

## РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ СНИЖЕНИЯ НЕГАТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НЕФТЕСОДЕРЖАЩИХ СТОЧНЫХ ВОД НА МОРСКИЕ ЭКОСИСТЕМЫ

А. А. Еськин, Г. А. Захаров, Я. Ю. Блиновская

*ФГБОУ ВО «Дальневосточный федеральный  
университет», г. Владивосток, Россия*

*Рецензент д-р техн. наук, профессор В. И. Петухов*

**Ключевые слова:** напорная флотация с распыливанием жидкости; нефтесодержащие сточные воды; прибрежные акватории; экологическая безопасность; эффективность очистки.

**Аннотация:** Рассмотрены основные принципы оптимизации технологии очистки сточных вод с использованием метода безреагентной напорной флотации с распыливанием жидкости, который позволит интенсифицировать процесс очистки производственных сточных вод от нефтепродуктов, что способствует повышению эффективности очистки стоков и обеспечит снижение негативного воздействия на конечный пункт их сброса. В результате распыливания жидкости в напорном резервуаре увеличится степень насыщения воздухом в среднем на 35 %, что на 15 % повысит эффективность извлечения нефтепродуктов из сточных вод и снизит их концентрацию с более чем 150 мг/л до 1...5 мг/л.

### Введение

Особенности развития человеческой цивилизации обусловили тяготение населения к водным ресурсам. Установлено, что около 80 % населения Земли живет в прибрежно-морской зоне (непосредственно на побережье и в пределах 100 км от него). Здесь сосредоточена основная часть крупнейших городов мира с населением более 1 млн человек. Данная тенден-

---

Еськин Антон Андреевич – старший преподаватель кафедры инженерных систем зданий и сооружений, e-mail: eskin.aa@dvvu.ru; Захаров Геннадий Александрович – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры инженерных систем зданий и сооружений, Блиновская Яна Юрьевна – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры безопасности в чрезвычайных ситуациях и защиты окружающей среды, ФГБОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», г. Владивосток, Россия.

ция прослеживается и в распределении ведущих отраслей промышленности. Все это предполагает возникновение экологических конфликтов в системе «человек – окружающая среда». Юг Дальнего Востока не является исключением [1, 2]. Согласно статистике, ежегодно в акватории России поступает около 15 млрд м<sup>3</sup> загрязненных сточных вод, а число случаев экстремально высокого и высокого загрязнения поверхностных вод остается на значительном уровне. В Приморском крае в морские акватории ежегодно поступает около 300 млн м<sup>3</sup> загрязненных вод, из которых 81 % приходится на предприятия энергетики и жилищно-коммунального хозяйства. Это приводит к направленному ухудшению качества воды, что сказывается на состоянии морских экосистем. Анализ источников загрязнения прибрежно-морской зоны южной части Приморского края показал, что ежегодно вместе со сточными водами в среднем в акваторию поступает около 50 т нефтепродуктов из более чем 500 организованных выпусков, что приводит к снижению видового разнообразия макробентоса на 22 – 25 %, особенно в зоне их непосредственного влияния, а также коренной перестройке морских экосистем в пользу более устойчивых к нефтепродуктам видам [3 – 5]. Основной причиной поступления нефтепродуктов в морские акватории является отсутствие или недостаточная эффективность систем очистки сточных вод – из 9000 действующих в России очистных сооружений 80 % требуют модернизации, включая изменение технологических решений. В этой связи разработка практических мер, направленных на обеспечение эффективной очистки нефтесодержащих сточных вод, является актуальной задачей.

Для очистки сбрасываемых вод используются различные подходы, основанные на комбинациях различных методов [6 – 8]. Но среди этого множества следует выделить метод напорной флотации, особенность которого заключается в подаче пузырьков воздуха малого диаметра (20...100 мкм), что обеспечивает более высокую степень извлечения нефтепродуктов из очищаемой жидкости [9, 10].

