

УДК 656.6

DOI: 10.37890/jwt.v79.495

Обзор и анализ способов оценки влияния условий эксплуатации подводных переходов магистральных трубопроводов на безопасность судоходства

С.С. Герасимов¹

А.Н. Ситнов¹

¹Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия.

Аннотация: в настоящее время на территории Российской Федерации существует и функционирует единая глубоководная система (ЕГС), имеющая общую протяженность водных путей 6500 км. Такие размеры создают условия её работы в контакте с работой другой важнейшей области хозяйственной деятельности – энергетики, в частности, с нефтегазовой отраслью. Магистральные трубопроводы, по которым осуществляется транспортировка нефти и нефтепродуктов, часто пересекают водные объекты, в том числе и судоходные реки. Нарушение условий безопасной эксплуатации подводных переходов магистральных трубопроводов (ППМТ) может привести к серьезным авариям и, в некоторых случаях, к разливу нефтесодержащих продуктов в акваторию водных объектов, что нанесет серьезный экономический, экологический и социальный ущерб, в том числе для безопасности судоходства. Отсюда тема исследования, связанная с оценкой влияния условий эксплуатации подводных переходов магистральных трубопроводов в разных аспектах хозяйственной деятельности, включая безопасность судоходства, является актуальной. В статье приведены сведения о проводившихся ранее исследованиях в данной области, изложена их ключевая проблематика, дана информация о методах и способах решения задач, а также обозначен вектор дальнейшего исследования.

Ключевые слова: безопасность судоходства, внутренние водные пути, единая глубоководная система, экология, магистральные трубопроводы, математическое моделирование

Review and analysis of methods for assessing the impact of operating conditions of underwater crossings of main pipelines on the safety of navigation

Sergey S. Gerasimov¹

Aleksandr N. Sitnov¹

¹Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract: currently, a unified deep-water system (USS) exists and operates on the territory of the Russian Federation, with a total length of waterways of 6,500 km. Such dimensions create conditions for its work in contact with the work of another important area of economic activity - energy, in particular, with the oil and gas industry. Trunk pipelines through which oil and petroleum products are transported often cross water bodies, including navigable rivers. Violation of the conditions for the safe operation of underwater crossings of main pipelines (UPC) can lead to serious accidents and, in some cases, to the spill of oil-containing products into water bodies, which will cause serious economic, environmental and social damage, including the safety of navigation. Hence, the research topic related to assessing the influence of operating conditions of underwater crossings of main pipelines in various aspects of economic activity, including navigation safety, is relevant. The article provides information about previously conducted research in this area, outlines their key issues,

provides information on methods and methods for solving problems, and also outlines the vector for further research.

Keywords: shipping safety, inland waterways, unified deep-water system, ecology, main pipelines, mathematical modeling

Введение

В связи с необходимостью интенсивного развития внутреннего водного транспорта Российской Федерации, обусловленной его сравнительной дешевизной и экологичностью, вопрос безопасности судоходства, связанный со скоростным движением судов в местах пересечения судового хода и подводных переходов, был и остается злободневным. Понимая под безопасностью судоходства состояние судоходной системы на внутренних водных путях, при котором риск причинения вреда жизни, здоровью и нанесения ущерба законным интересам людей, окружающей среде, имуществу снижен до приемлемого уровня, его поддержание на этом (либо более низком уровне) возможно посредством непрерывного процесса выявления источников опасности и контроля факторов риска. Основными факторами риска являются размыв дна в месте прокладки трубопровода, связанный со скоростями течения реки и движением судна, а также просадка корпуса судна на мелководье, зависящая во многом так же от его скорости. В сущности, эксплуатация подводных переходов магистральных трубопроводов имеет прямое отношение к безопасности судоходства, так как выход трубопровода из строя может, а вероятно и будет, сопровождаться его всплытием или разгерметизацией вследствие механических повреждений, вызванных, в том числе, и столкновением с корпусом судна или другими его частями. Это приведет к ограничению или полной остановке судоходства на участке аварии (происшествия) [1][2].

Наличие в практике аварий на магистральных трубопроводах, вызванных влиянием судоходства, внушительные объемы потенциально возможного ущерба, в том числе и экологического, а также отсутствие в настоящее время в Российской Федерации правового механизма регулирования скоростного движения судов и составов на участках, где проложены магистральные трубопроводы, делают задачу о взаимном влиянии характера движения судов и состояния трубопроводов по-настоящему важной и требующей своего исследования и практического разрешения[3][4].

