УДК 004.942
DOI: 10.37890/jwt.vi88.726

Исследование влияния скорости судна на русловой процесс в канале разной глубины 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 существует и функционирует единая глубоководная система (ЕГС), включающая в себя большое количество судоходных рек и каналов. Часть из них пересекают магистральные трубопроводы, которые, как показывает практика, зачастую имеют небольшую глубину заложения, что впоследствии приводит к возникновению отклонений планово-высотного положения трубопровода. В связи с зарегулированностью ряда судоходных каналов, что сопровождается отсутствием естественного течения, одним из факторов, влияющих на размыв дна канала, является прохождение судов. Главным образом на гидродинамические процессы оказывает влияние скорость движения судна. Оценить влияние судоходства на изменение интенсивности донной эрозии в канале возможно с помощью математического моделирования. В статье представлены результаты математического моделирования движения с разной скоростью судна проекта 507Г-020-012 по каналу при разной его глубине.

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

Study of the influence of vessel speed on the channel process in a channel of different depths 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, a unified deepwater system (UDS) exists and operates within the Russian Federation, encompassing a large number of navigable rivers and canals. Some of these are crossed by main pipelines, which, as practice shows, often contain some embedded foundations, which subsequently leads to deviations in the pipeline's planned elevation. Due to the over-regulation of a number of shipping canals, which is accompanied by a lack of natural water flow, one of the factors influencing channel bottom erosion is the passage of vessels. Hydrodynamic processes primarily affect vessel speed. The impact of shipping on changes in the degree of bottom erosion in the canal can be assessed using mathematical modeling. This article presents the results of mathematical modeling of Project 507G-020-012 movement at different speeds along the canal, with varying levels of water content.

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 прилежащих областях [1], [2]. В связи с отсутствием на зарегулированных каналах естественного течения, интенсивность гидродинамических процессов зависит главным образом от скорости движения судна. Количественно и качественно определить характер взаимосвязи между скоростью судна в канале и скоростью движения воды вблизи дна с целью последующего определения безопасной скорости судна можно с помощью выполнения математического моделирования. В данной статье описана математическая модель, а также представлены полученные результаты и сделаны общие выводы касательно вышеупомянутого вопроса.

Материалы и методы

Для определения безопасного скоростного режима движения судов в канале была разработана математическая модель, которая принципиально состоит из двух элементов: судно и канал. Судно состоит из корпуса и двух движителей (гребных винтов) с внешним диаметром винтов 1,8 м. Канал протяженностью 500-2000 м, шириной 50,1 м, глубиной: 4,5, 5, 5,5, 7 и 10 м. Для описания турбулентных процессов, возникающих в расчетной области при движении судна и работе гребных винтов, была выбрана модель турбулентности $K-Epsilon$[3].

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

Геометрия расчетного судна представлена на рисунке 1.



Рис. 1. Общая конфигурация судна

Для реализации математического моделирования движения судна определена взаимосвязь скорости судна на тихой воде и скорости вращения обоих его движителей. Такая взаимосвязь имеет вид кривой, которая строится на основе результатов тяговых расчетов. Для судна проекта 507Г-020-012 указанная зависимость уже имеется и представлена на рисунке 2.

