

УДК 628.35-574.24.044

**С.Д. Угрюмова, А.И. Федорова**

Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет,  
690087, г. Владивосток, ул. Луговая, 52б

## **ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ФИЛЬТРОВАНИЯ МОРСКОЙ ВОДЫ ЧЕРЕЗ ЗЕРНИСТЫЕ ПЕРЕГОРОДКИ**

*Рассмотрены основные показатели фильтрующих загрузок насыпных фильтров, проведены лабораторные испытания, разработана методика оценки эффективности процесса фильтрации.*

**Ключевые слова:** эффективность, процесс фильтрации, морская вода, насыпные фильтры, методика.

**S.D. Ugryumova, A.I. Fedorova**

## **EVALUATION OF SEA WATER FILTRATION THROUGH GRANULAR PARTITIONS**

*The main indicators of bulk filter media filters, carried Dena laboratory tests, the methods of evaluating the effectiveness of the filtering process.*

**Keywords:** efficiency, the filtering process, sea water, bulk filters, technique.

Основными показателями фильтрующих загрузок насыпных фильтров являются пропускная способность, грязеемкость и время работы фильтра до регенерации.

Очистка морской воды фильтрованием заключается в отделении взвешенных в жидкости частиц (водорослей, песка, рачков, масел, а в некоторых случаях – микрокапель воды и пузырьков воздуха и т.д.) при прохождении двухфазной системы – жидкости с диспергированными или эмульгированными в ней загрязнениями – через пористый фильтрующий материал.

Течение жидкости через фильтрующий материал при ламинарном режиме описывается уравнением Дарси [1, 2]:

$$P = K_n \cdot F \frac{\Delta P}{\mu_m \cdot H}, \quad (1)$$

где  $P$  – пропускная способность, м<sup>3</sup>/с;  $K_n$  – коэффициент проницаемости материала, м<sup>2</sup>;  $F$  – площадь фильтрующего материала, м<sup>2</sup>;  $\Delta P$  – перепад давления, Па;  $\mu_m$  – динамическая вязкость материала, Па·с;  $H$  – толщина фильтрующего материала, м.

При ламинарном течении жидкости через фильтрующую перегородку, когда перепад давления на материале и скорость фильтрования связаны линейной зависимостью, достигается наиболее экономичный режим работы фильтра. С увеличением скорости фильтрования наблюдаются отклонения от ламинарного режима, что обусловлено конфигурацией пор, представляющих при движении воды местные гидравлические сопротивления. При относительно малых скоростях жидкости гидравлические потери (перепад давления) определяются в основном потерями на трение в порах, связанными со скоростью линейной зависимостью. С увеличением скорости влияние местных сопротивлений на суммарные гидравлические потери в фильтрующем материале будут возрастать, т.е. процесс уже не будет описываться уравнением (1).

Мерой применимости закона Дарси служит критерий Рейнольдса, характеризующий гидродинамический режим потока и выражающий отношение инерционных сил к силам трения в потоке:

$$\text{Re} = \frac{W_{\phi} \cdot L \cdot \rho_m}{\mu}, \quad (2)$$

где  $W_{\phi}$  – средняя скорость фильтрования, м/с;  $L$  – характерный геометрический параметр, м;  $\rho_m$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>.

Сложность явлений, наблюдаемых при движении потока через фильтрующий материал, и зависимость его от большого числа разнообразных факторов не дают возможности решить уравнения, описывающие этот процесс, в аналитическом виде. Однако анализ процесса фильтрования показывает, что его эффективность зависит от гидродинамического режима движущегося потока и сил давления и инерции в нем. Поэтому взаимосвязь между факторами, влияющими на рассматриваемый процесс, целесообразно выразить в виде критериального обобщения опытных данных.

Процесс течения через фильтрующий материал помимо критерия Рейнольдса будет зависеть и от критерия Эйлера [2], являющегося мерой отношения давления и сил инерции в потоке и характеризующего зависимость скорости фильтрования от полного перепада давления на фильтрующем материале:

$$\text{Eu}_{\phi} = \frac{\Delta P}{W_{\phi}^2 \cdot \rho_m}. \quad (3)$$

Чтобы оценить влияние толщины материала на процесс фильтрования, целесообразно преобразовать критерий Эйлера, следует отнести перепад давления на фильтрующем материале к его толщине  $H$  и ввести в выражение (3) градиент давления  $\Delta P / H$ . Это можно получить, если умножить выражение (3) на параметрический критерий  $L / H$ :

$$\text{Eu}_{\phi}^* = \frac{\Delta P}{H} \cdot \frac{L}{W_{\phi}^2 \cdot \rho_m}, \quad (4)$$

где  $\text{Eu}_{\phi}^*$  – модифицированный критерий Эйлера.