Проблематика исследования и постановка задачи

Прежде чем перейти к постановке задачи, несколько слов о видах взаимодействия судна и трубопровода. По большому счету, количество сценариев взаимодействия магистрального трубопровода (МТ) и судна не так уж и велико. Среди них можно выделить прямое и посредственное.

Прямое взаимодействие заключается в механическом контакте судна и трубопровода, когда судно задевает корпусом или другим своим элементом (например, движительно-рулевым комплексом, якорем) сам трубопровод, подвергая тем самым его серьезной опасности. Для возникновения такой ситуации необходимо либо чтобы трубопровод, «всплыл» к поверхности водного объекта, либо судно коснулось оголенной части трубопровода. Такое возможно лишь в случае, когда в пределах подводного перехода магистрального трубопровода возник его провис или оголение значительной протяженности и трубопровод впоследствии всплыл вверх. Говоря о провисах, оголениях и прочих отклонениях планово-высотного положения трубопровода, важно заметить, что переформирование рельефа дна водного объекта, которое и может потенциально привести к «всплытию» трубопровода, происходит под влиянием не только естественного водного потока, но и в результате движения судов при вращении гребного винта и возникающих волновых процессах. Таким

образом, судоходство также оказывает влияние на условия эксплуатации магистральных трубопроводов, и рассматриваемая задача имеет двойственный характер: безопасность судоходства зависит от условий эксплуатации МТ и наоборот [5].

К *посредственному взаимодействию* можно отнести аварию на магистральном трубопроводе, вызванную не судоходством, а другими обстоятельствами. Но и в этом случае последствия аварии будут оказывать на судоходство прямое негативное влияние. Утечка нефти, например, непременно вызовет ограничение судоходства на конкретном участке.

Таким образом, проблема взаимосвязи судоходства и эксплуатации подводных переходов магистральных трубопроводов сводится к сложному комплексному исследованию волновых процессов, создаваемых движущимся судном, влияющих на переформирование рельефа дна. В общем виде задача взаимодействия струи от гребного винта с грунтом была исследована ранее и на определенном уровне в части размыва и т.д. уже решена [6]. Однако вопрос динамики и интенсивности русловых переформирований в местах расположения трубопроводов, находящихся в ненормативном состоянии (в условиях оголения или провиса (рис.1)) не исследован, несмотря на его высокую значимость для безопасной эксплуатации системы «судно-трубопровод». Она определяется наличием многочисленных фактов ненормативного состояния трубопроводов, подтвержденных практикой.

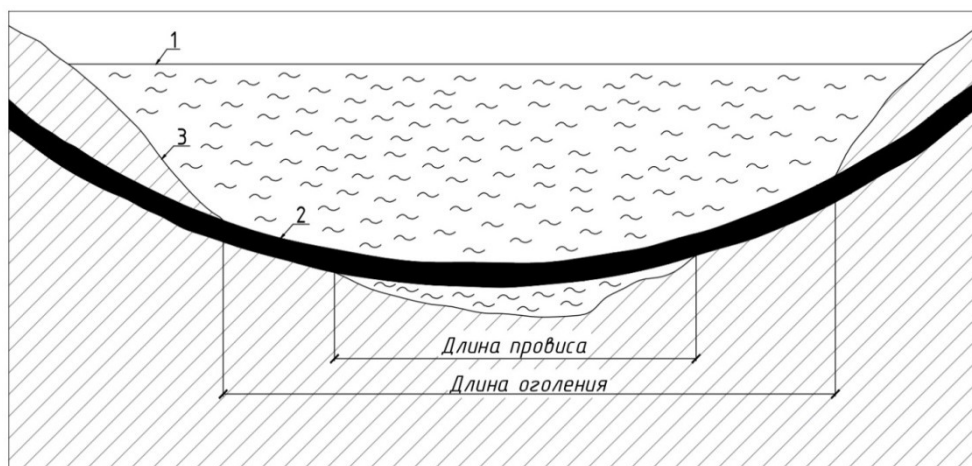


Рис. 1. Магистральный трубопровод в условиях оголения и провиса

Условные обозначения: 1 – уровень воды, 2 – магистральный трубопровод, 3 – русло реки

В сущности, наша задача является логическим продолжением результатов исследований, представленных в работе [6], и сводится к качественному и количественному анализу волновых процессов, возникающих при движении судна с целью определения интенсивности и характера донных переформирований. Для его выполнения разработаны схемы, поясняющие характер взаимодействия элементов системы «судно-трубопровод» (рис. 2-3).