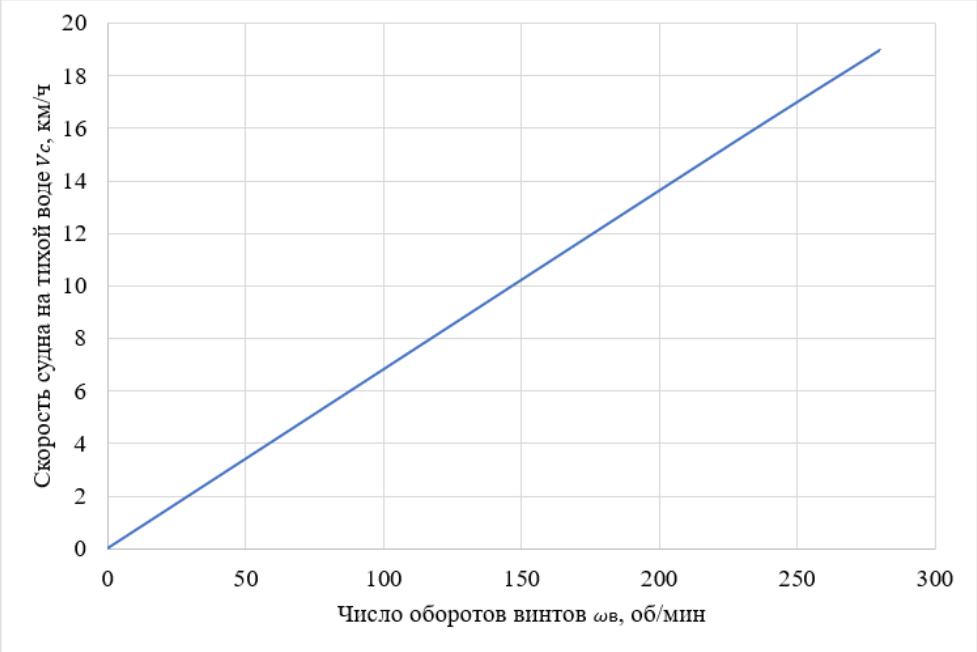


Рис. 2. Зависимость $V_c = f(\omega_в)$

По данному графику получены значения скорости движения судна на тихой воде при конкретной скорости вращения гребных винтов. Значения скоростей, используемых в вариациях М1-М5, представлены в таблице 2.

Таблица 2

Значения скорости движения судна при разных скоростях вращения винта

Наименование вариации	Скорость судна на тихой воде, км/ч	Обороты винта, об/мин	Обороты винта, рад/с
М1	0,60	8,70	0,91
М2	1,00	14,59	1,53
М3	2,50	36,68	3,84
М4	4,00	58,77	6,15
М5	10,00	147,14	15,41

На основе данных, приведенных в таблице 2, для каждой глубины канала разработано и рассчитано несколько вариаций математической модели, обозначенных М1-М5, каждая из которых имитирует движение судна с заданной скоростью в канале. Цель данного математического моделирования заключается в исследовании гидродинамических процессов, возникающих вблизи дна канала при прохождении судов, для чего создан контрольный индикатор в виде плоского сечения, расположенного на расстоянии 0,1 м от дна.

В процессе моделирования программа фиксировала максимальную скорость движения воды v_{max} в заданном контрольном индикаторе, что позволяет сделать выводы о её изменении вблизи дна канала при прохождении судна.

Результаты

В результате выполнения математического моделирования для каждой глубины канала получены графики изменения максимальной скорости течения v_{max} вблизи дна при разной скорости движения судна v_c (рисунок 3, 4).

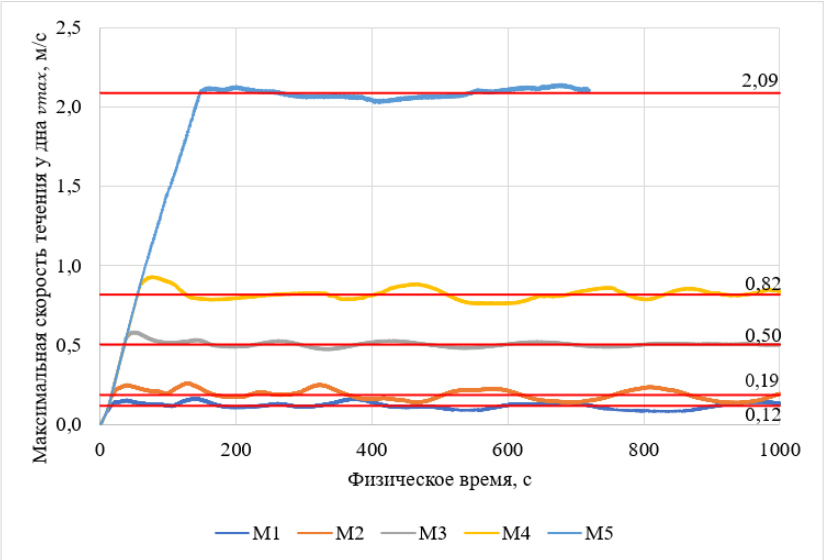


Рис. 3. Графики изменения максимальной скорости течения у дна канала глубиной 4,5 м

