

ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ГИДРОДИНАМИКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ГЛУБОКОВОДНЫХ ВЫПУСКОВ ОЧИЩЕННЫХ СТОЧНЫХ ВОД В МОРСКИХ АКВАТОРИЯХ В ПЕРИОДЫ ЛЕДОСТАВА

© С. А. Безбородов¹✉, Е. В. Левкина¹

¹ ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет»,
Владивосток, Российская Федерация

✉ bezborodov.sa@dvfu.ru

Ключевые слова: выпуск сточных вод; ледовый покров; морские акватории.

Аннотация: Представлены результаты применения моделей вычислительной гидродинамики для решения прикладных задач, связанных с определением наиболее благоприятных режимов сброса очищенных сточных вод в морские акватории в периоды ледостава. По результатам моделирования течений в окрестностях глубоководного выпуска получена расчетная зависимость, с помощью которой устанавливаются оптимальные характеристики сбросных устройств и режимов сброса, что позволяет минимизировать негативное воздействие на морскую среду в месте выпуска.

Введение

Активное освоение арктического побережья, ставшее в последние десятилетия приоритетным направлением развития государства, подняло проблему обеспечения экологической безопасности морских акваторий на новый уровень. Ряд особенностей, характерных для арктических морей, среди которых особое место занимает устойчивый ледовый покров, подвергает сомнению состоятельность действующих методик, применяемых для определения допустимых антропогенных нагрузок на морские акватории.

Комплексное влияние ледового покрова на гидрологические и биологические процессы, протекающие в прибрежных водах морей, остается малоизученным. Однако анализ ряда работ отечественных и зарубежных авторов [1 – 6] позволяет выделить некоторые особенности процессов, протекающих в морских акваториях в периоды ледостава. Так, установление устойчивого ледового покрова исключает формирование ветровых течений, имеющих ключевое значение в процессах разбавления и перемешивания; снижение температуры воды и уровня естественной освещенно-

сти, возникающее вследствие отражения света поверхностью льда и затухания коротковолнового излучения в толще ледяного покрова, приводит к снижению биологической активности и, следовательно, самоочищающей способности. Оценка условий ледостава с позиций обеспечения экологической безопасности позволяет обозначить их как наименее благоприятный период для организации техногенных сбросов. В связи с этим исследования распространения загрязняющих веществ (ЗВ) в морских акваториях, покрытых льдом, представляют большой практический интерес.

Постановка задачи исследования

Ввиду отсутствия единой теории для описания сложных процессов переноса ЗВ в окрестностях глубоководных выпусков очищенных стоков используют, как правило, данные экспериментальных исследований, реализуемых на физических моделях.

Физическое моделирование глубоководных выпусков связано с решением ряда сложных задач: корректным заданием масштаба модели и продолжительности эксперимента, выбором области моделирования, исключаяющей обратные течения, заданием переменных ветровых течений и пр. Определенную сложность представляет корректное измерение исследуемых величин, носящее субъективный характер при использовании красителей или требующее привлечение сложного измерительного оборудования.

Указанные обстоятельства делают перспективным применение для исследования глубоководных выпусков очищенных сточных вод моделей вычислительной гидродинамики, основанных на методе конечных объемов, в котором расчетная область разбивается на множество расчетных ячеек, и для каждой из них записывается система законов сохранения массы, импульса и энергии. Далее зависимости преобразуются в систему алгебраических уравнений, общее количество которых зависит от физики решаемой задачи, и вводятся граничные условия, задающие значения искомых параметров на границах расчетной области. После постановки граничных условий выбирают метод решения задачи и инициируют ее решение.

Дополнительным фактором, определяющим перспективность численного моделирования, является отсутствие в периоды ледостава сложно моделируемых переменных ветровых течений и волновых явлений, характерных для периодов открытой воды.

Ниже представлены результаты применения моделей вычислительной гидродинамики для решения прикладных задач, связанных с определением наиболее благоприятных режимов сброса очищенных сточных вод в морские акватории в периоды ледостава.

Параметризация процесса распространения струи сточных вод в морских акваториях

Основываясь на известном положении о том, что в зоне начального разбавления процесс смешения происходит вследствие увлечения окружающей жидкости турбулентным струйным потоком, предположим картину, формирующуюся в случае организации подледного выпуска очищенных сточных вод.