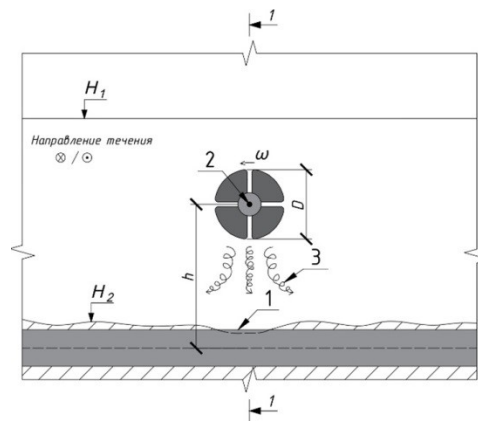


Рис. 2. Общая расчетная схема

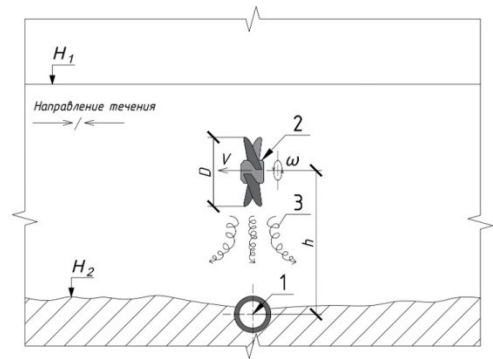


Рис. 3. Сечение 1-1

Условные обозначения: 1 – магистральный трубопровод, 2 – гребной винт, 3 – волновые вихри.

К основным параметрам, имеющим разную величину при такой постановке задачи, относятся: диаметр гребного винта D [мм], расстояние между осью вращения гребного винта и осью расположенного на дне реки трубопровода h [мм], скорость вращения гребного винта ω [рад/с], линейная скорость судна V [м/с], отметка уровня воды H_1 [м], отметка дна реки H_2 [м]. Учет влияния большого числа факторов, изменяющихся по величине, на русловой процесс, требует своего методического обоснования.

Методические подходы к решению поставленной задачи

В сущности, количественное и качественное исследование волновых процессов, возникающих при вращении гребного винта, происходит за счет оперирования такими физическими величинами, как скорость движения жидкости v (в скалярном и векторном виде), турбулентная кинетическая энергия Tke , позволяющая на определенном уровне оценить завихрения в турбулентном потоке, сдвиговое напряжение стенки τ и некоторыми другими [7][8].

Независимо от используемого метода, исследование предполагается проводить в два основных этапа.

На первом этапе, где производится количественное обоснование параметров системы «судно-трубопровод», происходит процесс фиксации интересующих нас волновых процессов в заданной области с помощью установленных заранее индикаторов. Рассмотрим алгоритм данного этапа на примере математического моделирования, включающего создание математической модели с заданными граничными условиями. С помощью специализированного программного комплекса имитируется вращение гребного винта для последующего количественного определения изменения скорости и направления течения воды в области, расположенной под винтом. Для этого в математической модели создаются несколько горизонтальных сечений Γ_i , расположенных под винтом и несколько произвольных объемов V_j у дна вблизи оголенного и(или) провисшего трубопровода (рис. 4), представляющие собой своеобразные индикаторы. С помощью последних отслеживается изменение скорости на разной глубине под винтом, что в дальнейшем, после обработки результатов моделирования, позволяет получить кривые изменения максимальной скорости вихревых потоков по глубине. Под скоростью вихря понимается скорость движения воды, вызванная вращением гребного винта.

