

УДК 004.942

DOI: 10.37890/jwt.vi86.672

Оценка влияния работы гребных винтов и габаритов судоходного канала на размыв дна по результатам математического моделирования гидравлики потока

С.С. Герасимов

ORCID: 0009-0008-6699-4243

А.Н. Ситнов

*Волжский государственный университет водного транспорта,
г. Нижний Новгород, Россия.*

Аннотация: Единая глубоководная система (ЕГС), включает в себя крупные судоходные реки и каналы, часть из которых пересекают магистральные трубопроводы. Последние, как показывает практика, зачастую имеют небольшую глубину заложения, что может при эксплуатации под действием ряда факторов приводить к возникновению отклонений их плано-высотного положения. В связи с зарегулированностью отдельных судоходных каналов, которое сопровождается снижением скорости естественного течения, основными факторами, влияющими на размыв дна канала, являются последствия движения судов. Помимо скорости судна, на донную эрозию оказывает влияние стеснение площади живого сечения канала по ширине и глубине и работа гребных винтов. Оценить влияние обоих факторов на изменение интенсивности донной эрозии в канале можно с помощью выполнения математического моделирования. В данной статье представлены результаты математического моделирования движения судна проекта 507Г-020-012 по каналу и дана оценка влияния исследуемых факторов на размыв дна.

Ключевые слова: безопасность судоходства, математическое моделирование, вычислительная гидродинамика, судоходный канал

Assessing the impact of propeller operation and the dimensions of the shipping channel on bottom erosion based on the results of mathematical modeling of flow hydraulics

Sergey S. Gerasimov

ORCID: 0009-0008-6699-4243

Aleksandr N. Sitnov

Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract: The Unified Deepwater System (UDS) includes major shipping rivers and canals, some of which are crossed by main pipelines. The latter, as practice shows, are often shallow, which, during operation, can lead to deviations in their planned and vertical positions under the influence of a number of factors. Due to the regulation of individual shipping channels, which is accompanied by a decrease in the natural flow velocity, the main factors influencing channel bottom erosion are the effects of vessel movement. In addition to vessel speed, bottom erosion is affected by the narrowness and depth of the channel's cross-sectional area and the operation of propellers. The influence of both factors on changes in the intensity of bottom erosion in the channel can be assessed using mathematical modeling. This article presents the results of mathematical modeling of the movement of a Project 507G-020-012 vessel through the canal and provides an assessment of the influence of the studied factors on bottom erosion.

Keywords: shipping safety, mathematical modeling, computational fluid dynamics, shipping channel

Введение

Судоходство на внутренних водных путях (ВВП), в частности – на судоходных каналах, оказывает активное влияние на русловые переформирования за счет возникновения дополнительных гидродинамических процессов под днищем судна и в прилегающих областях [1]. При отсутствии на ряде каналов естественного течения, в связи с их зарегулированностью, интенсивность гидродинамических процессов зависит, в том числе, от степени стеснения площади живого сечения канала и работы судовых движителей. Это имеет важное значение для обеспечения устойчивости подводных переходов магистральных трубопроводов от размыва дна. Какое влияние оказывают оба фактора на гидродинамические процессы вблизи дна канала можно выявить с использованием математического моделирования.

Материалы и методы

Для определения степени влияния работы судовых движителей и площади живого сечения канала на гидродинамические процессы вблизи дна канала была разработана математическая модель, которая включает в себя судно и участок судоходного канала. Судно состоит из корпуса и двух движителей (гребных винтов) с внешним диаметром 1,8 м. Участок канала протяженностью 1970 м, шириной B_k 40,1 м, 50,1 м и 70,1 м, глубиной H_k 4,5 м. Для описания турбулентных процессов, возникающих в канале при движении судна и работе гребных винтов, была выбрана модель турбулентности $K - \epsilon$ [2][3][4][5].

