

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, ВОДНЫЕ ПУТИ, СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

WATER TRANSPORT OPERATION, WATERWAYS COMMUNICATONS AND HYDROGRAPHY

УДК 004.942

DOI: 10.37890/jwt.vi84.626

Исследование влияния скорости судна на русловой процесс в районе оголенного трубопровода 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: в настоящее время на территории Российской Федерации функционирует единая глубоководная система (ЕГС), включающая в себя большие судоходные реки и каналы. Часть из них пересекают магистральные трубопроводы, которые, как показывает практика, зачастую имеют небольшую глубину заложения, что впоследствии приводит к возникновению отклонений планово-высотного положения. Помимо естественных русловых переформирований, дополнительно на русловую эрозию оказывает влияние движущееся судно за счет стеснения площади живого сечения русла и работы гребных винтов. Оценить влияние на изменение интенсивности русловой эрозии вблизи оголенного МТ можно с помощью выполнения математического моделирования. В данной статье представлены результаты математического моделирования движения судна проекта 507Г-020-012 по участку реки, на котором располагается оголенный магистральный трубопровод, при разных скоростях собственного движения судна и течения реки.

Ключевые слова: безопасность судоходства, математическое моделирование, вычислительная гидродинамика, магистральный трубопровод

Study of the influence of vessel speed on the channel process in the area of an exposed pipeline 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: currently, the territory of the Russian Federation operates a single deep-water system (SDWS), which includes large shipping rivers and canals. Some of them are crossed by trunk pipelines, which, as practice shows, often have a shallow depth, which subsequently leads to deviations in the planned-altitude position. In addition to natural channel reformations, channel erosion is additionally affected by a moving vessel due to the constriction of the cross-sectional area of the channel and the operation of propellers. It is possible to assess the impact on the change in the intensity of channel erosion near an exposed MT by performing mathematical modeling. This article presents the results of

mathematical modeling of the movement of a vessel of project 507G-020-012 along a section of the river on which an exposed trunk pipeline is located, at different speeds of the vessel's own motion and the river current.

Keywords: shipping safety, mathematical modeling, computational fluid dynamics, main pipeline

Введение

Судоходство на внутренних водных путях (ВВП) оказывает дополнительное влияние на русловые переформирования за счет возникновения гидродинамических процессов под днищем судна и в прилежащих областях [1], [2]. Интенсивность таких процессов зависит главным образом от собственной скорости судна в спокойной воде, и направления его движения относительно течения реки. Количественно и качественно определить характер взаимосвязи между скоростью движения судна и скоростью течения вблизи оголенного трубопровода для последующего определения безопасной скорости движения судна можно с помощью выполнения математического моделирования гидравлики потока. В данной статье описана исследуемая математическая модель, а также представлены полученные результаты и сделаны общие выводы.

Материалы и методы

Для определения безопасного скоростного режима движения судов и составов на участке с оголенным магистральным трубопроводом была разработана математическая модель, которая принципиально состоит из трёх элементов: судно, трубопровод и физический континуум. Судно представлено корпусом и двумя движителями

(гребными винтами) диаметром 1,8 м. Физический континуум включает участок реки протяженностью 500 м, шириной 50 м, глубиной 4,5, где имеется углубление, на котором расположен оголенный магистральный трубопровод диаметром 1 м.

В качестве расчетного судна использовался проект 507Г-020-012[3], 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

Геометрия расчетного судна представлена на рисунках 1-4.