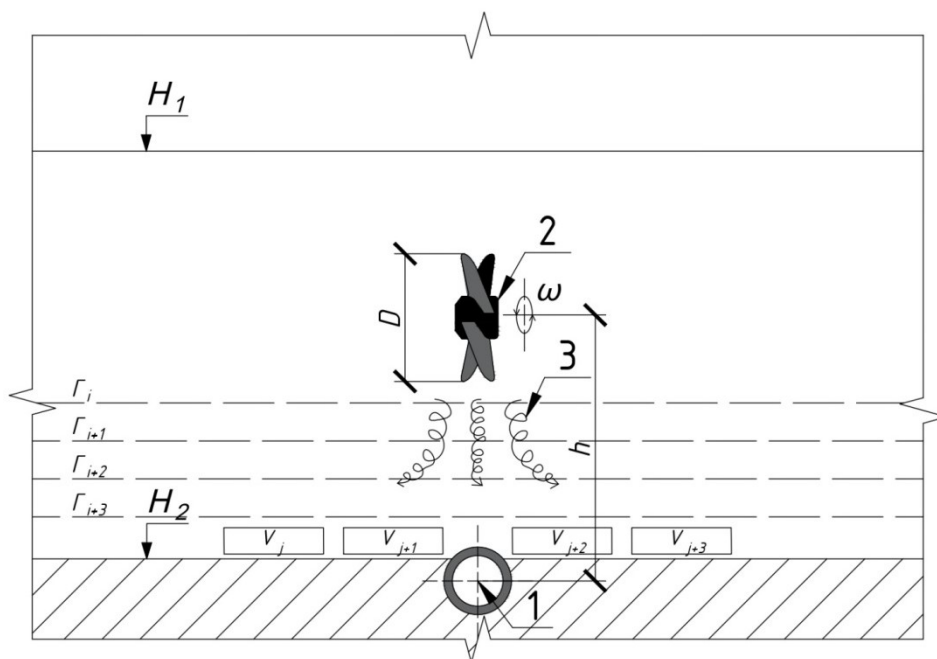


Рис. 4. Схема размещения контрольных индикаторов

В процессе расчета модели осуществляется мониторинг изменения максимальной скорости течения жидкости в пределах каждого индикатора при разной скорости вращения гребного винта. Программа позволяет самостоятельно настроить соответствующий график – график изменения во времени максимальной скорости в заданной области (индикаторе).

Получив представительный массив данных о максимальных скоростях вихря на разных глубинах под винтом (рис.5), появляется возможность построения графика изменения максимальной скорости по глубине при конкретной скорости вращения гребного винта (рис.6). На рисунке 7 представлен график изменения максимальной скорости вихря в пределах контрольных объемов V1 и V2.