В качестве расчетного используется судно проекта 507Г-020-012, основные характеристики которого приведены в таблице 1.

Таблица 1

Характеристики судна проекта 507Г-020-012

Параметр	Значение
Длина, м	135,0
Ширина, м	16,5
Осадка, м	3,5
Водоизмещение, т	6710
Количество гребных винтов, шт	2
Диаметр гребного винта, м	1,8

Была разработана геометрия расчетного судна, представленная его общей конфигурацией и основными элементами в виде кормовой и носовой частей и гребных винтов. Для каждого элемента математической модели сгенерирована объёмная расчетная сетка, характеризующаяся количеством и формой ячеек. Геометрия расчетного судна представлена на рисунке 1.



Рис. 1. Общая конфигурация судна

Для математического моделирования движения судна использована зависимость скорости хода судна на тихой воде и частоты вращения его движителей. Такая взаимосвязь имеет вид кривой, которая строится на основе результатов тяговых расчетов. Для судна проекта 507Г-020-012 такая зависимость представлена на рисунке 2.

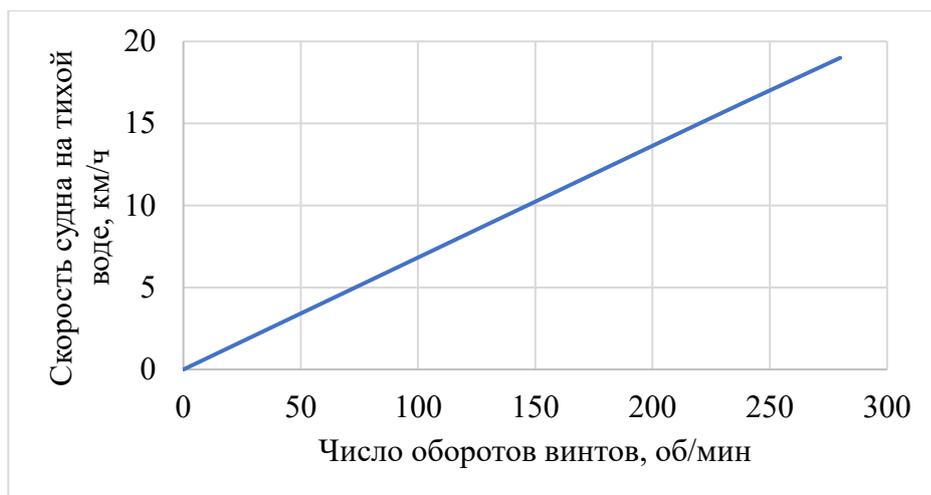


Рис. 2. Зависимость скорости судна от числа оборотов движителей

Для моделирования принята скорость движения судна $V_c = 10,0$ км/ч, которая достигается, в соответствии с представленным выше графиком, при вращении обоих движителей с частотой $\omega_b = 147,14$ об/мин.

Математическая модель рассчитана в четырех вариациях: М1, М2, М3 и М4, характеристики которых приведены в таблице 2 и на рисунке 3.

Таблица 2

Основные характеристики вариаций математической модели

№ вариации	Скорость судна, км/ч	Скорость вращения винтов, об/мин	Площадь поперечного сечения канала, м ²	Ширина канала, м	Глубина канала, м	Моделируемое время движения судна, с
М1	10	0	225,45	50,1	4,5	600
М2	10	147,14	225,45	50,1	4,5	600
М3	10	147,14	315,45	70,1	4,5	600
М4	10	147,14	180,45	40,1	4,5	600