Формируемый при истечении из оголовка турбулентный струйный поток достигает свободной поверхности, когда часть кинетической энергии струи переходит в потенциальную, в результате чего образуется так называемый бурун – возвышение над свободной поверхностью воды. При отсутствии сносящих течений дальнейшее распространение струйного потока происходит равномерно во всех направлениях в верхних горизонтах воды, в движение вовлекаются новые массы жидкости принимающей среды, увеличивается расход струи и снижается ее скорость. Описанная картина хорошо согласуется с известными представлениями об особом виде турбулентных струй, носящих название радиальные [7]. Существенным фактором, оказывающим влияние на характер течений, будут являться циркуляционные зоны, формирующиеся при взаимодействии струи со свободной поверхностью и определяющие характер растекания радиальной струи.

Существующие исследования [7, 8] дают возможность представить схемы растекания струй сточной жидкости при организации глубоководных выпусков (рис. 1) в терминах теории турбулентных струй, носящих название свободные (см. рис. 1, а) и ограниченные или стесненные (см. рис. 1, б, в).

Анализ возможных схем растекания струи сточных вод при организации подледного выпуска позволяет определить свободную струю (см. рис. 1, а) как наиболее благоприятную при установлении режима сброса и определении характеристик сбросного устройства, поскольку в этом случае процессы смешения происходят с чистыми водами окружающей жидкости, а не с ранее сброшенным стоком, как в случае стесненных струй (см. рис. 1, б, в).

Экспериментальное исследование характера распространения струи сточных вод в локальной области у сбросного устройства

Для установления схемы растекания струи воспользуемся теорией эксперимента, предполагающей выполнение следующей последовательности действий:

1) на основе имеющихся исследований устанавливаются параметры, определяющие процесс растекания струи;

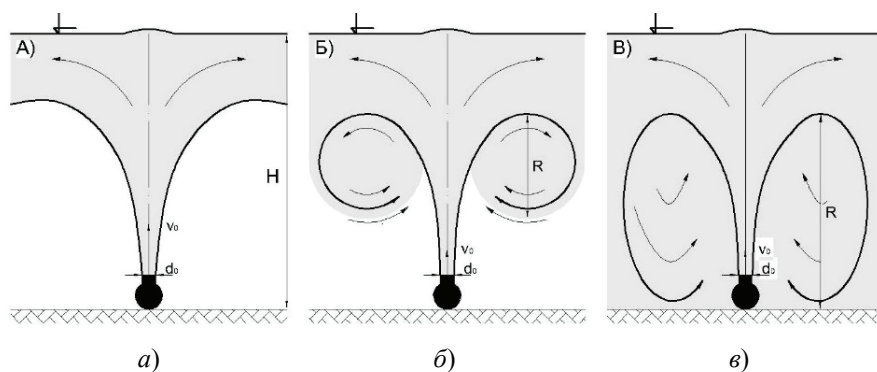


Рис. 1. Возможные формы растекания струи при организации подледного выпуска:

а – радиальная; б – с циркуляционными зонами; в – с циркуляционными зонами, распространяющимися на всю глубину

2) с помощью теории размерности выполняется рационализация определяющих параметров;

3) составляется общий вид расчетной зависимости;

4) проводится серия экспериментов;

5) осуществляется вывод расчетной зависимости.

Основываясь на данных исследований, посвященных выпускам очищенных стоков в морские акватории, основными факторами, влияющими на схему растекания, следует считать: d_0 – диаметр оголовка выпуска; v_0 – скорость истечения сточной жидкости из оголовка; плотность ρ_0 и кинематическую вязкость μ_0 сточной жидкости; H – глубину воды в месте выпуска; ρ_∞ – плотность морской воды; g – ускорение свободного падения.

На основании анализа схем растекания можно считать, что переход радиальной струи (см. рис. 1, а) к радиальной струе с циркуляционными зонами (см. рис. 1, б) и далее к струе с циркуляционными зонами, распространяющимися на всю глубину (см. рис. 1, в), возможен при изменении линейного размера циркуляционной области R от 0 до глубины H .