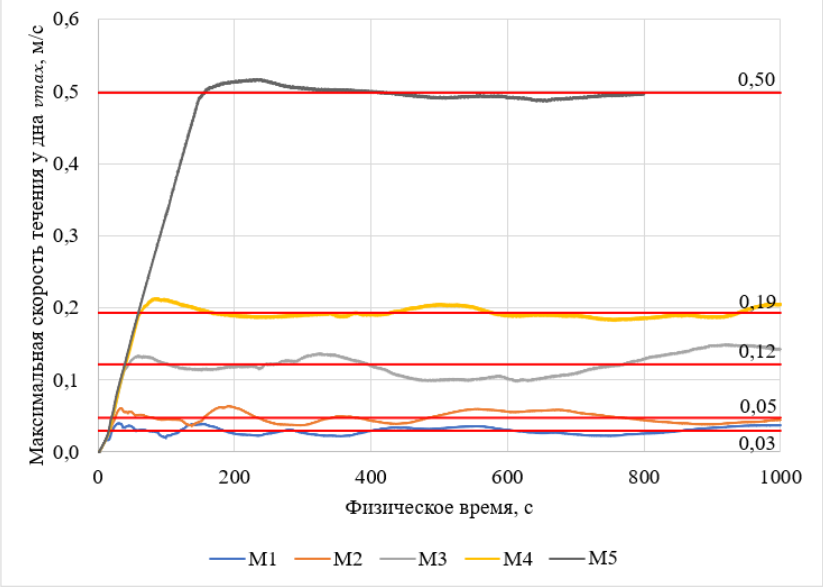


Рис. 4. Графики изменения максимальной скорости течения у дна канала глубиной 10 м

На рисунках 3, 4 приведены графики для граничных из принятых в расчетах значений глубины 4,5 м и 10 м. По ним следует, что скорость течения у дна

увеличивается в разы при возрастании скорости движения судна, но уменьшается с ростом глубины канала, причем наиболее сильное влияние на характер изменения скорости течения оказывает скорость судна. Аналогичные тенденции изменения скорости течения проявились при промежуточных глубинах канала 5, 5,5 и 7 метров.

Мониторинг изменения скалярного скоростного поля потока в процессе моделирования осуществлялся с помощью специальных сцен, одна из которых представлена на рисунке 5.