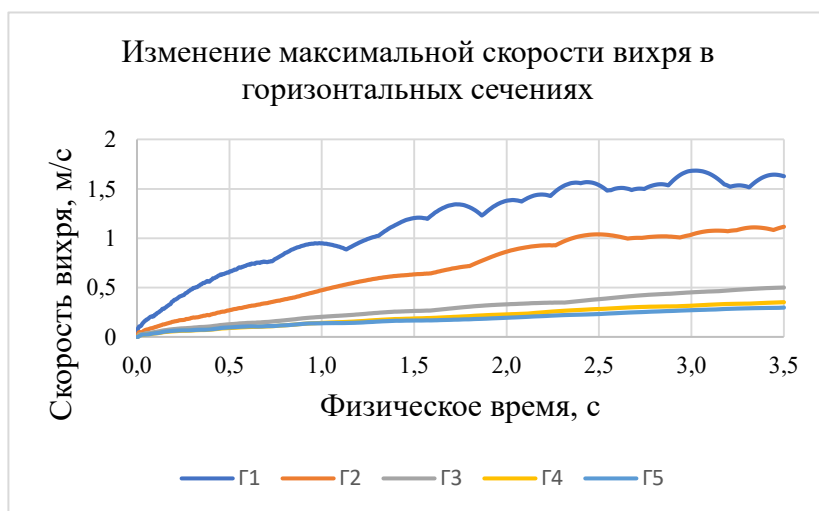


Рис. 5. Изменение максимальной скорости вихря в каждом сечении Γ_i

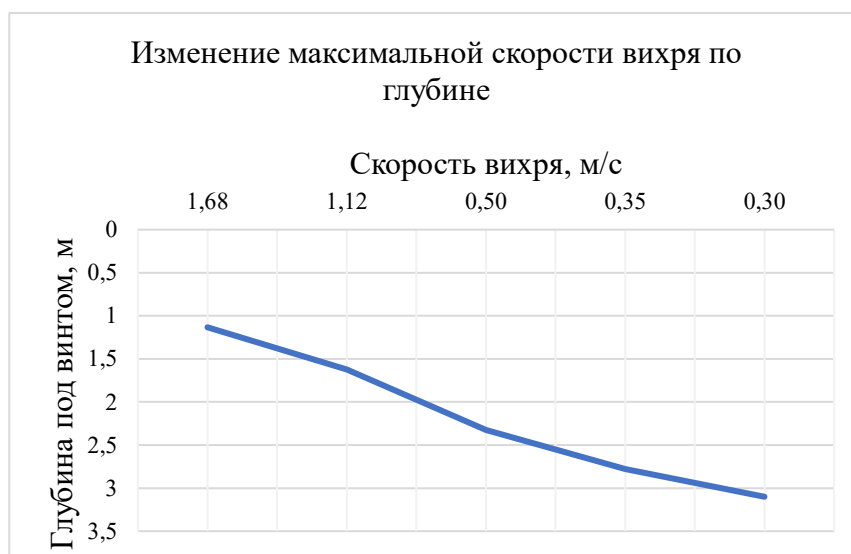


Рис.6. Изменение максимальной скорости вихря по глубине под винтом

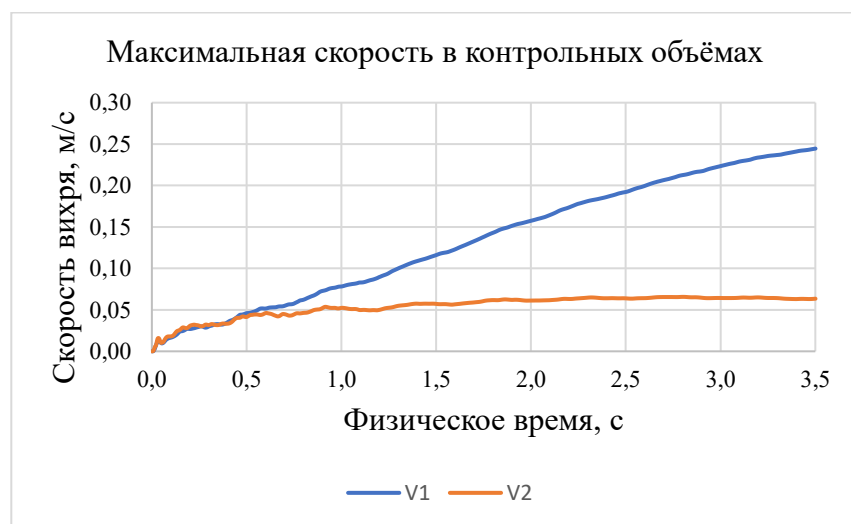


Рис. 7. Изменение максимальной скорости вихря в пределах контрольных объёмов

Все эти графики, представленные в данной статье, получены при расчете модели, в которой была реализована имитация вращения гребного винта, наружный диаметр которого составляет 1,8 м, со скоростью вращения 20 рад/с, не имеющего при этом линейного перемещения и при отсутствии дополнительных источников движения воды в расчетной области. Моделирование движения жидкости осуществлялось через решение системы гидродинамических уравнений Навье-Стокса, для учета и описания турбулентности использовалась модель $k - \epsilon$. Для фиксации волновых вихрей было установлено пять горизонтальных сечений Γ_{1-5} и два контрольных объёма V_{1-2} . Разработанная модель состоит из области Континуума и Вращающейся области. Континуум представляет собой трёхмерную расчетную область установленных размеров со спокойной водой, Вращающаяся область включает в себе гребной винт и некоторое пространство вблизи него.

В таблице 1 представлены сведения о расположении горизонтальных сечений Γ_i и зафиксированных в их пределах максимальных скоростях вихря. За условный «0» глубины принят горизонт, проходящий через самую низкую точку поверхности гребного винта, и имеющий координату по оси y : 1,131949 м.

Таблица 1

Расположение горизонтальных сечений и максимальные скорости вихря

№ горизонта	Координата y , м	Глубина от условного «0», м	Максимальная скорость вихря, м/с
Γ_1	-0,001	1,13	1,68
Γ_2	-0,493	1,62	1,12
Γ_3	-1,195	2,33	0,50
Γ_4	-1,648	2,78	0,35
Γ_5	-1,969	3,10	0,30

В векторном виде волновые процессы, возникающие при вращении винта, представлены на рисунке 8.