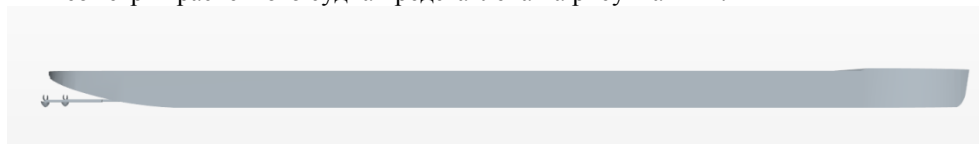


Рис. 1. Общая конфигурация судна

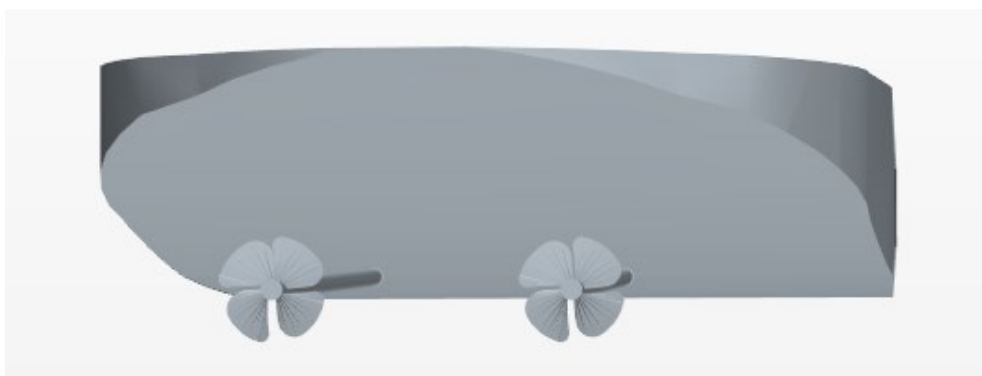


Рис. 2. Гребные винты в корме судна

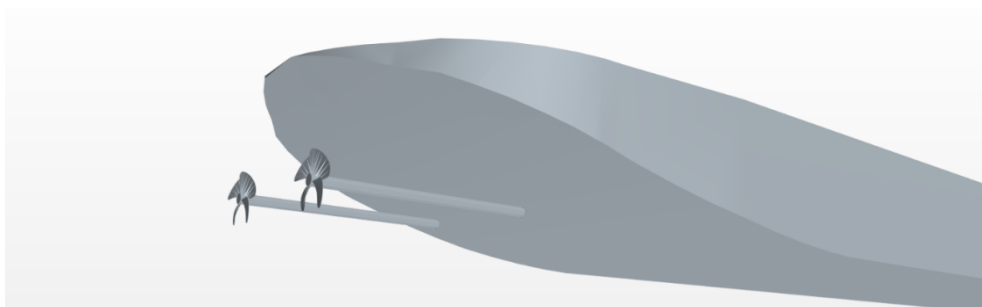


Рис. 3. Корма судна (вид сбоку)

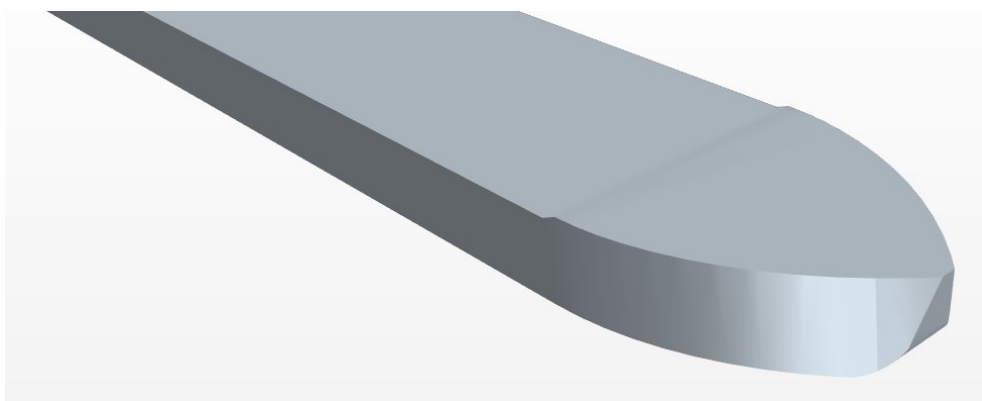


Рис. 4. Носовая часть судна

Для каждого элемента модели была сгенерирована прямоугольная объёмная сетка, которая представлена на рисунках 5-8.