Запишем функциональную зависимость для определения горизонтального размера R_x циркуляционной области R , связывающую все указанные величины

$$R_x = f(d_0, v_0, \rho_0, \mu_0, \rho_\infty, H, g). \quad (1)$$

Приняв за основную систему размерностей MLT и выбрав в качестве основных величин с независимыми размерностями d_0, v_0, ρ_0 , воспользуемся π -теоремой [8] и перепишем полученный функционал в виде:

$$\frac{R_x}{d_0^{\alpha_0} v_0^{\alpha_0} \rho_0^{\alpha_0}} = \psi \left(\frac{\mu_0}{d_0^{\alpha_1} v_0^{\alpha_2} \rho_0^{\alpha_3}}, \frac{\rho_\infty}{d_0^{\beta_1} v_0^{\beta_2} \rho_0^{\beta_3}}, \frac{H}{d_0^{\gamma_1} v_0^{\gamma_2} \rho_0^{\gamma_3}}, \frac{g}{d_0^{\theta_1} v_0^{\theta_2} \rho_0^{\theta_3}} \right); \quad (2)$$

$$\pi_0 = \psi(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4). \quad (3)$$

Выразив размерности всех величин, входящих в π -числа, через размерности основных величин и приравняв к нулю показатели степени при одинаковых размерностях, получим:

$$\pi_0 = \frac{R_x}{d_0^{\alpha_1} v_0^{\alpha_2} \rho_0^{\alpha_3}}; \quad \frac{R_x}{L^{\alpha_1} L^{\alpha_2} T^{-\alpha_2} M^{\alpha_3} L^{-3\alpha_3}} = M^0 L^0 T^0 \quad (4)$$

откуда $1 - \alpha_1 - \alpha_2 + 3\alpha_3 = 0$; $\alpha_2 = 0$; $-\alpha_3 = 0$; $\alpha_1 = 1$ и

$$\pi_0 = \frac{R_x}{d_0} \quad (5)$$

Аналогичным образом найдем остальные π -числа:

$$\pi_1 = \frac{\mu_0}{d_0 v_0 \rho_0} = \frac{v_0}{d_0} \frac{1}{\text{Re}}; \quad (6)$$

$$\pi_2 = \frac{\rho_\infty}{\rho_0}; \quad (7)$$

$$\pi_3 = \frac{H}{d_0}; \quad (8)$$

$$\pi_4 = \frac{gd_0}{v_0^2} = \frac{1}{Fr}, \quad (9)$$

где Re и Fr – критерии Рейнольдса и Фруда соответственно.

С учетом полученных значений функциональная зависимость (3) переписывается в виде

$$\frac{R_x}{d_0} = \psi \left(\frac{1}{Re}, \frac{\rho_\infty}{\rho_0}, \frac{H}{d_0}, \frac{1}{Fr} \right). \quad (10)$$

Проанализируем полученный функционал и выполним комбинацию чисел подобия.

При обозначенной разности плотностей потока и принимающей среды очевидно совместное действие сил инерции и плавучести, что делает возможным комбинацию второго и четвертого π -члена уравнения (10), которые можно переписать в виде плотностного числа Фруда Fr_p

$$Fr_p = Fr \frac{\rho_0}{\rho_\infty - \rho_0} = \frac{v_0^2}{gd_0 \frac{\rho_\infty - \rho_0}{\rho_0}}. \quad (11)$$

Для дальнейшего уменьшения количества переменных при проведении экспериментальных исследований обратимся к теории размерности, согласно которой можно пренебречь влиянием тех чисел, значения которых близки к нулю или бесконечности. В таком случае подобие относительно малых или очень больших значений критериев выполняется автоматически, область, в которой этими критериями можно пренебречь, является автомодельной. Так, из работы [9, 10] известно, что автомодельность при исследовании турбулентных струй достигается при числах Рейнольдса $Re > 200$.

С учетом всех преобразований в границах автомодельных областей функциональная зависимость (10) переписывается в виде

$$\frac{R_x}{H} = \psi(Fr_p). \quad (12)$$

Для установления искомой функциональной зависимости проведена серия численных экспериментов с использованием моделей вычислительной гидродинамики семейства CFD (*англ.* Computational Fluid Dynamic) реализованной в пакете прикладных программ ANSYS Fluent. Решатели CFD в программе ANSYS основаны на методе конечных объемов.