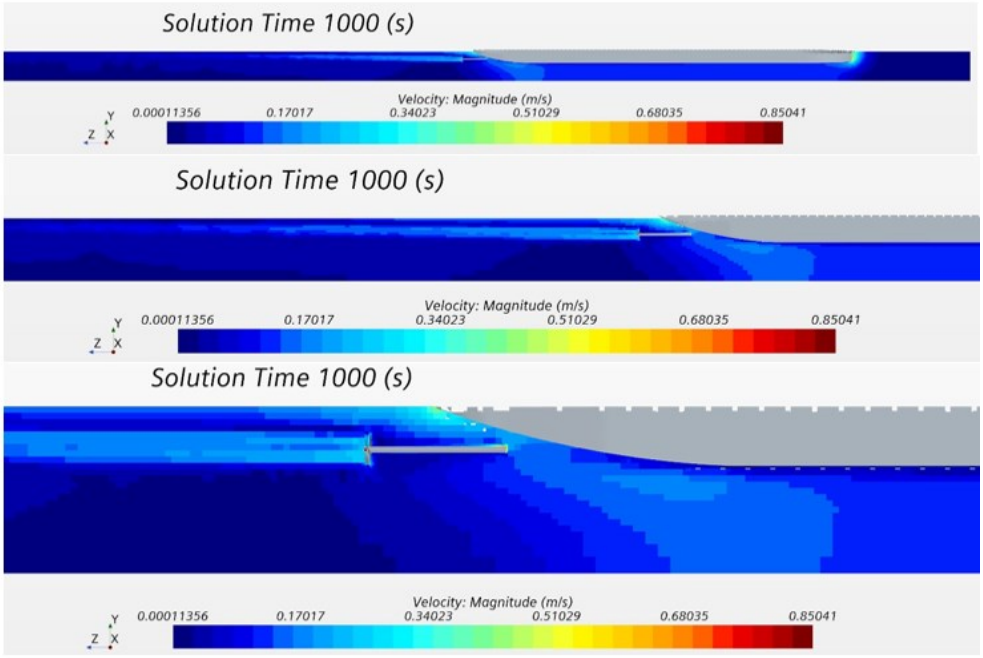


Рис. 5. Скалярное скоростное поле потока на момент времени 1000 с

По полученным графикам определены осредненные значения максимальной скорости течения вблизи дна канала v_{max} при разных соотношениях осадки судна к глубине потока T/H, именуемых нами как коэффициент стеснения потока под днищем $K_{ст}$ и при коэффициентах стеснения живого сечения канала Ω, определяемых отношением площади погруженной части судна к площади поперечного сечения канала. Результаты приведены в таблице 3.

Таблица 3

Результаты математического моделирования

Вариация модели	Скорость судна V_c		Максимальная скорость течения вблизи дна канала v_{max}, м/с / $\frac{v_{max}}{v_c}$				
			Глубина канала, м ($K_{ст}$, Ω)				
	м/с	км/ч	4,5 ($K_{ст}$=0,78, Ω=0,26)	5,0 ($K_{ст}$=0,70, Ω=0,23)	5,5 ($K_{ст}$=0,64, Ω=0,21)	7,0 ($K_{ст}$=0,50, Ω=0,17)	10,0 ($K_{ст}$=0,35, Ω=0,12)
M1	0,17	0,61	0,12/0,71	0,09/0,53	0,07/0,41	0,05/0,29	0,03/0,18
M2	0,28	1,01	0,19/0,68	0,15/0,54	0,13/0,46	0,08/0,29	0,05/0,18
M3	0,69	2,48	0,50/0,72	0,35/0,51	0,30/0,43	0,20/0,29	0,12/0,17
M4	1,11	4	0,82/0,74	0,58/0,52	0,49/0,44	0,33/0,30	0,19/0,17
M5	2,78	10	2,09/0,75	1,52/0,55	1,23/0,44	0,85/0,31	0,50/0,18

Из таблицы 3 следует, что динамика изменения коэффициентов $K_{ст}$ и Ω практически одинакова, а отношение $\frac{K_{ст}}{\Omega}$ при разных глубинах канала изменяется незначительно, что позволяет использовать далее при оценке влияния на скорость течения из двух этих коэффициентов только $K_{ст}$.

По результатам моделирования построены графики зависимости $v_{max} = f(v_c)$, на которых моделируемые кривые аппроксимируются степенными функциями вида $v_{max} = a \cdot v_c^b$ при разной стесненности потока под днищем $K_{ст}$ (рисунок 6) и $v_{max} = f(K_{ст})$ (рисунок 7). На рисунке 6 пунктирными линиями обозначены границы областей безопасных для размыва грунта скоростей движения судна.