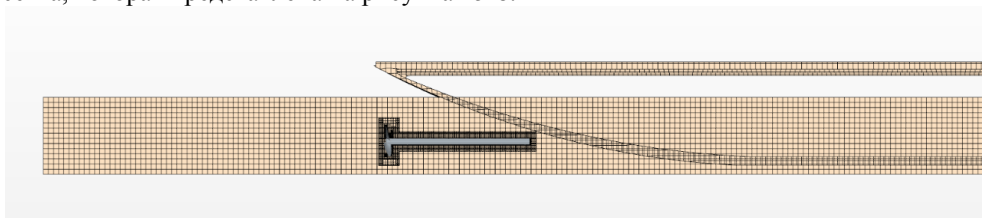


Рис. 5. Объёмная сетка (корма)

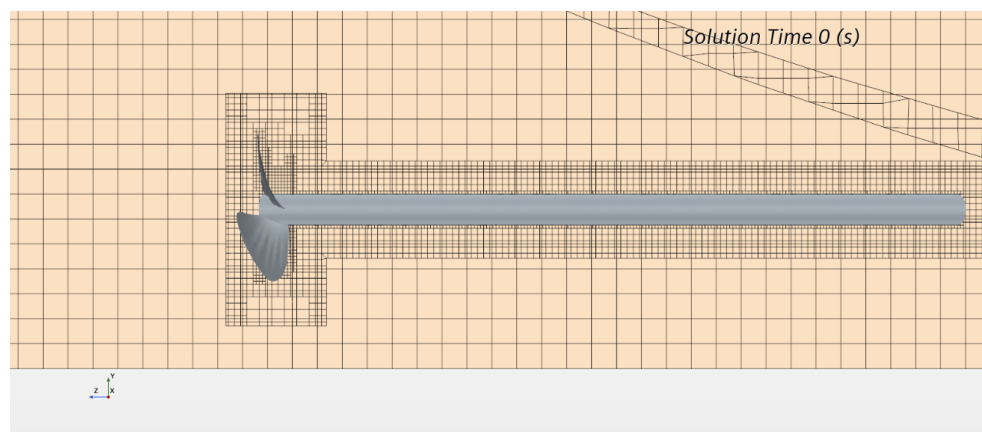


Рис.6. Объемная сетка (гребной винт)

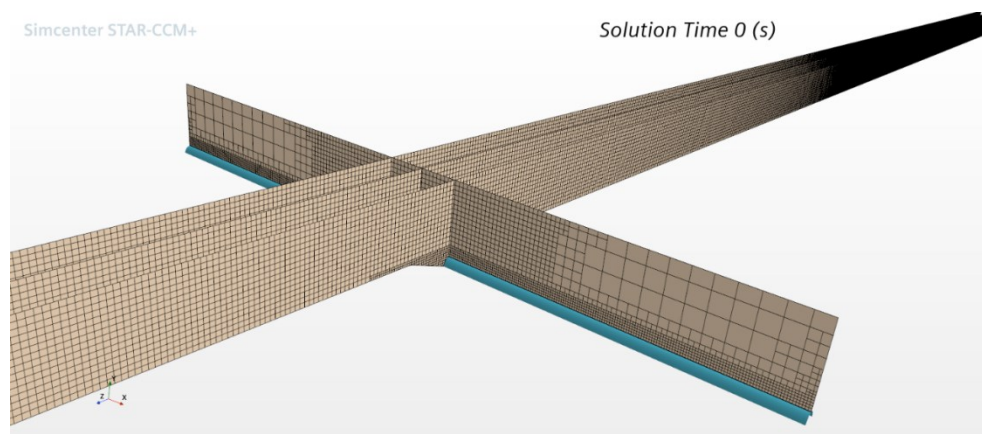


Рис. 7. Объемная сетка (оголенный МТ)

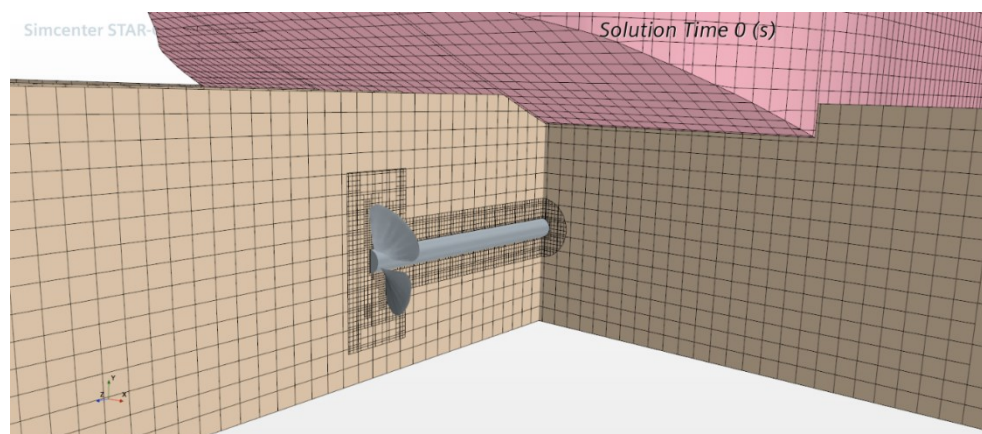


Рис. 8. Объемная сетка (правый гребной винт)