### Материалы и методы

Основным направлением интенсификации напорной флотации является увеличение количества выделяемых при дросселировании пузырьков, добиться которое можно, повысив эффективность растворения воздуха в напорном резервуаре при заданном избыточном давлении. Как правило, это достигается за счет увеличения поверхности воздушной фазы в объеме жидкости. Воздух может дробиться в турбулентном потоке жидкости, создаваемом конструкцией насоса [11], специальным вихревым устройством [12], вращающимся ротором [13] или за счет воздействия электрогидродинамического устройства [14].

Коллективом Инженерной школы Дальневосточного федерального университета разработан способ напорной флотации с распыливанием жидкости [15], при котором увеличение поверхности контакта между фазами достигается за счет дробления жидкой фазы в объеме воздуха. В напорном резервуаре, находящемся под избыточным давлением воздуха,

жидкость распыливается через гидравлическую форсунку в виде мелкодисперсного факела, что повышает степень насыщения ее воздухом, и, в конечном итоге, увеличивает вероятность извлечения частиц загрязнений за счет роста количества пузырьков, выделяемых во флотационном отделении.

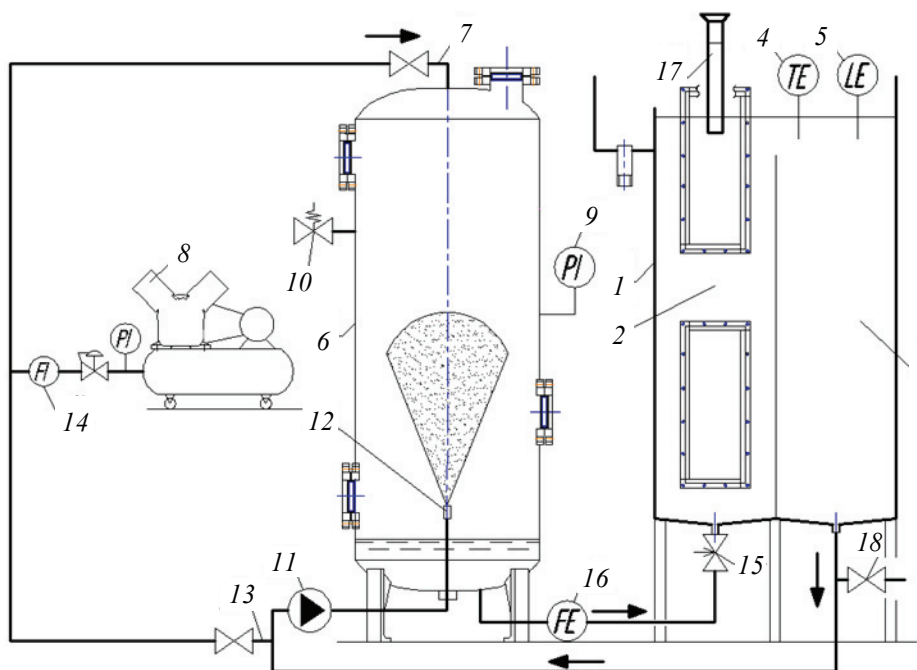
Для сравнения эффективности предложенного способа с напорной флотацией барботажного типа разработана экспериментальная установка (рис. 1). В ходе экспериментального исследования необходимо доказать два основных положения:

- распыливание увеличивает степень насыщения жидкости воздухом;
- напорная флотация с распыливанием жидкости позволяет повысить эффективность очистки нефтесодержащих вод.

### Результаты и обсуждения

При насыщении жидкости распыливанием в напорном резервуаре 6 создавалось избыточное давление воздуха в диапазоне 0...5 бар. Роторно-пластинчатым насосом 11 через ударно-струйную форсунку 12 распыливалась жидкость и насыщалась воздухом.

При насыщении жидкости барботированием форсунку 12 снимали с патрубка. Перед насосом 11, перекачивающим насыщаемую жидкость с патрубка.