В выражениях (2) и (4) важно правильно выбрать характерный геометрический параметр  $L$ , определяющий свойства фильтрующего материала. В ряде работ за указанный параметр принимают средний или номинальный размер пор фильтрующего материала, выражаемый приведенным диаметром пор. Выбор такого показателя не вызывает принципиальных возражений, однако в этом случае вместо средней скорости фильтрования  $W_{\phi}$  в выражениях (2) и (4) должна входить истинная скорость движения потока в порах, определить которую достаточно трудно, и это не позволяет принимать размер пор фильтрующего материала в качестве геометрического параметра.

Наиболее приемлемым параметром для использования в критериальных уравнениях является коэффициент проницаемости  $K_n$  фильтрующего материала, зависящий только от свойств самого материала. Этот коэффициент без затруднений определяют из уравнения (1), так как все входящие в уравнение величины можно получить экспериментальным путем. Ввиду того, что коэффициент проницаемости имеет размерность площади, в уравнения для безмерных критериев его вводят в степени 0,5:

$$\text{Re} = \frac{W_{\phi} \cdot \rho_m \cdot K_n^{0,5}}{\mu}. \quad (5)$$

Модифицированный критерий Эйлера примет вид

$$Eu_{\phi}^* = \frac{\Delta P}{H} \cdot \frac{K_n^{0,5}}{W_{\phi}^2 \cdot \rho_m} \quad (6)$$

Величину скорости фильтрования, или фиктивную скорость движения потока через фильтрующий материал, входящую в выражения (5) и (6), можно определить из соотношения

$$W_{\phi} = \frac{\Pi}{F} \quad (7)$$

Найденная экспериментально зависимость

$$Eu_{\phi}^* = f(Re) \quad (8)$$

характеризует течение потока через фильтрующий материал.

В условиях ламинарного режима зависимость (8) носит линейный характер. Так как в этих условиях влияние инерционных сил на поток исчезающее мало, т.е. все возмущения, вызываемые местными сопротивлениями, локализуются и затухают в результате действия сил трения. Критерий Рейнольдса будет очень мал, а критерий Эйлера станет очень большим:  $Re \rightarrow 0$ ;  $Eu \rightarrow \infty$ .

Для оценки движения морской воды через фильтрующий материал при ламинарном режиме следует использовать критерий Лагранжа ( $La$ ), полученный путем перемножения критериев  $Re$  и  $Eu$  и сохраняющийся в условиях ламинарного режима постоянным:

$$La = \frac{\Delta P \cdot K_n}{W_{\phi} \cdot \mu \cdot H} = const. \quad (9)$$

Постоянство критерия Лагранжа свидетельствует об автомодельности процессов движения жидкости через фильтрующий материал при ламинарном режиме, т.е. об автоматическом подобии (не зависящий от фильтрующего материала, вязкости и т.д.) рассматриваемых процессов между собой и о наличии вследствие этого линейной зависимости между скоростью фильтрования и перепадом давления на фильтрующем материале. Границы применения линейного закона фильтрования, наблюдаемого при ламинарном режиме движения, определяются помимо скорости фильтрования также индивидуальными свойствами фильтрующего материала и вязкостью жидкости.

При фильтровании загрязненных сред на режим течения наряду со скоростью фильтрования влияет также изменение проницаемости фильтрующего материала за счет оседания загрязнений на поверхности и в порах. Вследствие того, что гранулометрический состав загрязнений меняется в широком диапазоне, частицы загрязнений в процессе фильтрования могут по-разному взаимодействовать с фильтрующим материалом: полностью или частично закупоривать его поры, образовывать над входом в поры рыхлые структуры арочной формы, так называемые сводики, или отлагаться на нем в виде сплошного осадка.