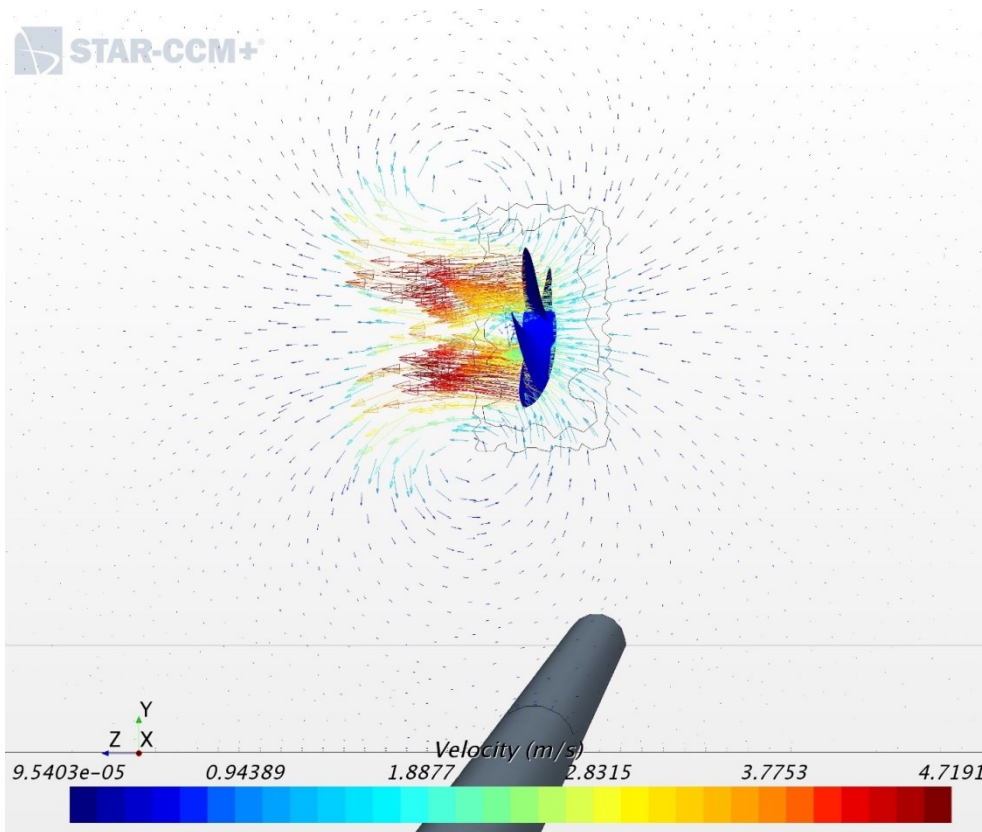


Рис. 8. Векторное представление волновых процессов от вращения винта

После установления характера изменения максимальной скорости в заданном направлении для каждого индикатора при заданной скорости вращения винта, строится график изменения глубины h , на которую распространяется максимальная скорость вихревого потока при рассматриваемой скорости вращения винта (связь

между вращением винта и скоростью судна будет устанавливаться нами впоследствии).

В результате получается множество кривых $h = f(\omega)$, каждая из которых отражает тенденцию распространения определенной скорости вихря, численно равной размывающей скорости для конкретного типа грунта.

Важно заметить, что полученные в процессе моделирования графики представляются набором дискретных значений и подлежат качественной обработке, которая выполняется с помощью анализа Фурье [9].

В результате исследования получается совокупность кривых, анализируя которые делаются выводы о размерах области распространения волновых процессов при вращении гребного винта. Кривые показывают величину вихревой области h , представляющую собой глубину распространения опасной с точки зрения русловой эрозии скорости вихревого потока.

Оценка адекватности математической модели и достоверности полученных результатов может быть произведена с помощью одного из критериев, используемых для оценки устойчивости численного решения, такого как критерий Куранта-Фридриха-Леви [10][11][12]. На рисунках 9 и 10 представлены графики изменения числа Куранта в области Континуума и во Вращающейся области в процессе расчета модели, о которой было сказано выше.