Для моделирования движения судна определена взаимосвязь скорости хода судна и скорости вращения его движителей. Такая взаимосвязь строится на основе результатов тяговых расчетов. Для судна проекта 507Г-020-012 такая зависимость в форме прямой представлена на рисунке 9.

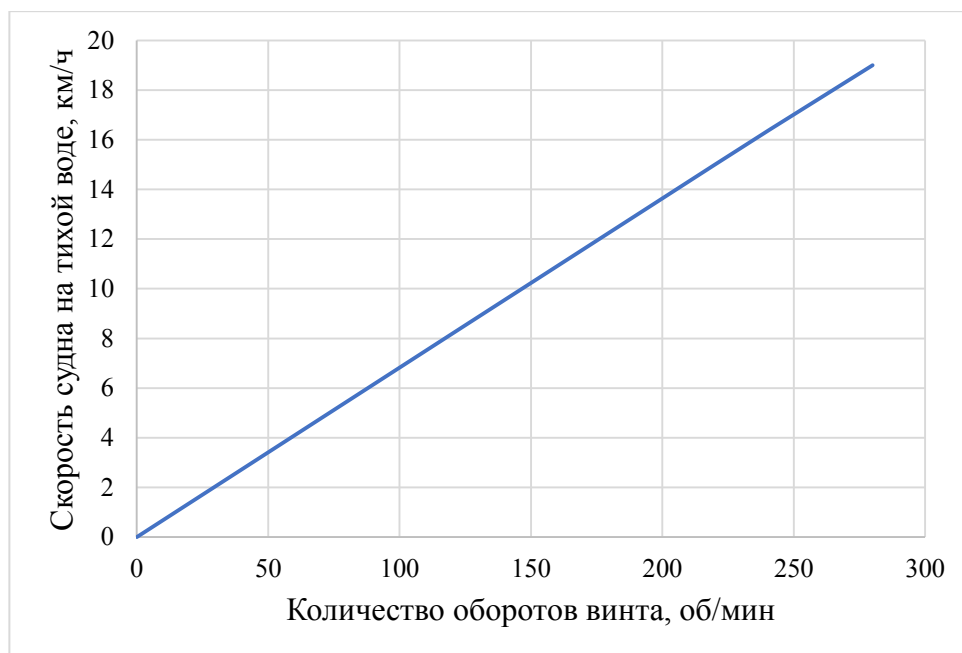


Рис. 9. Зависимость $V_c = f(\omega_v)$

По данному графику были получены значения скорости движения судна при фиксированной скорости вращения гребного винта для разных режимов движения судна: по течению и против. Скорость течения величиной 0,64 м/с принята как средняя скорость течения воды на профиле скорости в естественных условиях в точке 0,6Н, где Н – глубина на моделируемом участке реки. Профиль скорости естественного течения был задан с использованием логарифмической зависимости К.В. Гришанина [4], где поверхностная скорость течения в задаче принята 0,7 м/с.

Полная скорость движения судна (скорость относительно любой неподвижной материальной точки) определяется по формуле:

$$V_n = V_c \pm V_t, \quad (1)$$

где

V_n – скорость движения судна (относительно любой неподвижной точки берега), м/с;

V_c – собственная скорость движения судна на тихой воде, м/с;

V_t – скорость течения, м/с.

Полученные значения скоростей представлены в таблице 2.