**Рис. 1. Схема экспериментальной установки:**

1 – флотационная емкость; 2 – флотационное отделение; 3 – отделение отстоя воды; 4, 5 – датчики температуры и уровня жидкости соответственно; 6 – напорный резервуар; 7, 13 – патрубки подвода сжатого воздуха; 8 – компрессор; 9 – манометр; 10 – предохранительный сбросной клапан; 11 – насос; 12 – форсунка; 14 – ротаметр; 15 – вентиль; 16 – водосчетчик; 17 – мерный цилиндр; 18 – кран

из отделения отстоя воды 3, компрессором подавался воздух в количестве 10 % от объема перекачиваемой жидкости. Образовавшаяся водовоздушная смесь поступала в напорный резервуар. Нерастворившийся воздух удалялся через сбросной клапан 10.

Затруднительно напрямую измерить количество воздуха растворенного в жидкости, находящейся под избыточным давлением, поэтому степень насыщения оценивали косвенно по количеству воздуха выделяемого при дросселировании. Используя мерный цилиндр 17, фиксировали время поступления в него 50 см<sup>3</sup> воздуха. Зная площадь живого сечения цилиндра, можно рассчитать скорость барботажа  $q$ , мкм/с,

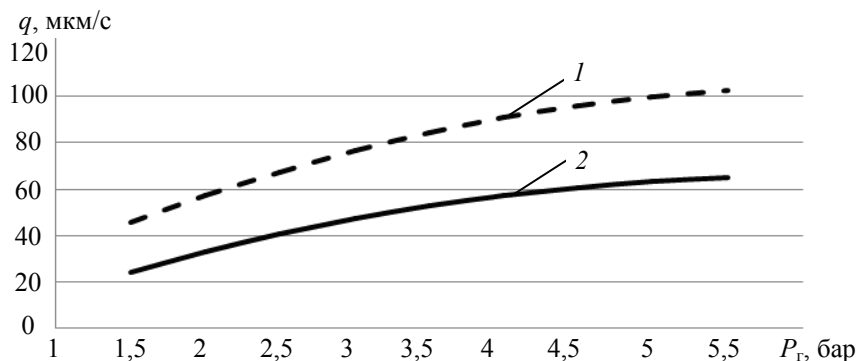
$$q = \frac{V_r}{F\tau} \cdot 10000, \quad (1)$$

где  $V_r$  – объем воздуха, см<sup>3</sup>,  $V_r = 50$ ;  $F$  – площадь живого сечения цилиндра, см<sup>2</sup>,  $F = 20$ ;  $\tau$  – время заполнения объема  $V_r$ , с; 10000 – коэффициент перевода см в мкм.

Чем выше значение скорости барботажа, тем больше выделилось пузырьков, следовательно выше исходная степень насыщения жидкости воздухом.

В ходе предварительных экспериментов определено, что скорость барботажа в центре флотационного отделения существенно выше, чем в пристенных областях. Это связано с коалесценцией зародышевых пузырьков – крупные пузырьки воздуха, получаемые при дросселировании, активно захватывают мелкие пузырьки и ускоренно всплывают непосредственно над местом входа пересыщенной жидкости. Таким образом, необходимо измерять скорость барботажа на некотором удалении от центра флотационного отделения. Графики аппроксимации экспериментальных данных представлены на рис. 2.

Независимо от способа насыщения наблюдается рост скорости барботажа с увеличением давления насыщения, что объясняется увеличением растворимости воздуха с увеличением давления. Однако, при давлении выше 5 бар скорость барботажа реально перестает увеличиваться, что связано с тем, что практически весь растворившейся воздух выделяется в центре флотационного отделения в виде крупных пузырьков, которые



**Рис. 2. Сравнение скорости барботажа:**  
1 – распыливание; 2 – барботирование

вносят отрицательный вклад в эффективность флотационного извлечения. Таким образом, давление 5 бар является критическим для насыщения жидкости в напорном резервуаре. На практике ухудшение очистки, связанное с коалесценцией пузырьков, начинает наблюдаться при более низких давлениях газа  $P_r$  2,5...3,0 бар. В среднем скорость барботажа при насыщении жидкости распыливанием выше на 35 %, чем при насыщении жидкости барботированием. Таким образом, можно сделать вывод, что насыщение жидкости в напорном резервуаре распыливающего типа увеличивает количество флотационных пузырьков.

