI 10.23968/1999-5571-2021-18-6-128-134. – Текст : непосредственный // *Вестник гражданских инженеров*. – 2021. – № 6(89). – С. 128–134.
16. Особенности организации рассеивающих водовыпусков для отведения избыточных рассолов в водные объекты / А. В. Богомоллов, А. П. Лепихин, А. А. Тиунов [и др.]. – Текст : непосредственный // *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. – 2016. – № 2. – С. 72–86.
17. Papakonstantis, I. G. On the computational modeling of inclined brine discharges / I. G. Papakonstantis, P. N. Papanicolaou. – DOI 10.3390/fluids7020086. – Текст : электронный // *Fluids*. – 2022. – Vol. 7. – P. 86. – URL: <https://www.mdpi.com/2311-5521/7/2/86> (date of the application: 27.11.2023).
18. Hosseini S. A. R. S. Large eddy simulation of multiple inclined brine discharges / S. A. R. S. Hosseini, M. Taherian, M. Abdolmajid. – DOI 10.3850/IAHR-39WC252171192022809. – Текст : электронный // *Proceedings of the 39<sup>th</sup> IAHR World Congress, 19-24 June 2022. Granada, Spain, 2022*. – URL: <https://iahr.oss-accelerate.aliyuncs.com/upload/file/20220520/1653034138930298.pdf> (date of the application: 30.11.2023).
19. Unconfined dense plunging jets used for brine disposal from desalination plants / A. C. Chow, I. Shrivastava, E. E. Adams [et al.]. – DOI 10.3390/pr8060696. – Текст : электронный // *Processes*. – 2020. – No. 8. – P. 696. – URL: <https://www.mdpi.com/2227-9717/8/6/696> (date of the application: 25.11.2023).
20. Патент 2780743 Российская Федерация, МПК E03B 3/28. Способ получения пресной воды : № 2021120715 : заявл. 12.07.2021 : опубл. 30.09.2022 / Миронов В. В., Чекардовский М. Н., Иванюшин Ю. А., Шалагин И. Ю., Максимов Л. И., Калиновский П. А. : патентообладатель ФГБОУ ВО «ТИУ». – Текст : непосредственный.
21. Патент 2808201 Российская Федерация, МПК C02F 1/44 F03B 13/14. Способ очистки воды от соли и загрязнений : № 2023113266, заявл. 22.05.2023 ; опубл. 24.11.2023 / Миронов В. В., Иванюшин Ю. А., Миронов Д. В., Суглобов Д. А. : патентообладатель ООО «ЭЛЕКТРОРАМ». – Текст : непосредственный.
22. Альтшуль, А. Д. Гидравлика и аэродинамика (Основы механики жидкости) : учебное пособие для вузов / А. Д. Альтшуль, П. Г. Киселев. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Москва : Стройиздат, 1975. – 323 с. – Текст : непосредственный.