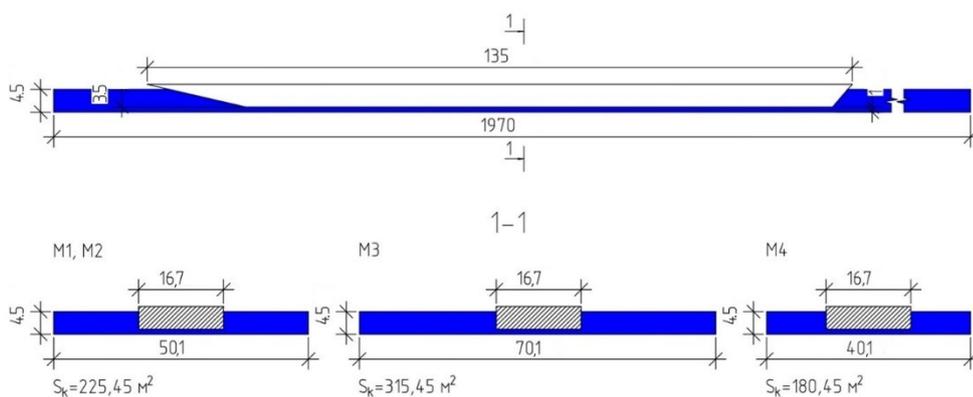


Рис. 3. Геометрические характеристики вариаций М1-М4

Примечание: размеры приведены в метрах

Целью математического моделирования явилось исследование гидродинамических процессов, возникающих вблизи дна канала при прохождении судна и оценка влияния на них таких факторов, как работа гребных винтов с частотой вращения ω_v , об/мин, площадь живого сечения S_k , м² и коэффициент стеснения живого сечения канала Ω . Коэффициент стеснения живого сечения канала определяется по следующей формуле:

$$\Omega = \frac{S_c}{S_k},$$

где S_k – площадь живого сечения канала, м²;

S_c – площадь живого сечения канала, перекрываемая корпусом судна, м².

Для исследования гидродинамических процессов, возникающих вблизи дна канала, был создан контрольный индикатор – плоское сечение, расположенное на расстоянии 0,1 м от дна канала.

В процессе моделирования фиксировалась максимальная скорость движения воды V_{max} в заданном контрольном индикаторе, что позволит сделать общие выводы о влиянии работы движителей и площади живого сечения канала на гидродинамические процессы, возникающие вблизи дна и его размыв.

Результаты

По результатам проведения математического моделирования построены графики изменения максимальной скорости течения вблизи дна канала при движении судна с вращением и без вращения движителей, а также при движении судна на канале разной ширины и глубины. Дополнительно на графики нанесены осредненные значения максимальной скорости течения вблизи дна канала. Графики приведены на рисунке 4.