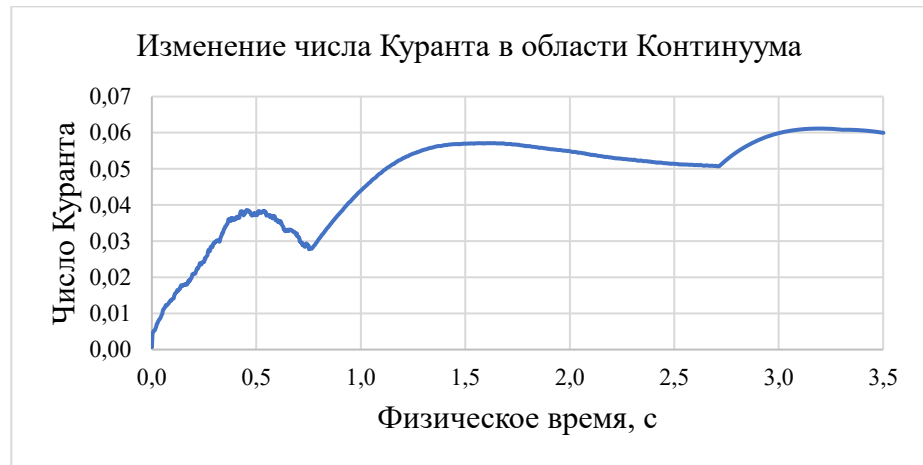


Рис. 9. Изменение числа Куранта в области Континуума

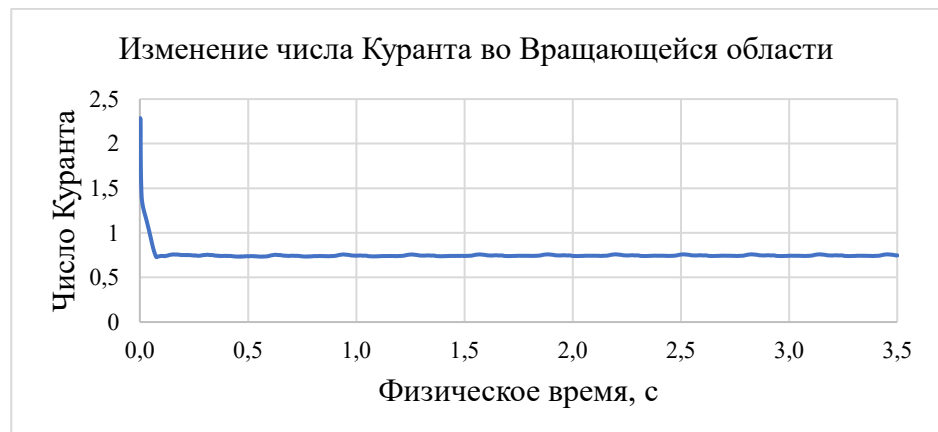


Рис. 10. Изменение числа Куранта во Вращающейся области

Как видно из рисунка, значение числа Куранта имеет максимальное значение 0,061 для области Континуума и 0,76 для Вращающейся области. Это свидетельствует о хорошей устойчивости численного решения. В общем случае, согласно опыту исследователей, занимающихся численным моделированием, значение Куранта должно быть не выше единицы, в противном же случае необходимо пересмотреть модель, как правило, в части задания граничных условий. Серьезные проблемы для сходимости решения представляет некорректное описание физики моделируемых процессов.

После получения кривых распространения в пространстве (по глубине) скоростей вихря, равных размываемым скоростям для разных видов грунтов, производится качественный анализ результатов, сущность которых, применительно к решаемой задаче, будет рассмотрена впоследствии.

Заключение

Выбранная научная проблема, в основе которой лежит исследование взаимного влияния судоходства и эксплуатации магистральных трубопроводов с позиции безопасности обоих, является значимой, сложной и интересной с точки зрения подходов к решению, методов и способов реализации результатов.

Подходы к исследованию характера и интенсивности русловой эрозии на участке оголенного или провисшего трубопровода – одна из основных задач исследования. Рассматриваемая в работе задача решается в упрощенном виде взаимодействия элементов системы «судно-трубопровод», в частности – в условиях стоячей воды. Вектор дальнейшего исследования направлен на учет влияния на рассматриваемую систему таких факторов как скорость и направление естественного течения водного объекта, тип грунта, слагающего русло, скорость движения судна и других. Анализ волновых процессов, возникающих при вращении гребного винта, предполагается проводить с применением современных инструментов численного и лабораторного моделирования, в результате чего рассмотренные в статье методические подходы к решению задачи получат свою апробацию.