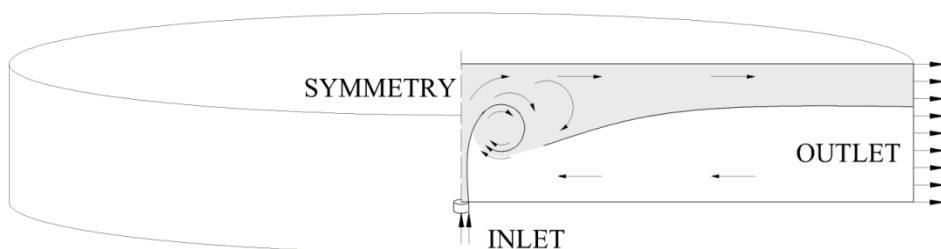


Рис. 2. Схема экспериментальной модели

При построении моделей использовались геометрические характеристики створов, перпендикулярных направлению оси выпуска. Ввиду симметричного расположения струи относительно оси оголовка выпуска, при моделировании по оси оголовка задавалось условие симметрии. Размеры расчетных областей при каждом опыте принимались индивидуально, исходя из объема часового сброса. Условия на боковой границе задавались исходя из условия обеспечения беспрепятственного оттока воды без формирования обратных течений. Описание турбулентных течений реализовывалось применением модели турбулентности семейства $k-\epsilon$, мультифазность течений – подключением модели Eulerian. Схема экспериментальной модели приведена на ис. 2.

Задача решалась в стационарной постановке, достигаемой при сходимости решения 0,001 %.

Обсуждение результатов исследования

На рисунке 3 приведены диаграммы распределения пресной воды в локальной области у места сброса, полученные в результате моделирования выпуска очищенных сточных вод при следующих условиях: выпуск вертикальный, глубина моря в месте выпуска $H = 4,0$ м; диаметр оголовка $d_0 = 0,4$ м; разные скорости истечения v_0 ; плотностное число Фруда Fr_p : $a - 2,1$; $b - 8,5$; $c - 19,1$, $e - 34$, $d - 172$.

Серия численных экспериментов, проведенных для вертикального выпуска при условиях: диаметр оголовка выпуска $d_0 = 0,4$ м, глубина моря в месте выпуска $H = 1,0 \dots 4,0$ м, плотность морской воды $\rho_\infty = 1030$ кг/м³, плотность сточной жидкости $\rho_0 = 1000$ кг/м³, скорость истечения сточной жидкости из оголовка $v_0 = 0,1 \dots 5,0$ м/с, плотностное число Фруда $Fr_p = 0,1 \dots 172$, позволила получить график зависимости геометрических характеристик циркуляционной области от плотностного числа Фруда (рис. 4).

Анализ результатов, полученных при проведении серии численных экспериментов, показали, что увеличение линейных размеров циркуляционных областей происходит преимущественно в горизонтальном направлении. Горизонтальный размер области циркуляции R_x в диапазоне рекомендуемых [11, 12] скоростей истечения из оголовка имеет предельное значение, близкое к $3H$, при достижении которого дальнейшее увеличение значений Fr_p приводит только к качественным изменениям области циркуляции, выраженным в вовлекаемом расходе сбрасываемых вод.

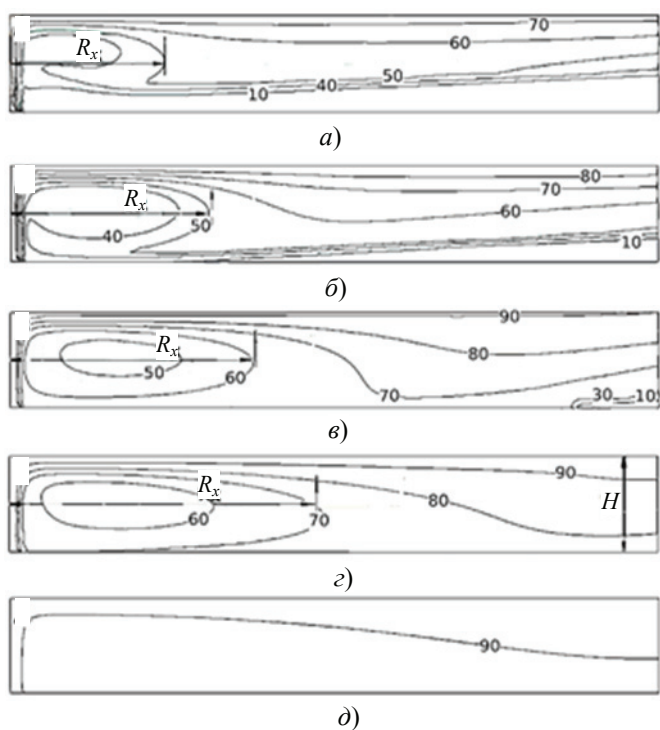


Рис. 3. Диаграмма распределения очищенного стока, %, в локальной области у оголовка выпуска при различных скоростях истечения v_0 , м/с:
 а – 0,5; б – 1,0; в – 1,5; г – 2,0; д – 4,5