Для определения эффективности извлечения нефтепродуктов с помощью установки (см. рис. 1) проведена очистка сточных вод напорной флотацией барботажного типа и напорной флотацией с распыливанием жидкости. В качестве сточных вод использовалась модельная нефтеводная эмульсия мазута марки М100 в водопроводной воде, полученная методом гидродинамического эмульгирования [16]. Насыщенная барботированием или распыливанием жидкость поступала во флотационное отделение 2, где выделялись флотационные пузырьки, которые извлекали частицы нефтепродуктов из объема жидкости. Сфлотированный продукт удалялся с поверхности сборным устройством из полипропилена. Очищенная жидкость забиралась из нижней части отделения отстоя воды 3 и отправлялась на повторное насыщение. Таким образом, очистку проводили по схеме со 100%-й рециркуляцией. Пробы отбирали до начала очистки, через 15, 30 и 45 минут. Концентрацию нефтепродуктов, содержащихся в пробе, определяли гравиметрическим методом.

При сравнении полученных аппроксимирующих зависимостей (рис. 3) видно, что при одинаковых условиях проведения эксперимента (давление в напорном резервуаре 2,5 бар, температура жидкости 22...24 °С, время обработки  $\tau$  равно 50 мин, начальная концентрация нефтепродуктов ( $НП$ )  $C_{НП}$  составила 120 мг/л, расход жидкости 1 м<sup>3</sup>/ч) степень извлечения частиц нефтепродуктов напорной флотацией с распыливанием жидкости выше на 17,9 %, чем напорной флотацией с барботированием жидкости (остаточная концентрация нефтепродуктов 35,3 мг/л при насыщении барботированием и 13,79 мг/л при насыщении распыливанием).

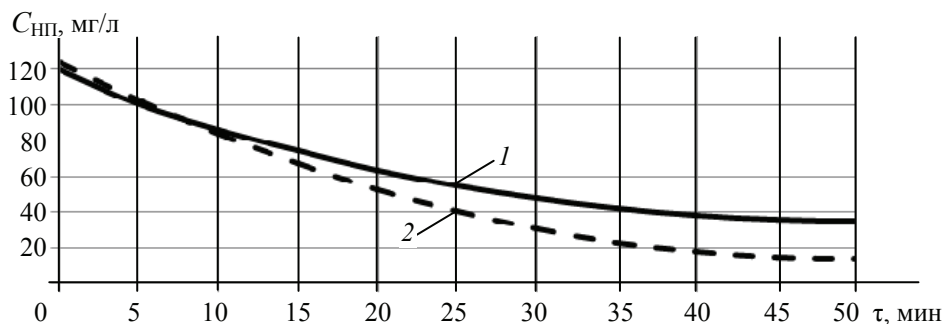


Рис. 3. Сравнение эффективности очистки:  
1 – барботирование; 2 – распыливание

Исходя из результатов эксперимента, установили, что распыливание жидкости интенсифицирует процесс очистки нефтесодержащих вод напорной флотацией.

Важным вопросом является энергетическая эффективность напорной флотации с распыливанием жидкости. В схемах с насыщением жидкости барботированием компрессор работает непрерывно, а нерастворившийся воздух отводится через сбросной клапан в атмосферу. При насыщении жидкости распыливанием воздух не выходит из напорного резервуара, а расходуется только на насыщение жидкости, то есть компрессор работает периодически, включаясь только при снижении давления. Частоту включения компрессора можно оценить расчетом. При изменении абсолютного давления в диапазоне 100...400 кПа в жидкости растворяется примерно 60 мг/л воздуха. Если расход насыщаемой жидкости принять равным  $1 \text{ м}^3/\text{ч}$ , то массовый расход воздуха на насыщение составит 0,06 кг/ч.