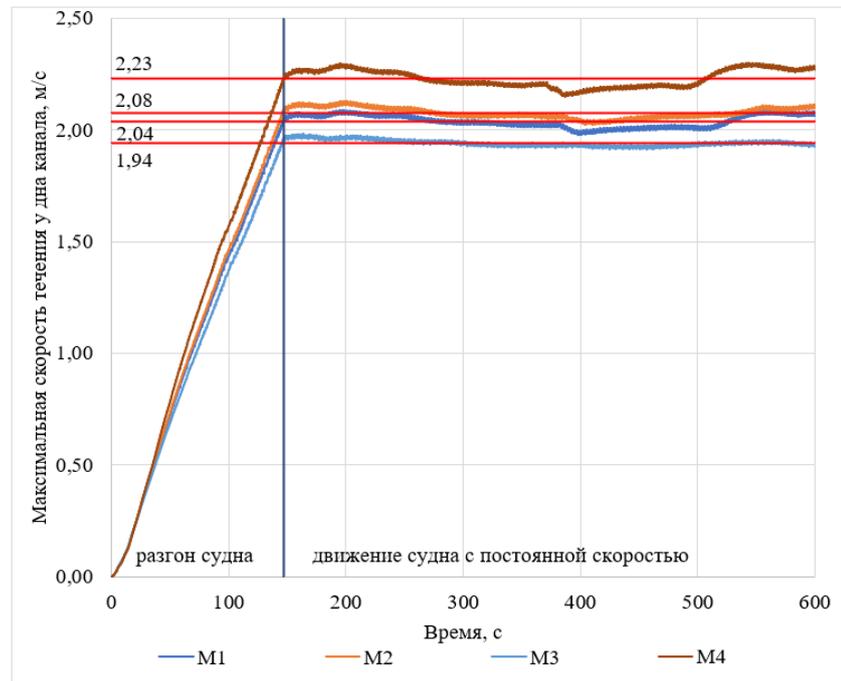


Рис. 4. Графики изменения максимальной скорости течения вблизи дна канала

Для наглядности, мониторинг изменения скалярного скоростного поля потока в процессе моделирования осуществляется с помощью специальных сцен, одна из которых представлена на рисунке 5 в разном масштабе представления.

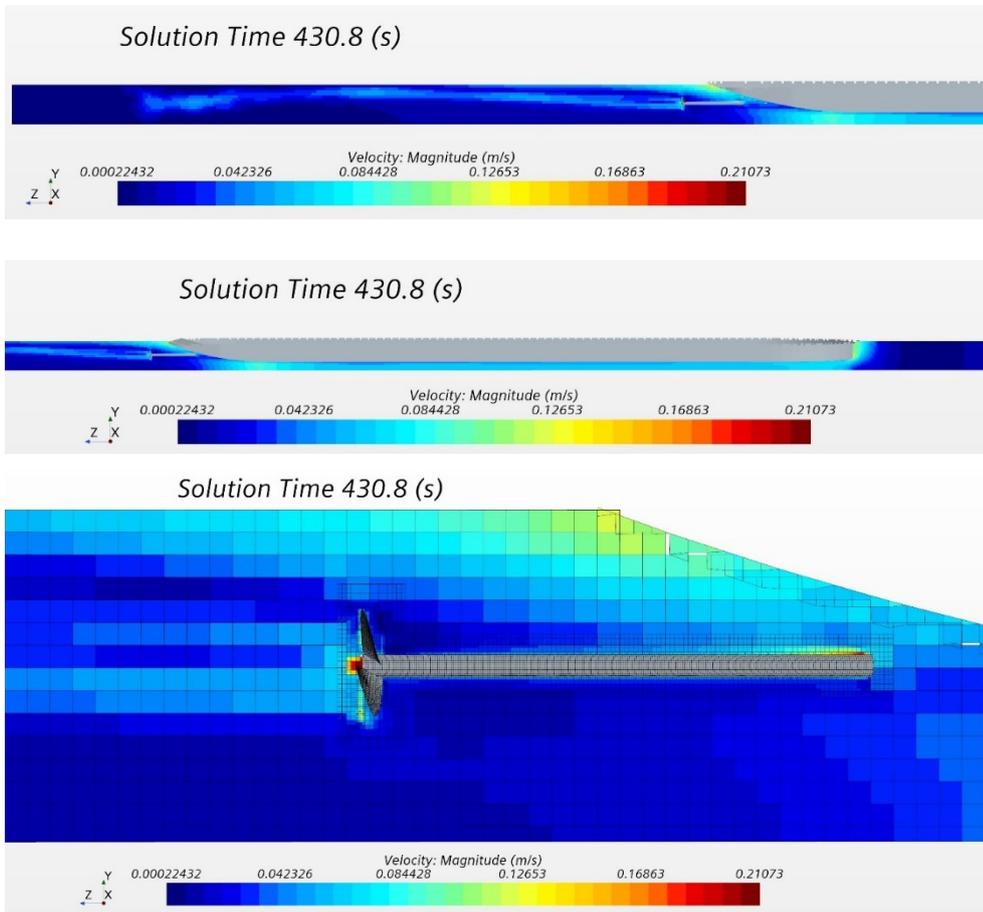


Рис. 5. Скалярное скоростное поле потока на момент времени 430,8 с

Обработка графиков позволила получить осредненные значения максимальной скорости течения вблизи дна канала. Результаты представлены на рисунке 6 и в таблице 3.