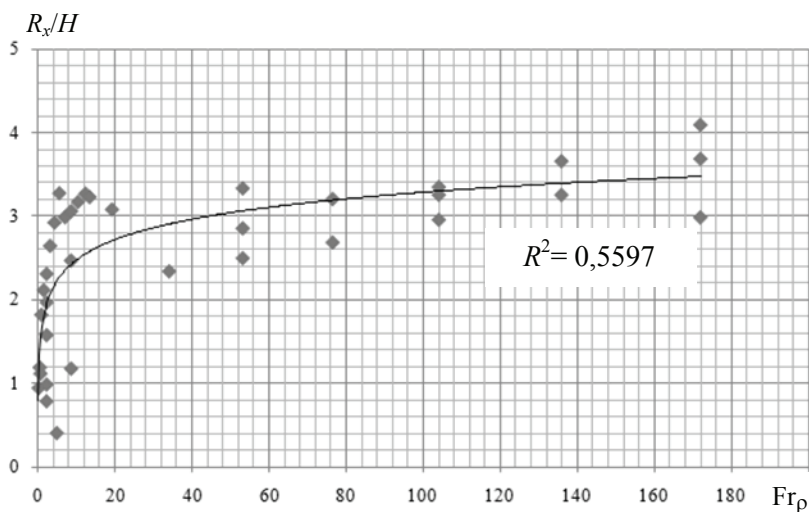


Рис. 4. График зависимости критического значения числа Фруда от геометрических характеристик циркуляционной области

Зависимость горизонтального размера области циркуляции от плотностного числа Фруда $R_x/H = f(Fr_p)$ может быть аппроксимирована уравнением вида

$$\frac{R_x}{H} = 0,3523 \ln(\text{Fr}_p) + 1,6635, \quad (13)$$

степень достоверности которого определяется коэффициентом детерминации R^2 (см. рис. 4).

Из зависимости (13) следует, что начало формирования циркуляционных областей в диапазоне рассматриваемых глубин происходит при значениях плотностного числа Фруда $\text{Fr}_p < 1$, при этом своего максимального размера области циркуляции достигают при $\text{Fr}_p > 40$.

Учитывая достоверность выражения (13), с практической точки зрения оптимальным диапазоном значений плотностного числа Фруда при организации выпусков очищенных стоков может быть обозначен диапазон $\text{Fr}_p < 10$ (см. рис. 4). Подстановка известных значений плотности морской среды и скоростей истечения из оголовка выпуска в зависимость (11), при принятом ограничении, позволит назначить оптимальные режимы сброса и конструкцию сбросного устройства при организации выпусков в морские акватории, покрытые льдом.

Верификация полученных результатов численного моделирования проводилась сопоставлением с данными физического эксперимента, проведенного в лаборатории гидравлики Дальневосточного политехнического института при изучении поведения струй в сносящем потоке [8], в котором авторы обозначают резкое увеличение тенденция струи к образованию радиальных потоков и циркуляционных зон при значениях чисел $\text{Fr}_p < 7$.

Заключение

Сопоставление результатов численных экспериментов с результатами физических экспериментов других авторов показало, что модели вычислительной гидродинамики дают достаточно точную картину разбавления сточных вод при их выпуске в морские акватории в периоды ледостава и могут с успехом применяться для изучения указанного процесса, однако нельзя отрицать и необходимость дальнейших исследований по корректному заданию условий однозначности.