Независимо от схемы оседания загрязнений, процесс фильтрования описывается одним из следующих дифференциальных уравнений. При постоянном перепаде давления на фильтрующем материале  $\Delta P = const$ :

$$\frac{dR}{dV} = k_m \cdot R^b \tag{10}$$

При постоянной скорости фильтрования ( $W_\phi = const$ ):

$$\frac{dR}{d\tau} = k_m \cdot R^b, \tag{11}$$

где  $R$  – общее гидравлическое сопротивление фильтрующего материала и загрязнений,  $m^{-1}$ ;  $V$  – объем морской воды через единицу поверхности фильтрующего материала,  $m^3/m^2$ ;  $k_m$  – коэффициент, характеризующий фильтруемость жидкости и имеющий неодинаковый физический смысл, а следовательно, и разную размерность в зависимости от схемы оседания загрязнений:  $b$  – показатель, зависящий от схемы оседания загрязнений ( $0 \leq b \leq 2$ ).

Выбор уравнений (10) или (11) для описывания фильтрования зависит от условий, при которых этот процесс происходит на практике. В табл. 1 рассмотрены все возможные случаи подачи воды для фильтрования и соответствующие им изменения основных параметров – скорости фильтрования и перепада давления на фильтрующем материале.

Таблица 1

**Режимы фильтрования морской воды**

Table 1

**Modes of filtering seawater**

Подача морской воды	Скорость фильтрования	Перепад давления
Самотеком из резервуара с постоянным уровнем	Уменьшается	Постоянный
Самотеком из резервуара с уменьшающимся уровнем	Уменьшается	Уменьшается
Насосом объемного типа	Постоянная	Увеличивается

В подавляющем большинстве технологических схем, применяемых при фильтровании воды в разных условиях, жидкость подают на фильтр насосами объемного типа, т.е. процесс протекает соответственно или при постоянной скорости фильтрования или при постоянном перепаде давления, может происходить и при подаче жидкости объемными насосами, в случае когда давление в системе достигнет значения, на которое отрегулирован редукционный клапан, в результате чего и произойдет его открытие.

Максимальный рост гидравлического сопротивления на фильтрующем материале в единицу времени наблюдается при полном закупоривании пор фильтрующего материала загрязнениями (в этом случае  $b = 2$ ), несколько меньше – сопротивление возрастает при постепенном закупоривании пор фильтрующего материала ( $b = 1,5$ ), еще медленнее сопротивление возрастает при фильтровании с образованием сводиков ( $b = 1$ ) и, наконец, наименее интенсивное увеличение сопротивления наблюдается при отложении осадка на фильтрующем материале ( $b = 0$ ).

По физико-механическим свойствам фильтрующие материалы обычно делят на сжимаемые и несжимаемые. Сжимаемость материала (способность изменять объем при изменении перепада давления) существенно влияет на свойства, в первую очередь на гидравлическую характеристику [3].

Считается, что материалы поверхностного действия имеют толщину всего в несколько раз больше, чем размер задерживаемых ими частиц, и задерживают эти частицы на своей

поверхности, а материалы объемного действия имеют толщину на несколько порядков больше, чем размер задерживаемых частиц, оседающих главным образом в глубине материала. Однако большинство применяемых в настоящее время фильтрующих материалов нельзя однозначно отнести к какому-либо одному из этих видов.

Одновременно с тонкостью фильтрования, как правило, определяют коэффициент полноты фильтрования

$$\varphi = 1 - \frac{G}{G_0}, \quad (12)$$

где  $\varphi$  – коэффициент полноты фильтрования;  $G_0$  и  $G$  – количество загрязнителя, содержащегося в жидкости соответственно до и после фильтрования, г.

Гидравлическая характеристика фильтрующего материала выражается зависимостью

$$q = f(\Delta P), \quad (13)$$

где  $q$  – удельная пропускная способность материала,  $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ;  $\Delta P = (P_1 - P_2)$  – перепад давления на материале, Па;  $P_1$  и  $P_2$  – давление соответственно перед испытуемым образцом и после него, Па.

Для нахождения зависимости (13) при разных перепадах давления следует определять удельную пропускную способность фильтрующего материала, т.е. количество жидкости, проходящей через единицу поверхности в единицу времени. Обычно перепад давления на материале при снятии его гидравлической характеристики изменяют с интервалом 10 или 20 кПа.