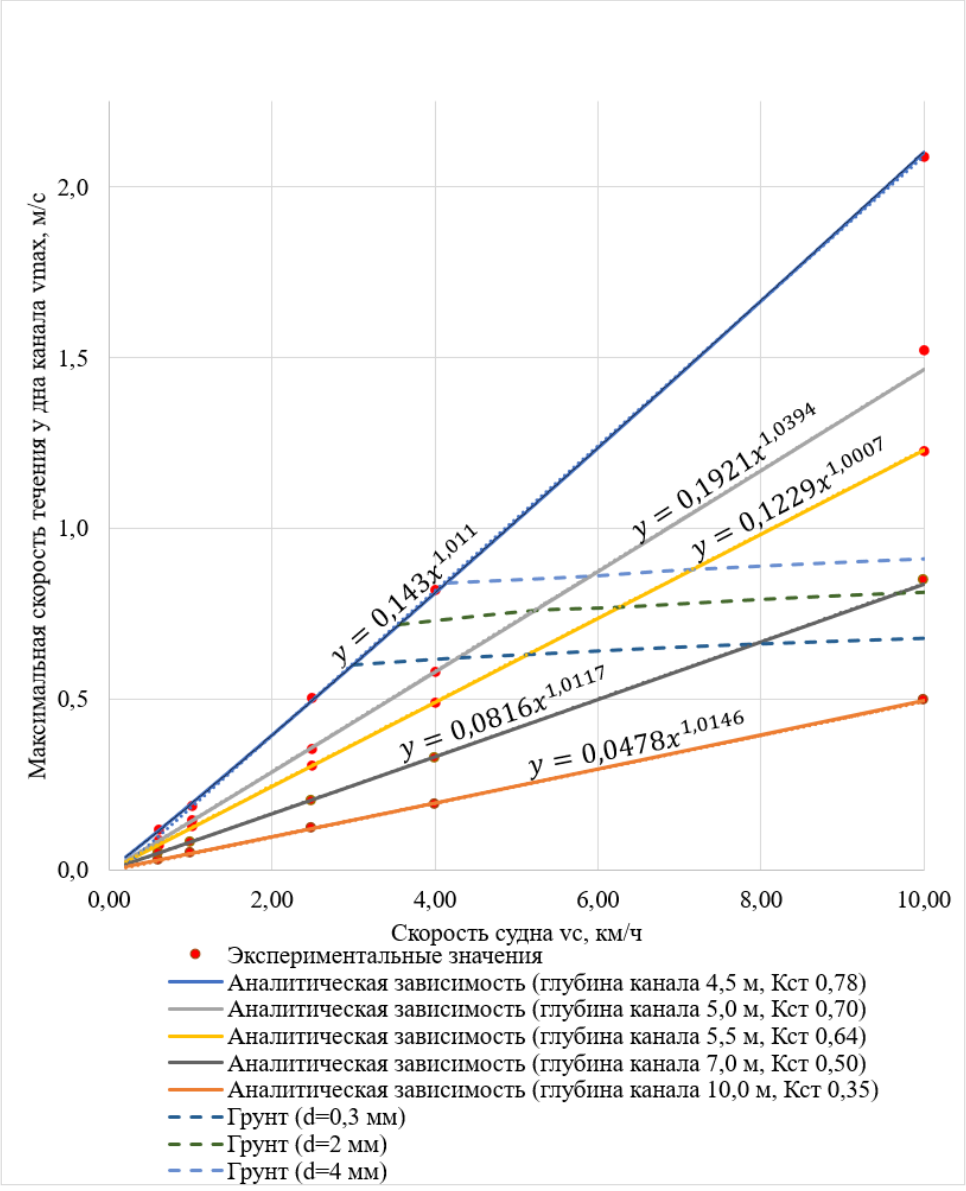


Рис. 6. Аналитические зависимости $v_{max} = f(v_c)$ при разных $K_{ст}$

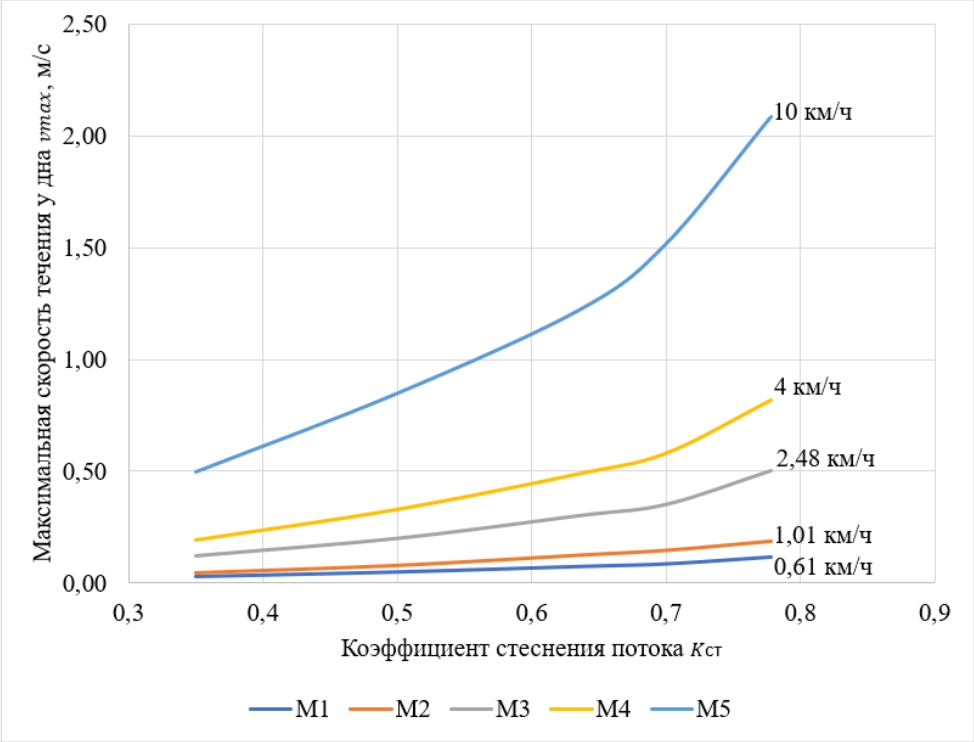


Рис. 7. Зависимости $v_{max} = f(K_{ст})$

Из данных таблицы 3 и рисунков 6, 7 следует, что скорость течения у дна возрастает с увеличением скорости судна и повышением стесненности потока, причем влияние этих факторов проявляется с разной интенсивностью. Так, при одной и той же скорости судна, максимальная скорость течения у дна примерно в 4 раза выше при максимальном стеснении потока ($K_{ст}$=0,78) по сравнению с минимальным стеснением потока ($K_{ст}$=0,35), а при одной и той же величине стесненности потока при увеличении скорости судна от 0,61 до 10 км/ч максимальная скорость течения у дна возрастает примерно в 17 раз.

Особенностью полученных результатов является относительное постоянство соотношения максимальной скорости течения вблизи дна и скорости судна. Таким образом, с увеличением скорости судна увеличивается и значение максимальной скорости течения у дна, однако их отношение v_{max}/v_c практически не меняется при конкретном значении $K_{ст}$. При высокой стесненности потока ($K_{ст}$=0,78) это отношение составило 0,68-0,75, при самой малой стесненности потока ($K_{ст}$=0,35) это отношение составило 0,17-0,18. Такая особенность соотношений скоростей позволяет в дальнейшем использовать её в аналитической оценке влияния скоростного режима на русловые процессы и безопасность судоходства.