Список литературы

1. Dispersal and dilution of wastewater from an ocean outfall at Davis Station, Antarctica, and resulting environmental contamination / J. S. Stark, P. Bridgen, G. Dunshea, B. Galton-Fenzi, J. Hunter, G. Johnstone, C. King, R. Leeming, A. Palmer, J. Smith, I. Snape, S. Stark, M. Riddle // *Chemosphere*. – 2016. – Vol. 152. – P. 142–157. doi: 10.1016/j.chemosphere.2016.02.053
2. Field Techniques in Sea-Ice Research / H. Eicken, B. A. Bluhm, R. E. Collins [et al.] // In book: *Cold Regions Science and Marine Technology, Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)* [Ed. H. Shen], Developed under the Auspices of the UNESCO, Eolss Publishers, Paris, France, 2014. – URL : <http://www.eolss.net> (дата обращения: 28.11.2025).

3. Влияние толщины, состояния поверхности льда и концентрации фитопланктона на подледную освещённость вод залива Петра великого Японского моря по наблюдениям 2010 – 2016 гг. / С. П. Захарков, А. Ю. Лазарюк, Т. Н. Гордейчук, Е. А. Штрайхерт // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. – 2020. – Т. 13, № 2. – С. 5–15.

4. Изменчивость подледных течений в южном Байкале по данным 2012 – 2016 гг. / А. А. Жданов, Р. Ю. Гнатовский, Н. Г. Гранин, В. В. Блинов, И. А. Асламов, В. В. Козлов // *Водные ресурсы*. – 2017. – Т. 44, № 3. – С. 311–321.

5. Подледное цветение фитопланктона в Можайском водохранилище / О. Н. Ерина, В. В. Пуклаков, Д. И. Соколов, А. В. Гончаров // *Экологический сборник 7: Труды молодых ученых. Всероссийская (с международным участием) молодежная научная конференция*. – 2019. – № 1. – URL : <https://cyberleninka.ru/article/n/podlednoe-tsveteniiefitoplanktona-v-mozhayskom-vodohranilische> (дата обращения: 07.06.2024)

6. Семкин, П. Ю. Гипоксия эстуариев залива Петра Великого : дис. ... канд. географ. наук : 25.00.28 / Семкин Павел Юрьевич. – Владивосток, 2018. – 140 с.

7. Теория турбулентных струй / Г. Н. Абрамович, Т. А. Гиршович, С. Ю. Крашенинников [и др.] ; под ред. Г. Н. Абрамовича. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Наука, 1984. – 716 с.

8. Земляная, Н. В. Обеспечение экологической безопасности морских акваторий при градостроительном проектировании : дис. ... д-ра техн. наук : 03.00.16. – Владивосток, 2003. – 322 с.

9. Михалев, М. А. Физическое моделирование гидравлических явлений : учеб. пособие / М. А. Михалев. – Санкт-Петербург : Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – 443 с.

10. Лапшев, Н. Н. Гидравлическое моделирование : учеб. пособие / Н. Н. Лапшев. – Ленинград : ЛИСИ, 1980. – 71 с.

11. Рекомендации по расчету рассеивающих выпусков сточных вод в реки и водоемы. – Москва : ВНИИ «Водгео», 1977. – 64 с.

12. Рекомендации по размещению и проектированию рассеивающих выпусков сточных вод / Гидрологический институт Госкомгидромета (ГГИ). – Москва : Стройиздат, 1981. – 225 с.

References

1. Stark J.S., Bridgen P., Dunshea G., Galton-Fenzi B., Hunter J., Johnstone G., King C., Leeming R., Palmer A., Smith J., Snape I., Stark S., Riddle M. Dispersal and dilution of wastewater from an ocean outfall at Davis Station, Antarctica, and resulting environmental contamination, *Chemosphere*, 2016, vol. 152, pp. 142-157. doi: 10.1016/j.chemosphere.2016.02.053

2. Eicken H., Bluhm B.A., Collins R.E. [et al.] Field Techniques in Sea-Ice Research, In book: *Cold Regions Science and Marine Technology, Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)* [Ed. H. Shen], Developed under the Auspices of the UNESCO, Eolss Publishers, Paris, France, 2014. available at: <http://www.eolss.net> (accessed 28 November 2025).

3. Zakharkov S.P., Lazaryuk A.Yu., Gordeychuk T.N., Streichert E.A. [Influence of thickness, condition of the ice surface and concentration of phytoplankton on the subglacial illumination of the waters of Peter the Great Bay of the Sea of Japan according to observations of 2010-2016], *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika* [Fundamental and Applied Hydrophysics], 2020, vol. 13, no. 2, pp. 5-15 (In Russ., abstract in Eng.)