Таблица 3

Результаты математического моделирования

№ вариации	M1	M2	M3	M4
Максимальная скорость течения у дна канала, м/с	2,04	2,08	1,94	2,23
Коэффициент стеснения живого сечения канала	0,26	0,26	0,19	0,32

По полученным значениям были построены графики зависимости максимальной скорости течения вблизи дна канала V_{max} от площади живого сечения канала S_k и коэффициента стеснения живого сечения Ω (рисунок 7).

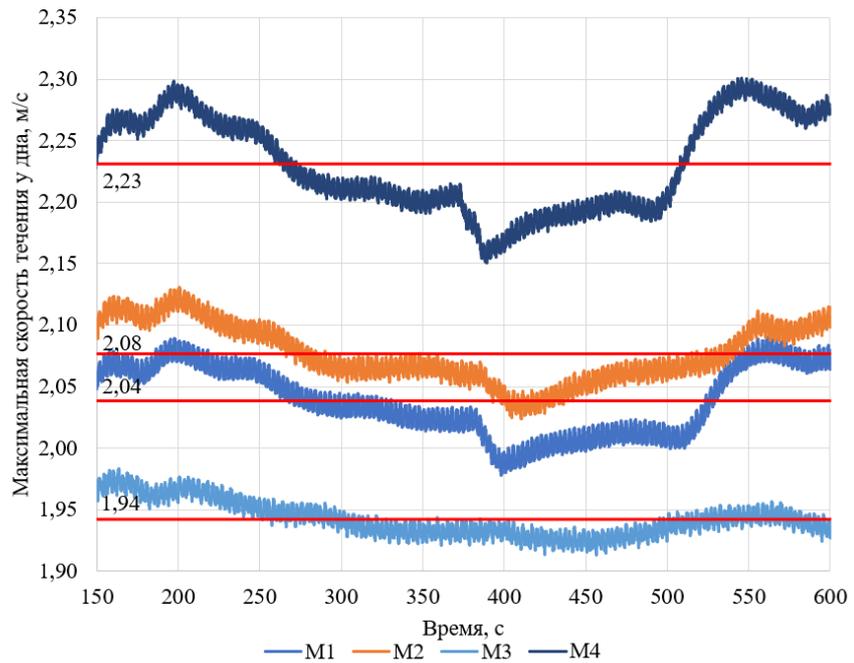


Рис. 6. Мгновенные и осредненные значения максимальной скорости течения вблизи дна канала