## References

1. Panagopoulos, A. & Haralambous, K.-J. (2020). Minimal liquid discharge (MLD) and zero liquid discharge (ZLD) strategies for wastewater management and resource recovery – Analysis, challenges and prospects. *Journal of environmental chemical engineering*, 8(5), pp. 104418. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213343720307673> (accessed 22.10.2023). (In English). DOI 10.1016/j.jece.2020.104418.
2. YuNEP: protsess opresneniya morskoy i okeanskoy vody dolzhen byt' bezopasnym dlya okruzhayushchey sredy. Available at: <https://news.un.org/ru/story/2021/01/1394322> (accessed 30.10.2023). (In Russian).
3. Grankin, Yu. Ya., Tumlert, V. A., Tumlert, E. V., & Gritsenko, N. V. (2015). Brine utilization at desalination of salt-water getting industrial salt and fertilizers. *Science and world*, 8-1(24), pp. 32-36. (In Russian).
4. Biryuk, V. V., Anisimov, M. Yu., Gorshkalev, P. A., Teplykh, S. Yu., & Shershakova, A. A. (2019). Obtaining of drinkable water for neighbourhoods of Black Sea region. *Journal of international academy of refrigeration*, (4), pp. 26-31. (In Russian). DOI 10.17586/1606-4313-2019-18-4-26-31.
5. Sisma-Ventura, G., Belkin, N., Rubin-Blum, M., Jacobson, Y., Hauzer, H., Bar-Zeev E., & Rahav, E. (2022) Discharge of polyphosphonate-based antiscalants via desalination brine: impact on seabed nutrient flux and microbial activity. *Environmental Science & Technology*, 56 (18), pp. 13142–13151. Available at: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.est.2c04652> (accessed 25.11.2023). (In English). DOI: 10.1021/acs.est.2c04652.
6. Omerspahic, M., Al-Jabri, H., Siddiqui, S. A., & Saadaoui, I. (2022) Characteristics of desalination brine and its impacts on marine chemistry and health, with emphasis on the Persian/Arabian Gulf: a review. *Frontiers in Marine Science*, 9, p. 845113. Available at: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmars.2022.845113/full> (accessed 25.11.2023). (In English). DOI 10.3389/fmars.2022.845113.
7. Backer, S. N., Bouaziz, I., Kallayi, N., Thomas, R. T., Preethikumar, G., Takriff, M. S., Laoui, T., & Atieh, M. A. (2022). Review: brine solution: current status, future management and technology development. *Sustainability*, (14(11)), pp. 6752. Available at: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/11/6752> (accessed 25.11.2023). (In English). DOI 10.3390/su14116752.
8. Petersen, K. L., Heck, N., Requero, B. G., Potts, D., Hovagimian, A., & Paytan, A. (2019). Biological and physical effects of brine discharge from the Carlsbad desalination plant and implications for future desalination plant constructions. *Water*, (11(2)), pp. 208. Available at: <https://www.mdpi.com/2073-4441/11/2/208> (accessed 22.11.2023). (In English). DOI 10.3390/w11020208.
9. Petersen, K. L., Paytan, A., Rahav, E., Levy, O., Silverman, J., Barzel, O., Potts, D., & Bar-Zeev, E. (2018). Impact of brine and antiscalants on reef-building corals in the Gulf of Aqaba – Potential effects from desalination plants. *Water Research*, 144, pp. 183-191. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135418305414> (accessed 27.11.2023). (In English). DOI 10.1016/j.watres.2018.07.009.
10. Belkin, N., Rahav, E., Elifantz, H., Kress, N., & Berman-Frank, I. (2017). The effect of coagulants and antiscalants discharged with seawater desalination brines on coastal microbial communities: A laboratory and in situ study from the southeastern Mediterranean. *Water Research*, 110, pp. 321-331. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135416309472> (accessed 27.11.2023). (In English). DOI 10.1016/j.watres.2016.12.013.
11. Sigora, G. A., Nichkova, L. A., Khomenko, T. Yu., Biryuk, V. V., Shimanova, A. B., & Uralapkin, V. V. (2017). Review of methods of processing of rassols generated from the work of distillation plants. *Uspekhi sovremennoy nauki*, 1(12), pp. 140-146. (In Russian).
12. Danoun, R. (2007). Desalination Plants: potential impacts of brine discharge on marine life. Available at: <https://www.ccc.tas.gov.au/wp-content/uploads/2018/11/Apx-22-Desalination-Plants-Uni-Sydney-Brine-Discharge-Marine-Env-Impact.pdf> (accessed 22.10.2023). (In English).
13. Elsaie, Y., Ismail, S., Soussa, H., Gado, M., & Balah, A. (2023). Water desalination in Egypt; literature review and assessment. *Ain Shams Engineering Journal*, 14(7), pp. 101998. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090447922003094> (accessed 25.11.2023). (In English). DOI 10.1016/j.asej.2022.101998.
14. Vinokurov, Yu. I., Puzanov, A. V., Bezmaternykh, A. M., Atavin, A. A., Zinoviev, A. T., Kirillov, V. V., ... Yanigina, L. V. (2012). *Sovremennoe sostoyanie vodnykh resursov i funkcionirovanie vodokhozyaystvennogo kompleksa basseyna Obi i Irtysha* : monograph. Novosibirsk, Publishing house Siberian Branch Russian Academy of Sciences Publ., 236 p. (In Russian).
15. Fedorov, S. V., Telyatnikova, A. M., Alekseev, M. I., & Gilmudinova, M. A. (2021). Reducing the influence zone of the dispersion discharge. *Bulletin of Civil Engineers*, (6(89)), pp. 128-134. (In Russian). DOI 10.23968/1999-5571-2021-18-6-128-134.