Согласно уравнению Менделеева–Клапейрона, в напорном резервуаре объемом 300 л при давлении 400 кПа, и температуре 20 °С, содержится 1,43 кг воздуха. Для того чтобы давление в резервуаре снизилось на 10 % до 360 кПа из резервуара должно выйти 0,15 кг воздуха. Следовательно, запаса воздуха в напорном резервуаре хватит на 2,5 ч работы, что позволяет включать компрессор не более 4 раз за 8-часовую рабочую смену. Для распыливания жидкости необходимо использовать насос с более высоким напором, чем при насыщении жидкости барботированием. Как показывает сравнительный расчет, затрата электроэнергии при увеличении напора насоса с 30 до 80 м вод. ст. не превышает экономии, получаемой за счет исключения постоянной работы компрессора. Таким образом, насыщение жидкости в напорном резервуаре распыливающего типа не приводит к увеличению энергетических затрат.

### **Заключение**

Проведенные исследования показали, что использование напорной флотации с распыливанием жидкости способствует более активному извлечению частиц нефтепродуктов за счет увеличения поверхности контакта между фазами. Данный подход позволяет увеличить степень насыщения воздухом на 30 – 35 %, по сравнению с насыщением жидкости барботированием, за счет чего эффективность извлечения нефтепродуктов из сточных вод повышается на 15 %. Установлено, что насыщение жидкости в напорном резервуаре не сопровождается увеличением энергетических затрат, что объясняется снижением затрат электроэнергии на работу компрессора. Полученные результаты могут быть использованы как при разработке новых устройств очистки сточных вод напорной флотацией, так и при реконструкции существующих напорных флотаторов очистных сооружений предприятий ЖКХ.

#### *Список литературы*

1. Наумов, Ю. А. Антропогенез и экологическое состояние геосистемы прибрежно-шельфовой зоны залива Петра Великого Японского моря / Ю. А. Наумов. – Владивосток : Дальнаука, 2006. – 300 с.