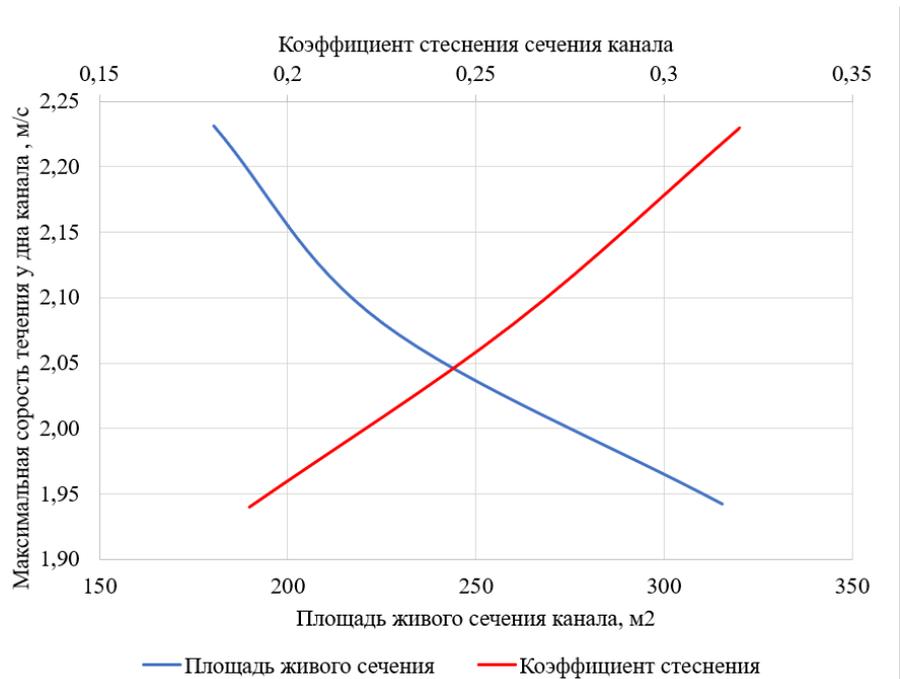


Рис. 7. График зависимости максимальной скорости течения вблизи дна канала от площади живого сечения канала и коэффициента стеснения

Вместе с тем, вопрос влияния стеснения площади живого сечения канала на гидродинамические процессы вблизи дна требует более детального рассмотрения. Так как площадь поперечного сечения канала прямоугольной формы определяется

произведением ширины на глубину, целесообразно исследовать влияние каждого параметра на величину скорости течения у дна канала. Для этих целей разработаны и рассчитаны три вариации математической модели, описывающей движение судна по каналу со скоростью 10 км/ч. Вариации отличаются между собой параметрами канала. Характеристики вариаций модели и результаты математического моделирования представлены в таблице 4.

Таблица 4

Результаты эксперимента

№ вариации	Ширина канала, м	Глубина канала, м	Площадь поперечного сечения, м ²	Коэффициент стеснения	Максимальная скорость течения у дна канала, м/с
1	50,1	4,5	225,45	0,26	2,08
2	50,1	5,0	250,50	0,23	1,52
3	70,1	4,5	315,45	0,19	1,94

По результатам математического моделирования получено, что:

- при увеличении ширины канала на 20 м (на 40%), при одинаковой глубине, максимальная скорость течения вблизи дна уменьшается на 6,73%;
- при увеличении глубины канала на 0,5 м (на 11%), при одинаковой ширине, максимальная скорость течения вблизи дна канала уменьшается на 26,92%.

Адекватность результатов моделирования была подтверждена с помощью математических критериев физичности модели, в частности был использован критерий Куранта-Фридриха-Леви (CFL) [6], значение которого на протяжении всего расчета модели не превышало допустимой максимальной величины, а в отдельных областях модели его значение достигало единицы, что является идеальным [7], [8].

Заключение

По результатам математического моделирования гидравлики потока сделаны следующие выводы:

При прохождении судна проекта 507Г-020-012 по каналу, имеющему ширину 50,1 м и глубину 4,5 м, с постоянной скоростью 10 км/ч, работа двигателей оказывает незначительное влияние на гидродинамические процессы, возникающие вблизи дна канала. Максимальная скорость течения, возникающая при прохождении по каналу судна с работающими двигателями, оказалась всего лишь на $\approx 2\%$ больше скорости течения, возникающей при прохождении судна с покоящимися двигателями. Отсюда следует, что наибольшее влияние на гидродинамические процессы, возникающие вблизи дна канала при прохождении по нему судов, оказывает стеснение его живого сечения.

Было установлено, что наибольшее влияние на скорость течения вблизи дна оказывает изменение глубины канала, нежели ширины, поскольку:

- при увеличении ширины канала на 40%, максимальная скорость течения вблизи дна канала уменьшается на 6,73%;
- при увеличении глубины канала на 11%, максимальная скорость течения вблизи дна канала уменьшается на 26,92%.

Полученные результаты свидетельствуют о необходимости учета стеснения живого сечения канала при исследовании возникающих в нем гидродинамических процессов, влияющих на скоростной режим движения судов и составов и, соответственно, на размыв дна канала.