Для оценки влияния скорости судна и стеснения потока под днищем на максимальную скорость течения у дна выполнен корреляционно-регрессивный анализ связи исследуемых факторов, который показал, что на скорость течения у дна наибольшее влияние оказывает скорость судна (парный коэффициент корреляции составляет 0,84), меньшее влияние оказывает стесненность потока под днищем (парный коэффициент корреляции составляет 0,38), а также общая стесненность живого сечения канала (парный коэффициент корреляции составляет 0,38).

Совокупное влияние трех факторов v_c, $K_{\text{ст}}$ и Ω в основном определяет скорость течения у дна v_{max} (множественный коэффициент корреляции 0,93).

Для массива статистических параметров, характерных для принятых условий прохождения судна проекта 507Г-020-012 с осадкой 3,5 м по каналу при глубинах 4,5-10 м, расчетных максимальных скоростей течения у дна, заданных значениях скоростей судна и стесненности потока под днищем судна получено уравнение регрессии вида $v_{max} = a_0 + a_1 \cdot v_c + a_2 \cdot K_{\text{ст}} + a_3 \cdot \Omega$, используя которое возможно, варьируя параметрами v_c, $K_{\text{ст}}$ и Ω, получить величину v_{max} и оценить её влияние на размыв дна, а также обосновать величину безопасной скорости судна $v_{\text{без}}$.