Ресурс работы фильтрующего материала выражается тем количеством жидкости определенной загрязненности, после фильтрования которой перепад давления на материале становится максимально допустимым. Ресурс работы зависит от загрязненности сливаемой жидкости, поэтому данный показатель следует определять при фильтровании с одинаковым содержанием загрязнителя. Поскольку это требование трудно выполнить, в некоторых случаях вместо ресурса работы определяют другие величины – грязеемкость фильтрующего материала и фильтруемость жидкости через него.

Грязеемкость фильтрующего материала выражают массой загрязнений, задержанных на единице поверхности материала за то время, когда перепад давления достигает максимально доступного. Грязеемкость определяют по формуле

$$\Delta G = G_\phi - G_{\phi_0}, \quad (14)$$

где  $\Delta G$  – масса загрязнителя, задержанного материалом на единице поверхности за время испытания,  $\text{кг}/\text{м}^2$ ;  $G_\phi$  и  $G_{\phi_0}$  – масса единицы поверхности материала соответственно до и после испытания,  $\text{кг}/\text{м}^2$ .

Этот показатель находят при взвешивании испытуемого образца материала, предварительно высушенного до постоянной массы. Грязеемкость фильтрующего материал зависит от характера и свойств загрязнений (в первую очередь от их гранулометрического состава и плотности), а также от режима фильтрования и схемы, по которой происходит оседание загрязнений на материале, поэтому показатель  $\Delta G$ , полученный при исследовании материала в лабораторных условиях с применением искусственного загрязнителя, нельзя перенести на натурные условия и использовать в конструкторских расчетах, он служит лишь для сравнительной оценки фильтрующих материалов [4].

Важным показателем эффективности процесса фильтрования является скорость протекания жидкости через фильтрующий материал. Наиболее распространенный метод основан на предположении, что движение жидкости в пористом материале осуществляется в соответствии с формулой Гагина-Пуазейля:

$$P = F \frac{\pi \cdot d_n^4 \Delta P \cdot N}{128 \mu \cdot H}, \quad (15)$$

где  $P$  – пропускная способность, м<sup>3</sup>/с;  $F$  – поверхность фильтрующего материала, м;  $d$  – диаметр, м;  $N$  – число пор на единице площади, м<sup>-2</sup>.

Следующим показателем эффективности загрузки является ресурс работы, т.е. работы фильтра до регенерации.

Фильтрующие материалы должны обеспечивать необходимую тонкость и полноту фильтрования при достаточно длительном ресурсе работы, причем эти показатели не должны заметно снижаться в течение всего периода эксплуатации, стойкими в среде очищаемой жидкости во всем диапазоне рабочих температур и независимо от продолжительности контактирования, не ухудшать физико-химические показатели очищаемой жидкости и не загрязнять ее частицами, вымываемыми из материала в процессе ее эксплуатации; быть достаточно прочными, в том числе и при действии вибрационных, ударных и тепловых нагрузок, возможных в процессе эксплуатации фильтра.

Желательно, чтобы материалы обладали хорошими конструкционными качествами, т.е. легко подвергались обработке, герметизации, и другими технологическими операциями. Гидравлическое сопротивление материала будет возможно меньшим при высокой удельной пропускной способности.

Экономические показатели материала могут быть значительно повышены, если он обладает способностью к многократной регенерации с полным восстановлением первоначальных свойств. Если регенерация материала экономически не оправдана и он предназначен для одноразового использования, материал после эксплуатации должен полностью утилизироваться, не загрязняя при этом окружающую среду.

По состоянию вопроса нами были проведены лабораторные испытания, которые показали совпадения конечных результатов по определению пропускной способности насыпной загрузки теоретическим и экспериментальным методами. Ошибка лежит в допустимых пределах  $\pm 5\%$ .

При испытании фильтров нами учитывались следующие требования:

1. Фильтрация производилась в направлении убывающей крупности загрузки с целью предотвращения образования малопроницаемого и трудноразрушаемого слоя при промывке осадка на поверхности загрузки.

2. Осуществлялась интенсивная промывка загрузочного материала, обеспечивающая максимальное удаление загрязняющих веществ из загрузки.

3. Фильтры обладали малой чувствительностью к колебаниям качества воды и расхода.