Таблица 2

Значения скоростей движения судна при разных режимах его движения

Собственная скорость судна, м/с	Обороты винта		Полная скорость судна, м/с	
	об/мин	рад/с	По течению	Против течения
0,00	0,00	0,00	0,64	-0,64
0,06	2,81	0,29	0,70	-0,58
0,11	5,76	0,60	0,75	-0,53

0,17	8,70	0,91	0,81	-0,47
0,22	11,65	1,22	0,86	-0,42
0,28	14,59	1,53	0,92	-0,36
0,42	21,96	2,30	1,06	-0,22
0,56	29,32	3,07	1,20	-0,08
0,69	36,68	3,84	1,33	0,05
0,83	44,05	4,61	1,47	0,19
0,97	51,41	5,38	1,61	0,33
1,11	58,77	6,15	1,75	0,47
1,25	66,14	6,93	1,89	0,61
1,39	73,50	7,70	2,03	0,75
2,78	147,14	15,41	3,42	2,14
4,17	220,78	23,12	4,81	3,53
5,56	294,42	30,83	6,20	4,92
5,67	300,31	31,45	6,31	5,03

На основе данных, приведенных в таблице 2, разработано и рассчитано несколько вариаций математической модели: М1-М7, каждая из которых имитировала движение судна с заданной скоростью на участке реки, где располагался оголенный магистральный трубопровод [5]. Вариации М1, М2, М3 – это движение судна с разной собственной скоростью по течению; М4, М5 – движение судна с разной собственной скоростью против течения, М6 – естественное течение на участке реки (судно отсутствует); М7 – движение судна по течению без собственной скорости. В данной математической модели для описания турбулентности использовалась модель $k - \epsilon$ [6]. Как сказано выше, цель данного математического моделирования заключается в исследовании гидродинамических процессов, возникающих вблизи оголенного трубопровода при прохождении судов на анализируемом участке. Для исследования было создано несколько контрольных индикаторов – плоских сечений, имеющих нумерацию: Н0, Н1, Н2, Н3, Н4. Сечения расположены в вертикальном направлении в углублении русла на расстоянии 0,2 м между собой. Схема расположения индикаторов и их нумерация представлены на рисунке 10.

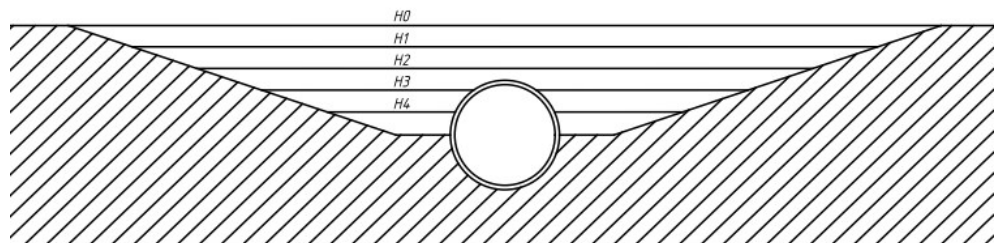


Рис. 10. Схема расположения контрольных индикаторов

В процессе моделирования программа фиксировала максимальную скорость движения воды V_{max} в каждом из контрольных индикаторов. На основе полученных результатов (см. табл. 3) сделаны выводы об изменении скорости движения воды вблизи оголенного трубопровода в процессе прохождения судна.

Результаты

Полученные результаты математического моделирования приведены в таблице 3.

Таблица 3

Результаты математического моделирования

Вариация математической модели	Скорость судна, м/с		Скорость течения реки V_T	Максимальная скорость течения воды в углублении русла V_{max} , м/с				
	Собственная V_c	Полная V_n		H0	H1	H2	H3	H4
M1	0,42	1,06	0,64	0,71	0,70	0,71	0,53	0,37
M2	1,25	1,89	0,64	1,10	0,91	0,88	0,71	0,56
M3	5,67	6,31	0,64	5,89	3,24	3,04	2,91	2,82
M4	0,97	0,33	0,64	1,31	1,06	1,09	0,94	0,70
M5	2,78	2,14	0,64	3,27	2,10	2,19	1,94	1,52
M6	0	0	0,64	0,69	0,55	0,51	0,41	0,28
M7	0	0,64	0,64	0,89	0,71	0,70	0,55	0,37

По полученным значениям построены профили максимальной скорости движения воды в углублении русла для обоих режимов движения судна: по течению и против. Профили представлены на рисунке 11.