2. Блиновская, Я. Ю. Современная оценка загрязнения акватории бухты Золотой Рог (Японское море) углеводородами / Я. Ю. Блиновская, С. Ю. Монинец, Д. С. Монинец // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2010. – № 7. – С. 4 – 8.
3. Белан, Т. А. Условия существования и особенности распределения макрозообентоса морской акватории порта Владивосток (залив Петра Великого, Японское море) / Т. А. Белан, Л. С. Белан, А. В. Березов // Сборник статей РЭА. – 2009. – № 1. – С. 116 – 128.
4. Гамаюнова, О. А. Экологическое состояние бухт Козьмина и Врангеля: микробиологический и биоиндикационный контроль / О. А. Гамаюнова // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2016. – № 3. – С. 36 – 40.
5. Лучин, В. А. Тенденции долгопериодных изменений в водах залива Петра Великого / В. А. Лучин, С. И. Кислова, А. А. Круц // Динамика морских экосистем и современные проблемы сохранения биологического потенциала морей России. – Владивосток : Дальнаука, 2007. – С. 33 – 50.
6. Стахов, Е. А. Очистка нефтесодержащих сточных вод предприятий хранения и транспорта нефтепродуктов / Е. А. Стахов. – Л. : Недра, 1983. – 263 с.
7. Совершенствование технологии физико-химической очистки нефтесодержащих сточных вод с последующей утилизацией нефтешламов / Я. И. Вайсман [и др.] // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2010. – № 11. – С. 14 – 18.
8. Зубарева, Г. И. Технологические схемы глубокой очистки нефтесодержащих сточных вод с применением метода напорной флотации / Г. И. Зубарева, М. Н. Черникова // Экология и промышленность России. – 2011. – № 10. – С. 15 – 17.
9. Алексеев, Е. В. Основы технологии очистки сточных вод флотацией / Е. В. Алексеев. – М. : Изд-во АСВ, 2009. – 136 с.
10. Saththasivam, J. An Overview of Oil–Water Separation Using Gas Flotation Systems / J. Saththasivam, K. Loganathan, S. Sarp // Chemosphere. – 2016. – Vol. 144. – P. 671 – 680. doi: 10.1016/j.chemosphere.2015.08.087
11. KTM Series microbubble generator [Электронный ресурс] / Daf-pump.com. – Режим доступа : [www.daf-pump.com](http://www.daf-pump.com) (дата обращения: 22.03.2018).
12. Гришин, Л. Б. Совершенствование очистки нефтесодержащих производственных сточных вод : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.04 / Гришин Лев Борисович. – Пенза, 2009. – 144 с.
13. Лабораторные исследования технологии диспергирования водовоздушной смеси в роторно-кавитационном устройстве / С. Ю. Андреев [и др.] // Региональная архитектура и строительство. – 2015. – № 3 (24). – С. 83 – 88.
14. Алексеева, Т. В. Разработка технологии очистки замазученных сточных вод ТЭЦ с использованием метода безнапорной флотации : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.04 / Алексеева Татьяна Викторовна. – Пенза, 2003. – 126 с.
15. Еськин, А. А. Напорная флотация с распыливанием жидкости / А. А. Еськин // Безопасность в техносфере. – 2017. – Т. 6, № 2. – С. 48 – 55.
16. Еськин, А. А. Очистка нефтесодержащих вод напорной флотацией с распыливанием жидкости / А. А. Еськин, Н. С. Ткач, М. С. Лягуша // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2018. – № 1 (709). – С. 47 – 56.

### References

1. Naumov Yu.A. *Antropogenez i ekologicheskoye sostoyaniye geosistemy pribrezhno-shel'fovoy zony zaliva Petra Velikogo Yaponskogo morya* [Anthropogenesis and the ecological state of the geosystem of the coastal shelf zone of Peter the Great Bay, Sea of Japan], Vladivostok: Dal'nauka, 2006, 300 p. (In Russ.)