4. Фильтрующий материал, используемый для загрузки, обладал высокой прочностью и химической стойкостью; использовался дешевый фильтрующий материал (песок, гравий, керамзит, цеолиты и др.).

Для очистки морской воды нами в лабораторных исследованиях использовались фильтры с нисходящим (сверху вниз) потоком, по схеме прямоточного движения [5].

В фильтрах с направлением потока сверху вниз дренаж защищен от попадания неочищенных вод. При соответствующем подборе крупности и высоты загрузки скорость фильтрации для фильтров с нисходящим потоком составляла 18,46-93,93 м/ч.

Характеристика наполнителей для фильтра представлена в табл. 2.

Таблица 2

**Сравнительная характеристика объемной фильтрующей загрузки  
по размеру частиц  $d$**

Table 2

**Comparison of depth filter loading on particle size  $d$**

Фильтрующая загрузка	Керамзит	Гравий (морской)	Песок (морской)	Сульфат-уголь	Тканевый фильтр	Цеолиты	Пластиковая загрузка	Пластиковая загрузка в парафине
Размер частиц $d$ , м	$3 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$	$0,1 \cdot 10^{-2}$	$0,125 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$0,3 \cdot 10^{-2}$	$0,32 \cdot 10^{-2}$

Экспериментально подтверждена зависимость пропускной способности от структуры фильтрующего материала, что показано на рис. 1.

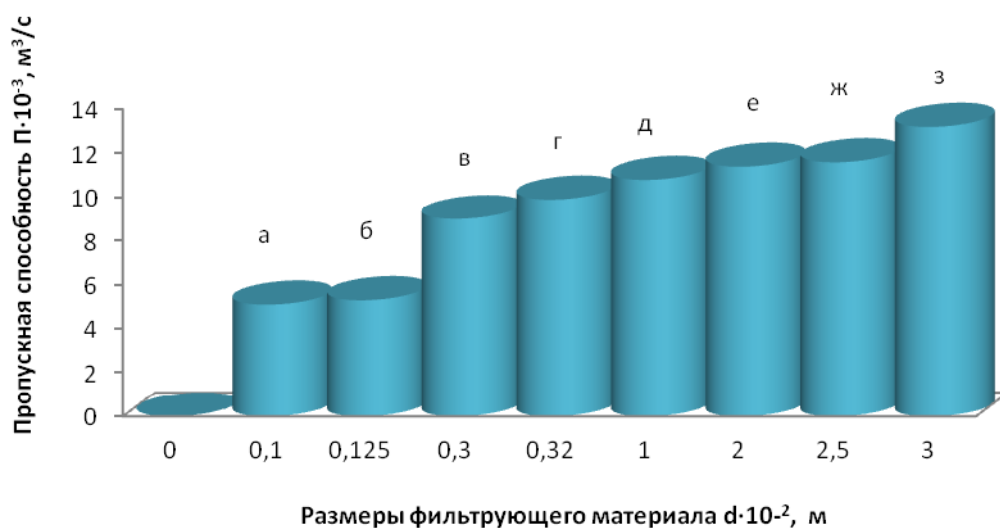


Рис. 1. Графическая зависимость пропускной способности от структуры фильтрующего материала: а – морской песок; б – сульфатуголь; в – пластиковая загрузка в парафине; г – пластиковая загрузка; д – тканевый фильтр; е – цеолиты; ж – гравий; з – керамзит

Fig. 1. Graphical Bandwidth dependence on the structure of filter-regulating material: а – sea sand; б – sulfaugol; в – plastic loading in paraffin; г – plastic download; д – fabric filter; е – zeolites; ж – gravel; з – concrete block

Как видно из графика, тонкость фильтрования ухудшается с увеличением размеров частиц. На удельную пропускную способность влияют такие факторы, как количество наполнителя и температурный режим, но влияние этих факторов незначительно. При использовании сыпучих материалов, таких как керамзит, гравий, цеолиты с частицами несферической формы в фильтре увеличивается число пор малых размеров. Фильтрование в этом случае происходит не только в порах между частицами, но и порах, образуемых разветвлениями частиц. Поэтому для тонкой очистки морской воды предпочтительнее применять материалы с частицами разветвленной формы. Эти материалы обладают и более высокой прочностью, так как контактная поверхность между такими частицами гораздо выше, чем между частицами, имеющими сферическую форму.