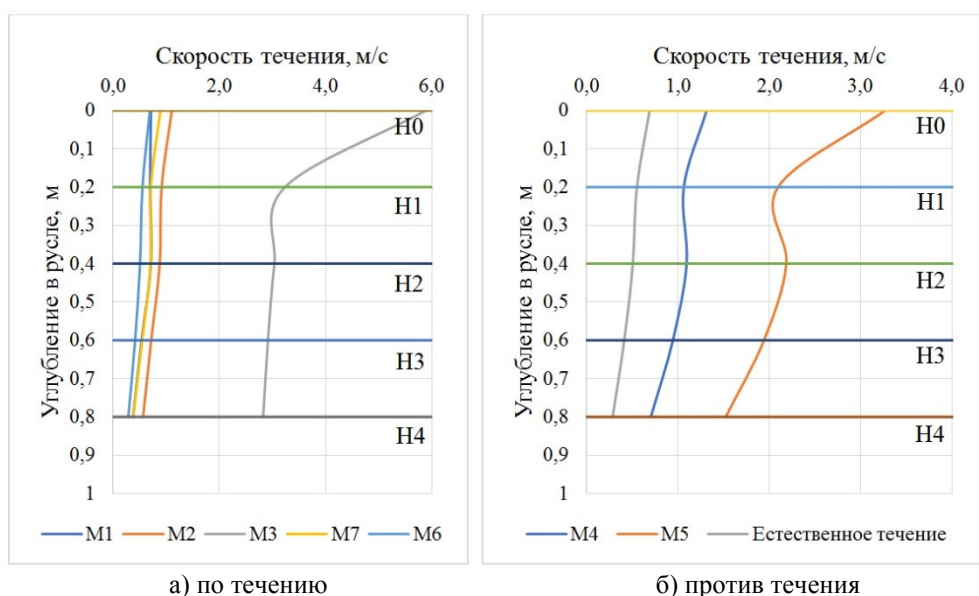


Рис. 11. Профили максимальной скорости течения при движении судна

По полученным значениям были построены кривые зависимости максимальной скорости течения вблизи оголенного трубопровода (на уровне H4) от собственной и полной скорости судна при его движении по течению и против. Кривые представлены на рисунках 12 и 13. Дополнительно на графики нанесены значения допустимых неразрывающих скоростей течения для мелких (0,6 м/с), крупных (0,91 м/с) и среднезернистых (0,72 м/с) песков при глубине потока 4,5 м, которые приведены в ВСН 163-83 «Учет

деформаций речных русел и берегов водоемов в зоне подводных переходов магистральных трубопроводов» [7].