2. Blinovskaya Ya.Yu., Moninets S.Yu., Moninets D.S. [Modern assessment of pollution of the water area of the Golden Horn Bay (Sea of Japan) by petroleum hydrocarbons], *Zashchita okruzhayushchey sredy v neftegazovom komplekse* [Environmental protection in the oil and gas complex], 2010, no. 7, pp. 4-8. (In Russ., abstract in Eng.)
3. Belan T.A., Belan L.S., Berezov A.V. [The conditions of existence and the distribution of macrozoobenthos in the marine area of the port of Vladivostok (Peter the Great Bay, Sea of Japan)], *Sbornik statey REA* [Collection of articles REA], 2009, no. 1, pp. 116-128. (In Russ.)
4. Gamayunova O.A. [The ecological state of the bays of Kozmin and Wrangel: microbiological and bioindicative control], *Zashchita okruzhayushchey sredy v neftegazovom komplekse* [Environmental Protection in the Oil and Gas Complex], 2016, no. 3, pp. 36-40. (In Russ., abstract in Eng.)
5. Luchin V.A., Kislova S.I., Kruts A.A. [Tendencies of long-period changes in the waters of Peter the Great Bay], *Dinamika morskikh ekosistem i sovremennyye problemy sokhraneniya biologicheskogo potentsiala morey Rossii* [Dynamics of marine ecosystems and modern problems of preservation of the biological potential of the seas of Russia], Vladivostok: Dal'nauka, 2007, pp. 33-50. (In Russ.)
6. Stakhov Ye.A. *Ochistka neftesoderzhashchikh stochnykh vod predpriyatiy khrane-niya i transporta nefteproduktov* [Purification of oily waste water from storage and transportation of petroleum products], Leningrad: Nedra, 1983, 263 p. (In Russ.)
7. Vaysman YA.I., Rudakova L.V., Glushankova I.S., Ivanova A.N., Khodyashev M.B., Vrublevskiy V.S. [Improving the technology of physical and chemical treatment of oil-containing waste water, followed by the disposal of oil sludge], *Zashchita okruzhayushchey sredy v neftegazovom komplekse* [Environmental Protection in the Oil and Gas Complex], 2010, no. 11, pp. 14-18. (In Russ., abstract in Eng.)
8. Zubareva G.I., Chernikova M.N. [Technological schemes for the deep treatment of oil-containing waste water using the pressure flotation method], *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and Industry of Russia], 2011, no. 10, pp. 15-17. (In Russ., abstract in Eng.)
9. Alekseyev Ye.V. *Osnovy tekhnologii ochistki stochnykh vod flotatsiyey* [Fundamentals of wastewater treatment technology by flotation], Moscow: Izdatel'stvo ASV, 2009, 136 p. (In Russ.)
10. Saththasivam J., Loganathan K., Sarp S. An Overview of Oil–Water Separation Using Gas Flotation Systems, *Chemosphere*, 2016, vol. 144, pp. 671-680, doi: 10.1016/j.chemosphere.2015.08.087
11. www.daf-pump.com (accessed 22 March 2018).
12. Grishin L.B. *PhD Dissertation (Technical)*, Penza, 2009, 144 p. (In Russ.)
13. Andreyev S.Yu., Gar'kina I.A., Petrunin A.A., Las'kov N.N. [Laboratory studies of water-air mixture dispersion technology in a rotary-cavitation device], *Regional'naya arkhitektura i stroitel'stvo* [Regional architecture and construction], 2015, no. 3 (24), pp. 83-88. (In Russ.)
14. Alekseyeva T.V. *PhD Dissertation (Technical)*, Penza, 2003, 126 p. (In Russ.)
15. Yes'kin A.A. [Pressure flotation with liquid atomization], *Bezopasnost' v tekhnosfere* [Safety in the Technosphere], 2017, vol. 6, no. 2, pp. 48-55. (In Russ.)
16. Yes'kin A.A., Tkach N.S., Lyagusha M.S. [Purification of oily water by pressure flotation with atomization of a liquid], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo* [News of higher educational institutions. Building], 2018, no. 1 (709), pp. 47-56. (In Russ., abstract in Eng.)



## **Developing the Technology to Reduce the Negative Impact of Oily Wastewater on Marine Ecosystems**

**A. A. Eskin, G. A. Zakharov, Ya. Yu. Blinovskaya**

*Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia*

**Keywords:** pressure flotation with fluid atomization; oily wastewater; coastal waters; environmental safety; cleaning efficiency.

**Abstract:** According to statistics, about 80% of the world's population lives in the coastal-marine zone (directly on the coast and within 100 km from it). This is also observed in the distribution of the major industries. All this suggests the emergence of environmental conflicts in the "man – environment" system. The south of the Far East is no exception. The most striking conflict is the pollution of marine areas with oily products. Their sources vary significantly. In the coastal areas of the south of the Far East, these are wastewater from industrial enterprises and housing and communal services, since the existing treatment facilities do not meet modern environmental safety requirements. The study examines the basic principles of optimization of wastewater treatment technology using the method of non-reagent pressure flotation with liquid spraying, which will intensify the process of cleaning industrial wastewater from oily products, which contributes to the efficiency of wastewater treatment and will reduce the negative impact on the final point of their discharge. As a result of the atomization of the liquid in the pressure tank, it will increase the degree of saturation with air by an average of 35%, which will increase the efficiency of oil recovery from wastewater by 15% and reduce their concentration from more than 150 mg/l to 1 ... 5 mg/l.

---

© А. А. Еськин, Г. А. Захаров,  
Я. Ю. Блиновская, 2019