Зависимость пропускной способности фильтров от времени фильтрования при различном перепаде давления  $\Delta P$  представлена на рис. 2.

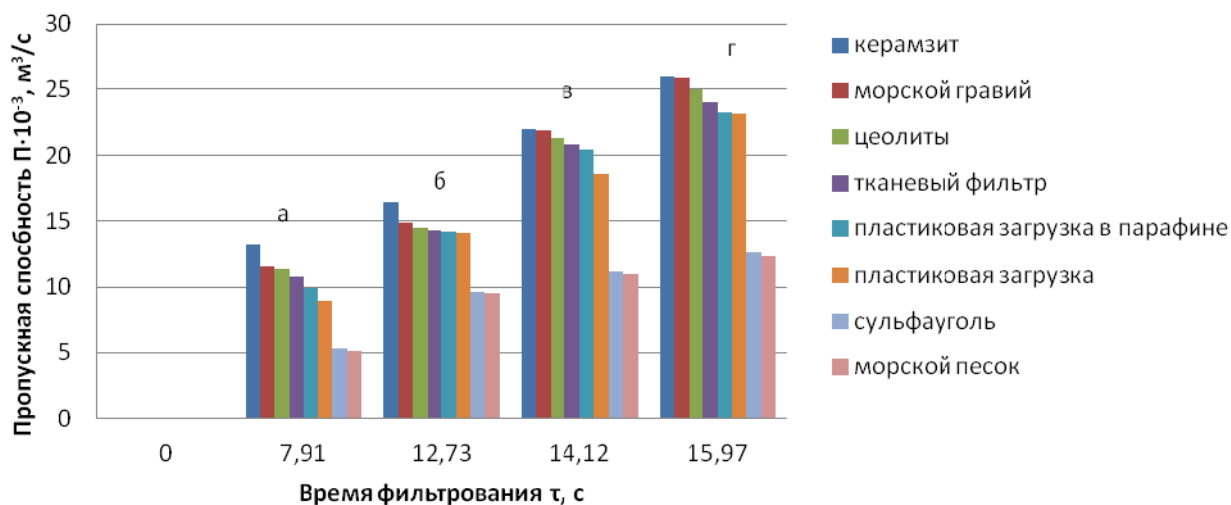


Рис. 2. Графическая зависимость пропускной способности насыпных фильтров от продолжительности фильтрования при перепаде давления:

а – 0,93 кПа; б – 1,84 кПа; в – 2,79 кПа; г – 3,73 кПа

Fig. 2. Graphical Bandwidth dependence on the length of bulk filters filter at a pressure drop:

а – 0,93 kPa; б – 1,84 kPa; в – 2,79 kPa; г – 3,73 kPa

Представленная нами схема движения морской воды через объемную фильтрующую загрузку позволяет осуществлять процесс фильтрования в пределах скорости фильтрования. Разработанная методика оценки эффективности процесса фильтрования будет использована при проведении исследований на натуральных испытаниях, однако должно учитываться следующее, что показатель массы загрязнителя, задержанного материалом на единицу поверхности за время испытания, полученный при исследовании материала в лабораторных условиях с применением искусственного загрязнителя, будет отличаться от данных, полученных в натуральных условиях.

### Список литературы

1. Гордин И.В. Технологические системы водообработки. – Л.: Химия, 1987. – 265 с.
2. Клячко В.А. Очистка природных вод / В.А. Клячко, И.Э. Апельцин. – М.: Стройиздат, 1971. – 579 с.
3. Угрюмова С.Д. Использование сыпучих материалов в процессе фильтрования // Сб. науч. тр. – Владивосток: Дальрыбвтуз, 2005. – № 17. – С. 50-53.
4. Угрюмова С.Д. К вопросу рационального использования водных ресурсов океана // Сб. науч. тр. – П-Камчатский, 2004. – № 3.
5. Угрюмова С.Д. Экспериментальное исследование насыпной загрузки в процессе фильтрования морской воды / С.Д. Угрюмова, А.И. Федорова, И.В. Панюкова // Приморские зори. – Владивосток: ТАНЭБ, 2012. – Вып. 1. – С. 241-245.

**Сведения об авторах:** Угрюмова Светлана Дмитриевна, доктор технических наук, профессор;

Федорова Александра Игоревна, аспирант.