Список литературы

1. Гришанин К. В. Водные пути / К. В. Гришанин, В. В. Дегтярев, В. М. Селезнев. — М.: Транспорт, 1986. — 400 с.
2. Орлович К. С. Внутренние водные пути и судоходная обстановка / К. С. Орлович, И. Е. Шмерлинг. — М.: Транспорт, 1977. — 216 с.
3. Орлович К. С. Внутренние водные пути и судоходная обстановка / К. С. Орлович, И. Е. Шмерлинг. — М.: Транспорт, 1977. — 216 с.
4. Положение о расследовании аварий или инцидентов на море: приказ Минтранса России от 8.10.2013 №308.- М.: МОРКНИГА, 2018.
5. Гидравлика, гидрология, гидрометрия. учебник для вузов: Ч. 2. Специальные вопросы / Н. М. Константинов; под общ. ред. Н. М. Константинова. — М.: Высш. шк., 1987. — 431 с.
6. М.П. Лобачев, А.В. Пустошный, К.Е. Сазонов, И.А. Чичерин. Численное моделирование взаимодействия струи от винта с грунтом. Сборник научных трудов «Фундаментальная и прикладная гидрофизика». УДК 551.46 (075.8).
7. Katritsis, Demosthenes (2007). "Wall Shear Stress: Theoretical Considerations and Methods of Measurement". *Progress in Cardiovascular Diseases*. 49 (5): 307–329.
8. Hibbeler, R.C. (2004). *Mechanics of Materials*. New Jersey USA: Pearson Education. p. 32. ISBN 0-13-191345-X
9. Howell, Kenneth B. *Principles of Fourier Analysis*. — CRC Press, 2001. — ISBN 978-0-8493-8275-8.
10. R. Courant, K. Friedrichs, H. Lewy. Über die partiellen Differenzgleichungen der mathematischen Physik // *Mathematische Annalen*. — 1928. — Т. 100, № 1. — С. 32—74.
11. Patankar S. *Numerical methods for solving problems of heat transfer and fluid dynamics / Per. from English*. — М.: Energoatomizdat, 1984. — 152 p.

12. Андреев В.А., Пустошный А.В. Расчетное исследование потока при натекании на гребной винт тянущей винто-рулевой колонки. Труды Крыловского государственного научного центра. 2018; 1(383): 73–80.

References

1. Grishanin, K.V. Waterways / K.V. Grishanin, V.V. Degtyarev, V.M. Seleznev. - M.: Transport, 1986. - 400 p.
2. Orlovich K. S. Inland waterways and the shipping situation / K. S. Orlovich, I. E. Shmerling. - M.: Transport, 1977. - 216 p.
3. Gutsulyak, V.N. Rules for navigation on inland waterways of the Russian Federation with comments. - M.: Center for Maritime Law, 2015.
4. Regulations on the investigation of accidents or incidents at sea: order of the Ministry of Transport of Russia dated October 8, 2013 No. 308. - M.: MORKNIGA, 2018.
5. Hydraulics, hydrology, hydrometry. textbook for universities: Part 2. Special issues / N. M. Konstantinov; under general ed. N. M. Konstantinova. - M.: Higher. school, 1987. - 431 p.
6. M.P. Lobachev, A.V. Pustoshny, K.E. Sazonov, I.A. Chicherin. Numerical modeling of the interaction of the propeller jet with the ground. Collection of scientific works "Fundamental and applied hydrophysics". UDC 551.46 (075.8).
7. Katritsis, Demosthenes (2007). "Wall Shear Stress: Theoretical Considerations and Methods of Measurement". Progress in Cardiovascular Diseases. 49 (5): 307–329.
8. Hibbeler, R.C. (2004). Mechanics of Materials. New Jersey USA: Pearson Education. p. 32. ISBN 0-13-191345-X.
9. Howell, Kenneth B. Principles of Fourier Analysis. — CRC Press, 2001. — ISBN 978-0-8493-8275-8.
10. R. Courant, K. Friedrichs, H. Lewy. Über die partiellen Differenzgleichungen der mathematischen Physik // Mathematische Annalen. — 1928. — T. 100, № 1. — С. 32—74.
11. Patankar S. Numerical methods for solving problems of heat transfer and fluid dynamics / Per. from English. – M.: Energoatomizdat, 1984. – 152 p.
12. Andreev V.A., Pustoshny A.V. Calculation study of the flow when a pulling rudder column flows onto the propeller. Proceedings of the Krylov State Scientific Center. 2018; 1(383): 73–80.

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 12.04.2024; опубликована онлайн 20.06.2024.
Received 12.04.2024; published online 20.06.2024.