16. Bogomolov, A. V., Lepikhin, A. P., Tiunov, A. A., Lyubimova, T. P., & Parshakova, Y. N. (2016). Osobennosti organizatsii rasseivayushchikh vodovypuskov dlya otvedeniya izbytochnykh rassolov v vodnye ob"ekty. *Vodnoe khozyaystvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie*, (2), pp. 72-86. (In Russian).
17. Papakonstantis, I. G., & Papanicolaou, P. N. (2022). On the computational modeling of inclined brine discharges. *Fluids*, 7, p. 86. Available at: <https://www.mdpi.com/2311-5521/7/2/86> (accessed 27.11.2023). (In English). DOI 10.3390/fluids7020086.
18. Hosseini, S. A. R. S., Taherian, M., & Mohammadian, A. (2022). Large eddy simulation of multiple inclined brine discharges. *Proceedings of the 39<sup>th</sup> IAHR World Congress, 19-24 June 2022, Granada, Spain*. Available at: <https://iahr.oss-accelerate.aliyuncs.com/upload/file/20220520/1653034138930298.pdf> (accessed 30.11.2023). (In English). DOI 10.3850/IAHR-39WC252171192022809.
19. Chow, A. C., Shrivastava, I., Adams, E. E., Al-Rabaie, F., & Al-Anzi, B. (2020). Unconfined dense plunging jets used for brine disposal from desalination plants. *Processes*, (8), p. 696. Available at: <https://www.mdpi.com/2227-9717/8/6/696> (accessed 25.11.2023). (In English). DOI 10.3390/pr8060696.
20. Mironov, V. V., Chekardovskiy, M. N., Ivanyushin, Yu. A., Shalagin, I. Yu., Maksimov, L. I., & Kalinovskiy, P. A. (2022). Sposob poluchniya presnoy vody [Method for obtaining fresh water]. Patent RU 2780743. МПК E03B 3/28. Applied: 12.07.2021. Published: 30.09.2022 Patentee: Industrial University of Tyumen. (In Russian).
21. Mironov, V. V., Ivanyushin, Yu. A., Mironov, D. V., & Suglobov, D. A. (2023) Sposob oчитки vody ot soli i zagryazneniy [Method for purifying water from salt and contaminants]. Patent RU 2808201, МПК C02F 1/44 F03B 13/14. Applied: 22.05.2023. Published: 24.11.2023. Patentee: LLC "ELECTRORAM". (In Russian).
22. Al'tshul', A. D., & Kiselev, P. G. (1975). *Gidravlika i aerodinamika (Osnovy mekhaniki zhidkosti)*. 2nd edition, revised. Moscow, Stroyizdat Publ., 323 p. (In Russian).

#### Сведения об авторах

Миронов Виктор Владимирович, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры инженерных систем и сооружений, Тюменский индустриальный университет, e-mail: [vvmironov@list.ru](mailto:vvmironov@list.ru). ORCID 0000-0001-8939-850X

Иванюшин Юрий Андреевич, канд. техн. наук, доцент кафедры инженерных систем и сооружений, Тюменский индустриальный университет, e-mail: [ivanjushinja@tyuiu.ru](mailto:ivanjushinja@tyuiu.ru). ORCID 0000-0002-4470-6967

Суглобов Даниил Алексеевич, аспирант, Тюменский индустриальный университет, e-mail: [suglobovda@gmail.com](mailto:suglobovda@gmail.com)

Миронов Дмитрий Викторович, канд. техн. наук, доцент, ведущий инженер ООО «ЭЛЕКТРОРАМ», e-mail: [dvmironov@yandex.ru](mailto:dvmironov@yandex.ru)

Кадысева Анастасия Александровна, д-р биол. наук, доцент, профессор кафедры сельскохозяйственного водоснабжения, водоотведения, насосов и насосных станций, Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К. А. Тимирязева, e-mail: [kadyseva@mail.ru](mailto:kadyseva@mail.ru). ORCID 0000-0001-8703-5684

Ерофеев Евгений Александрович, старший преподаватель кафедры инженерных систем и сооружений, Тюменский индустриальный университет, e-mail: [erofeevea@tyuiu.ru](mailto:erofeevea@tyuiu.ru). ORCID 0000-0002-8273-6956

#### Information about the authors

Viktor V. Mironov, D. Sc. in Engineering, Professor, Professor at the Department of Engineering Systems and Structures, Industrial University of Tyumen, e-mail: [vvmironov@list.ru](mailto:vvmironov@list.ru). ORCID 0000-0001-8939-850X

Yuriy A. Ivanyushin, Cand. Sc. in Engineering, Associate Professor at the Department of Engineering Systems and Structures, Industrial University of Tyumen, e-mail: [ivanjushinja@tyuiu.ru](mailto:ivanjushinja@tyuiu.ru). ORCID 0000-0002-4470-6967

Daniil A. Suglobov, Postgraduate, Industrial University of Tyumen, e-mail: [suglobovda@gmail.com](mailto:suglobovda@gmail.com)

Dmitry V. Mironov, Cand. Sc. in Engineering, Associate Professor, Lead Engineer in LLC "ELECTRORAM", e-mail: [dvmironov@yandex.ru](mailto:dvmironov@yandex.ru)

Anastasiya A. Kadyseva, D. Sc. in Biology, Associate Professor, Professor at the Department of Agricultural Water Supply, Sanitation, Pumps and Pumping Stations, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, e-mail: [kadyseva@mail.ru](mailto:kadyseva@mail.ru). ORCID 0000-0001-8703-5684

Evgeniy A. Erofeev, Senior Lecturer at the Department of Engineering Systems and Structures, Industrial University of Tyumen, e-mail: [erofeevea@tyuiu.ru](mailto:erofeevea@tyuiu.ru). ORCID 0000-0002-8273-6956