Список литературы

1. Герасимов, С. С., & Ситнов, А. Н. (2024). Обзор и анализ способов оценки влияния условий эксплуатации подводных переходов магистральных трубопроводов на безопасность судоходства. *Научные проблемы водного транспорта*, (79), 209-218.

2. Герасимов, С. С. (2025). Выбор модели турбулентности при математическом моделировании работы гребного винта. Научные проблемы водного транспорта, (83), 205-211. <https://doi.org/10.37890/jwt.vi83.598>
3. Yakhot, V., Orszag, S.A., Thangam, S., Gatski, T.B. and Speziale, C.G. 1992, ‘Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique’, Physics of Fluids A, Vol. 4, No.7 DOI:10.1063/1.858424.
4. Durbin, P.A. 1991. “Near-wall turbulence closure modeling without damping functions, Theoretical and Computational Fluid Dynamics, 3, pp. 1-13.
5. Poinso, T. J. and Lele, S.K., 1992. “Boundary Conditions for Direct Simulations of Compressible Viscous Flows,” J. of Comp. Physics, 101, pp. 104-129.
6. R. Courant, K. Friedrichs, H. Lewy. Über die partiellen Differenzgleichungen der mathematischen Physik // Mathematische Annalen. — 1928. — Т. 100, № 1. — С. 32—74.
7. Patankar S. Numerical methods for solving problems of heat transfer and fluid dynamics / Per. from English. – М.: Energoatomizdat, 1984. – 152 p.
8. An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method (2nd Edition), H. Versteeg, W. Malalasekera; Pearson Education Limited; 2007; ISBN 0131274988.

References

1. Gerasimov, S. S., & Sitnov, A. N. (2024). Review and analysis of methods for assessing the impact of operating conditions of underwater crossings of main pipelines on the safety of navigation. Scientific Problems of Water Transport, (79), 209-218. <https://doi.org/10.37890/jwt.vi79.495>
2. Gerasimov, S. S. (2025). Selection of a turbulence model in mathematical modeling of propeller operation. Scientific Problems of Water Transport, (83), 205-211. <https://doi.org/10.37890/jwt.vi83.598>
3. Yakhot, V., Orszag, S.A., Thangam, S., Gatski, T.B. and Speziale, C.G. 1992, ‘Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique’, Physics of Fluids A, Vol. 4, No.7 DOI:10.1063/1.858424.
4. Durbin, P.A. 1991. “Near-wall turbulence closure modeling without damping functions”, Theoretical and Computational Fluid Dynamics, 3, pp. 1-13.
5. Poinso, T. J. and Lele, S.K., 1992. “Boundary Conditions for Direct Simulations of Compressible Viscous Flows,” J. of Comp. Physics, 101, pp. 104-129.
6. R. Courant, K. Friedrichs, H. Lewy. Über die partiellen Differenzgleichungen der mathematischen Physik // Mathematische Annalen. — 1928. — Т. 100, № 1. — С. 32—74.
7. Patankar S. Numerical methods for solving problems of heat transfer and fluid dynamics / Per. from English. – М.: Energoatomizdat, 1984. – 152 p.
8. An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method (2nd Edition), H. Versteeg, W. Malalasekera; Pearson Education Limited; 2007; ISBN 0131274988.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT AUTHORS

Герасимов Сергей Сергеевич, аспирант кафедры водных путей и гидротехнических сооружений, «Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»», 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: Gerasimov.s.sergeevich@mail.ru

Sergey S. Gerasimov, postgraduate student of the Department of Waterways and Hydraulic Structures, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951

Ситнов Александр Николаевич, профессор, д.т.н., зав. кафедрой водных путей и гидротехнических сооружений «Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»», 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: stnv1952@rambler.ru

Aleksandr N. Sitnov, professor, doctor of technical sciences, head of the Department of waterways and hydraulic structures, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951

Статья поступила в редакцию 01.11.2025; принята к публикации 22.01.2026; опубликована онлайн 20.03.2026. Received 01.11.2025; published online 20.03.2026.