Для этого, пользуясь нормативными материалами [4], в таблице 4 приведены значения допустимых неразмывающих скоростей течения для грунтов, состоящих преимущественно из частиц диаметром 4, 2 и 0,3 мм соответственно при глубинах потока 4,5 м, 5 м, 5,5 м, 7 м и 10 м [5]. Приравнивая их к величине v_{max} можно из уравнения регрессии, разработанного для соответствующей выборки параметров, или по аналитическим зависимостям (рисунок 6) получить безопасную для размыва грунта скорость судна $v_{\text{без}}$ (таблица 4).

Таблица 4

Безопасные скорости движения судна по каналу разной глубины

Вид грунта	Глубина потока H, м	Коэффициент стесненности $K_{\text{ст}}$	Допустимая неразмывающая скорость потока, м/с	Безопасная скорость судна $v_{\text{без}}$	
				м/с	км/ч
Гравий средний (d=4 мм)	4,5	0,78	0,84	1,15	4,15
	5,0	0,70	0,86	1,64	5,90
	5,5	0,64	0,88	1,99	7,18
	7,0	0,50	0,92	3,06	11,0
	10,0	0,35	0,99	5,53	19,90
Гравий мелкий (d=2 мм)	4,5	0,78	0,72	0,99	3,56
	5,0	0,70	0,76	1,45	5,22
	5,5	0,64	0,77	1,74	6,28
	7,0	0,50	0,81	2,69	9,70
	10,0	0,35	0,87	4,86	17,50
Песок средний (d=0,3 мм)	4,5	0,78	0,60	0,83	2,99
	5,0	0,70	0,62	1,19	4,27
	5,5	0,64	0,63	1,43	5,14
	7,0	0,50	0,66	2,19	7,90
	10,0	0,35	0,71	3,97	14,3

Число Куранта в расчетной области, определяющее физичность моделируемого процесса, не превышает единицы, что является хорошей оценкой [6], [7], [8].

Заключение

Результаты математического моделирования показали, что возникающая вблизи дна канала скорость течения в значительной степени зависит от скорости судна, в меньшей степени зависит от отношения осадки судна к общей глубине потока T/H и общей стесненности живого сечения канала. Значение возникающей скорости течения уменьшается с увеличением глубины под днищем судна. Наиболее опасным с точки зрения размыва дна канала является случай, когда дно сложено преимущественно мелкозернистым грунтом, судно имеет минимальный запас воды под днищем и двигается с максимальной разрешенной скоростью. В таком случае скорость течения вблизи дна может достигать нескольких метров в секунду.

При отношении T/H=0,4, максимальная скорость течения, возникающая вблизи дна, при скорости судна до 10 км/ч, меньше значения допустимой неразмывающей. В данном случае влияние движения судна на придонную скорость крайне незначительно.

Описанный в статье подход позволяет дать оценку скорости судна, стесненности потока под днищем и стесненности живого сечения канала, при которых возможно активное переформирование дна канала в зависимости от рода грунта и других характеристик, влияющих на устойчивость подводных переходов магистральных трубопроводов, а также тиражировать методику расчетов для судов разных проектов при их прохождении по каналам и рекам.

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://вф-река-море.рф/2024/6_4.pdf
3. 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
4. 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).
5. Гришанин К.В., Сорокин Ю.И. Гидрология и водные изыскания. Учебник для вузов/Под ред. К.В. Гришанин. – М.: Транспорт, 1982 – 212 с.
6. R. Courant, K. Friedrichs, H. Lewy. Über die partiellen Differenzengleichungen 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. – M.: 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., 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. 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
4. 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).

5. Grishanin K.V., Sorokin Yu.I. Hydrology and water surveys. Textbook for universities/Edited by K.V. Grishanin. Moscow: Transport, 1982 – 212 p.
6. R. Courant, K. Friedrichs, H. Lewy. Über die partiellen Differenzengleichungen 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. – M.: 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»), 603950, 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»), 603950, 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, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951

Статья поступила в редакцию 29.04.2026; принята к публикации 22.06.2026; опубликована онлайн 20.09.2026. Received 29.04.2026; published online 20.09.2026.