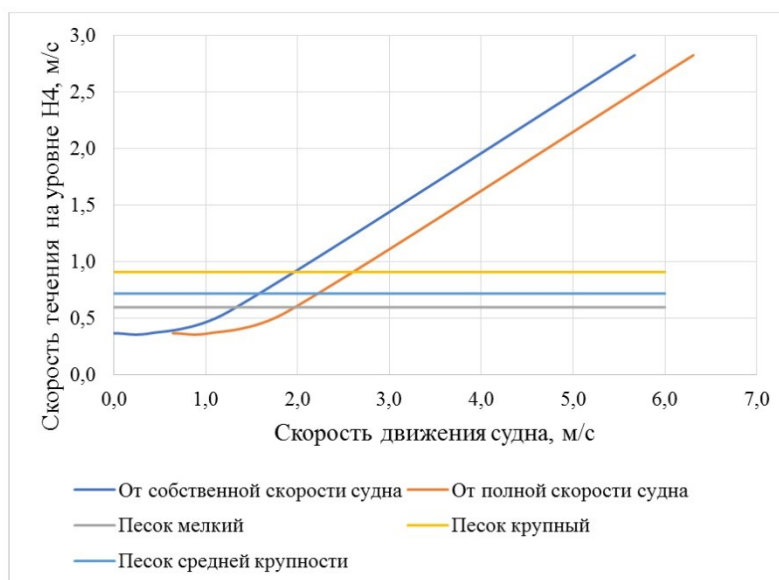


Рис. 12. Зависимость V_{max} от V_c и V_n при движении судна по течению

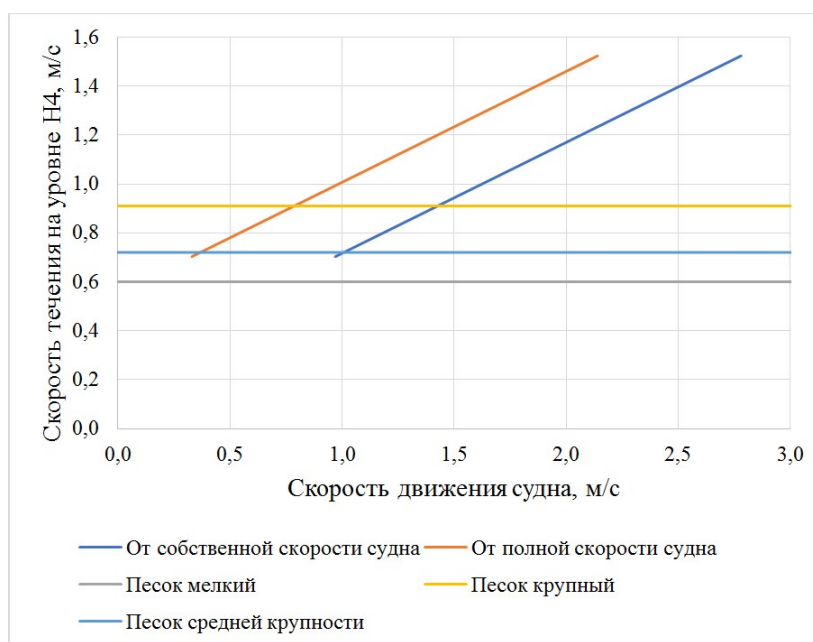


Рис. 13. Зависимость V_{max} от V_c и V_n при движении судна против течения

По полученным кривым были определены максимальные безопасные скорости движения судна, т.е. скорости движения судна, при которых вблизи оголенного трубопровода возникают допустимые неразрывающие скорости движения воды. Эти значения представлены в таблице 4.

Таблица 4

Безопасные скорости движения судна

	Неразмывающая скорость, м/с (глубина потока Н=4,5 м)	Безопасная скорость судна			
		собственная		полная	
		м/с	км/ч	м/с	км/ч
		Песок крупный			
По течению	0,91	1,93	6,95	2,57	9,25
Против течения	0,91	1,43	5,15	0,79	2,84
		Песок средней крупности			
По течению	0,72	1,56	5,62	2,2	7,92
Против течения	0,72	1,01	3,64	0,37	1,33
		Песок мелкий			
По течению	0,6	1,33	4,79	1,97	7,09
Против течения	0,6	0,5	-0,14*	1,8	-0,5*

Примечание: * - отрицательное значение свидетельствует о том, что при любой скорости движения судна максимальная скорость вблизи оголенного трубопровода будет выше, чем допустимая неразмывающая

Адекватность результатов моделирования была подтверждена с помощью математических критериев физичности модели, в частности был использован критерий Куранта-Фридриха-Леви (CFL) [8], значение которого на протяжении всего расчета модели не превышало допустимого значения. В отдельных областях модели значение критерия CFL приближено к идеальному значению (к единице) [9], [10].

Дополнительно в процессе моделирования осуществлялся мониторинг расхода воды на входе в участок и на выходе из него. Разница между этими расходами составляла не более 5-10%, что является допустимым.

Заключение

По результатам математического моделирования гидравлики потока при заданной скорости течения 2,3 км/ч получены следующие результаты:

- 1) при движении судна против течения возникают более интенсивные гидродинамические процессы под днищем судна, в частности, в исследуемом углублении русла по сравнению с движением по течению;
- 2) с точки зрения размыва русла, сложенного преимущественно крупными песками, максимальная безопасная полная скорость судна составляет **9,3 км/ч** при движении по течению и **2,8 км/ч** при движении против. Максимальная безопасная собственная скорость судна на тихой воде составляет **6,95 км/ч** при движении по течению и **5,15 км/ч** при движении против течения.
- 3) с точки зрения размыва русла, сложенного преимущественно песками средней крупности, максимальная безопасная полная скорость судна составляет **7,92 км/ч** при движении по течению и **1,33 км/ч** при движении против. Максимальная безопасная собственная скорость судна на тихой воде составляет **5,62 км/ч** при движении по течению и **3,64 км/ч** при движении против течения.
- 4) с точки зрения размыва русла, сложенного преимущественно мелкими песками, максимальная безопасная полная скорость судна составляет **7,09 км/ч** при движении по течению и **0,5 км/ч** при движении против течения. Максимальная безопасная собственная скорость судна на тихой воде составляет **4,79 км/ч** при движении по течению и **-0,14 км/ч** при движении против. Отрицательные значения свидетельствуют о том, что при любой скорости движения судна скорость вблизи оголенного трубопровода будет выше, чем допустимая

неразрывающаяся.