4. Zhdanov A.A., Gnatovsky R.Yu., Granin N.G., Blinov V.V., Aslamov I.A., Kozlov V.V. [Variability of under-ice currents in southern Baikal according to data from 2012–2016], *Vodnyye resursy* [Water Resources], 2017, vol. 44, no. 3, pp. 311–321 (In Russ., abstract in Eng.)
5. Erin O.N., Puklakov V.V., Sokolov D.I., Goncharov A.V. [Subglacial phytoplankton blooming in Mozhaisk reservoir], [Ecological collection 7: Works of young scientists. All-Russian (with international participation) youth Scientific Conference], 2019, no. 1, available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/podlednoe-tsveteniefitoplanktona-v-mozhayskom-vodohranilische> (accessed 06 July 2024).
6. Semkin P.Yu. *PhD of Candidate's thesis (Geograf.)*, Vladivostok, 2018, 140 p. (In Russ.)
7. Abramovich G.N. (Ed.), Girshovich T.A., Krashennnikov S.Yu. [et al.], *Teoriya turbulentnykh struy* [Theory of Turbulent Jets], Moscow: Nauk, 1984, 716 p. (In Russ.)
8. Zemlyanaya N.V. *PhD of Doctor's thesis (Engineering)*, Vladivostok, 2003, 322 p. (In Russ.)
9. Mikhalev M.A. *Fizicheskoye modelirovaniye gidravlicheskiykh yavleniy: ucheb. posobiye* [Physical modeling of hydraulic phenomena], St. Petersburg: Polytechnic Publishing House, University, 2010, 443 p. (In Russ.)
10. Lapshev N.N. *Gidravlicheskoye modelirovaniye: ucheb. posobiye* [Hydraulic modeling], Leningrad: LISI, 1980, 71 p. (In Russ.)
11. *Rekomendatsii po raschetu rasseivayushchikh vypuskov stochnykh vod v reki i vodoyemy* [Recommendations for Calculating Dispersive Wastewater Discharges into Rivers and Reservoirs], Moscow: VNI Vodgeo, 1977, 64 p. (In Russ.)
12. *Rekomendatsii po razmeshcheniyu i proyektirovaniyu rasseivayushchikh vypuskov stochnykh vod* [Recommendations on the placement and design of dissipating wastewater discharges], Hydrological Institute of the State Committee for Hydrometeorology (GGI), Stroyizdat, 1981, 225 p. (In Russ.)

Application of Computational Hydrodynamics Models for Studying Deepwater Discharges of Treated Wastewater in Marine Water Areas During Ice-Covered Periods

© S. A. Bezborodov¹✉, E. V. Levkina¹

¹ Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation

✉ bezborodov.sa@dvfu.ru

Keywords: wastewater discharge; ice cover; marine water areas.

Abstract: Results of applying computational hydrodynamics models to solve applied problems related to determining the most favorable regimes for discharging treated wastewater into marine water areas during ice-covered periods are presented. Based on the modeling results of currents in the vicinity of the deepwater discharge, a calculated dependence was obtained, which allows establishing optimal characteristics of discharge devices and discharge regimes, thereby minimizing negative impacts on the marine environment at the discharge site.

Сведения об авторах

Безбородов Сергей Александрович – старший преподаватель инженерно-строительного департамента, ФГБОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток, Российская Федерация; ORCID 0009-0003-6003-4333; e-mail: bezborodov.sa@dvfu.ru

Левкина Елена Владимировна – кандидат экономических наук, доцент, начальник отдела по работе с диссертационными советами, ФГБОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток, Российская Федерация; ORCID 0000-0001-7764-251X; e-mail: levkina.ev@dvfu.ru

About the author

Sergey A. Bezborodov – Senior Lecturer of the Department of Civil Engineering, Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation; ORCID 0009-0003-6003-4333; e-mail: bezborodov.sa@dvfu.ru

Elena V. Levkina – Cand. Sc. (Economics), Associate Professor, Head of the Department for Work with Dissertation Councils, Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation; ORCID 0000-0001-7764-251X; e-mail: levkina.ev@dvfu.ru



© Безбородов С. А., Левкина Е. В., 2026. Данная статья находится в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии Creative Commons Attribution (CC BY) <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>