Как следует из полученных данных, с точки зрения обеспечения сохранности русла в районе расположения оголенного трубопровода, скорость судна при движении против течения должна быть кратно меньше скорости по течению. В дальнейшем, на основе представленных подходов, область исследования будет расширена по диапазону параметров до глубины русла, скорости судна и течения реки.

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. <https://doi.org/10.37890/jwt.vi79.495>
2. Герасимов С.С., Ситнов А.Н. Обзор методов и разработка подходов к исследованию системы «судно-трубопровод» в условиях ненормативного состояния магистрального трубопровода. //Транспорт. Горизонты развития. 2024: Материалы международного научно-практического форума. ФГБОУ ВО «ВГУВТ». – 2024. – URL: http://vf-reka-more.rf/2024/6_4.pdf
3. Динамика русловых потоков [Текст] / К. В. Гришанин. - 2-е изд., перераб. и доп. - Л. : Гидрометеиздат, 1979. - 311 с. - Б. ц.
4. Организация и математическое планирование эксперимента: учебное пособие / Ю.В. Юдин, М.В. Майсурадзе, Ф.В. Водолазский. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018.— 124 с.
5. 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>
6. ВСН 163-83. Учет деформаций речных русел и берегов водоемов в зоне подводных переходов магистральных трубопроводов (нефтегазопроводов)" (утв. Миннефтегазстроем 09.06.1982; Мингазпромом 10.11.1983; Миннефтепромом 16.09.1983; Госкомнефтепродуктом РСФСР 12.08.1982; Госкомгидрометом 19.12.1983).
7. R. Courant, K. Friedrichs, H. Lewy. Über die partiellen Differenzengleichungen der mathematischen Physik // *Mathematische Annalen*. — 1928. — Т. 100, № 1. — С. 32—74.
8. Patankar S. Numerical methods for solving problems of heat transfer and fluid dynamics / Per. from English. – М.: Energoatomizdat, 1984. – 152 p.
9. 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., Sitnov A.N. Review of methods and development of approaches to the study of the "vessel-pipeline" system in the conditions of an abnormal state of the main pipeline. //Transport. Development Horizons. 2024: Materials of the international scientific and practical forum. FGBOU VO "VSUVT". - 2024. - URL: http://vf-reka-more.rf/2024/6_4.pdf
3. Dynamics of channel flows [Text] / K. V. Grishanin. - 2nd ed., revised and enlarged. - L.: Gidrometeoizdat, 1979. - 311 p. - B. c.
4. Organization and mathematical planning of the experiment: a tutorial / Yu. V. Yudin, M. V. Maisuradze, F. V. Vodolazsky. - Ekaterinburg: Publishing house of the Ural. University, 2018. - 124 p.
5. 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>

6. VSN 163-83. Accounting for deformations of river channels and banks of water bodies in the zone of underwater crossings of main pipelines (oil and gas pipelines)" (approved by the Ministry of Oil and Gas Construction on 09.06.1982; Ministry of Gas Industry on 10.11.1983; Ministry of Oil Industry on 16.09.1983; State Committee on Oil Products of the RSFSR on 12.08.1982; State Committee on Hydrometeorology on 19.12.1983).
7. R. Courant, K. Friedrichs, H. Lewy. Über die partiellen Differenzgleichungen der mathematischen Physik // Mathematische Annalen. — 1928. — T. 100, № 1. — С. 32—74.
8. Patankar S. Numerical methods for solving problems of heat transfer and fluid dynamics / Per. from English. — М.: Energoatomizdat, 1984. — 152 p.
9. 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», 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 04.03.2025; опубликована онлайн 20.09.2025.
Received 04.03.2025; published online 20.09.2025.