

УДК 656.6

ОБЗОР МЕТОДОВ И РАЗРАБОТКА ПОДХОДОВ К ИССЛЕДОВАНИЮ СИСТЕМЫ «СУДНО-ТРУБОПРОВОД» В УСЛОВИЯХ НЕНОРМАТИВНОГО СОСТОЯНИЯ МАГИСТРАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДА

Герасимов Сергей Сергеевич¹, аспирант

e-mail: Gerasimov.s.sergeevich@mail.ru

Ситнов Александр Николаевич¹, доктор технических наук, профессор

e-mail: stnv1952@rambler.ru

¹ Волжский государственный университет водного транспорта, Нижний Новгород, Россия

Аннотация. Исследование свойств системы «судно-трубопровод», когда трубопровод находится в состоянии оголения и (или) провиса, является актуальным и направлено на количественную и качественную оценку взаимодействия их компонентов, а также требует своего методического обоснования. Одним из современных методов исследования является математическое моделирование. Для описания движения жидкости используются гидродинамические уравнения Навье-Стокса, дополненные уравнением неразрывности и, по необходимости, прочими специфическими моделями. Турбулентность волновых процессов учитывается через применение самых разных моделей. Многообразие математических моделей и их комбинаций дают возможность экспериментировать и выбирать из них наиболее подходящие. В системе «судно-трубопровод» рассматривается аспект развития волновых процессов, возникающих при вращении винта, и их влияние на русловую эрозию в местах расположения оголенного или провисшего трубопровода, а также основные подходы и методы решения задачи.

Ключевые слова: безопасность судоходства; магистральные трубопроводы; математическое моделирование; уравнения Навье-Стокса; волновые вихри; гребной винт; модель турбулентности $k - \epsilon$; русловая эрозия; оголение и провис трубопровода; вычислительная гидродинамика.

REVIEW OF METHODS AND DEVELOPMENT OF APPROACHES TO THE STUDY OF THE “SHIP-PIPELINE” SYSTEM IN CONDITIONS OF ABNORMAL CONDITION OF THE MAIN PIPELINE

Gerasimov Sergey Sergeevich¹, Doctoral student

e-mail: Gerasimov.s.sergeevich@mail.ru

Sitnov Aleksandr Nikolaevich¹, Doctor of Technical Sciences, Professor

e-mail: stnv1952@rambler.ru

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

Abstract. The study of the properties of the “ship-pipeline” system, when the pipeline is in a state of exposure and (or) sagging, is relevant and is aimed at quantitative and qualitative assessment of the interaction of their components, and also requires its own methodological justification. One of the modern research methods is mathematical modeling. To describe the movement of a fluid, the Navier-Stokes hydrodynamic equations are used, supplemented by the continuity equation and, if necessary, other specific models. Turbulence of wave processes is taken into account through the use of a variety of models. The variety of mathematical models and their combinations make it possible to experiment and choose the most suitable ones. In the “ship-pipeline” system, the aspect of the development of wave processes arising from the rotation of the propeller and their impact on channel erosion in the locations of a bare or sagging pipeline is considered, as well as the main approaches and methods for solving the problem.

Keywords: navigation safety; main pipelines; mathematical modeling; Navier-Stokes equations; wave vortices; propeller screw; k-Epsilon turbulence model; channel erosion; exposure and sagging of the pipeline; computational fluid dynamics.

Введение

Проблема взаимосвязи судоходства и эксплуатации подводных переходов магистральных трубопроводов сводится к сложному комплексному исследованию волновых процессов, создаваемых движущимся судном, влияющих на переформирование рельефа дна. 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.

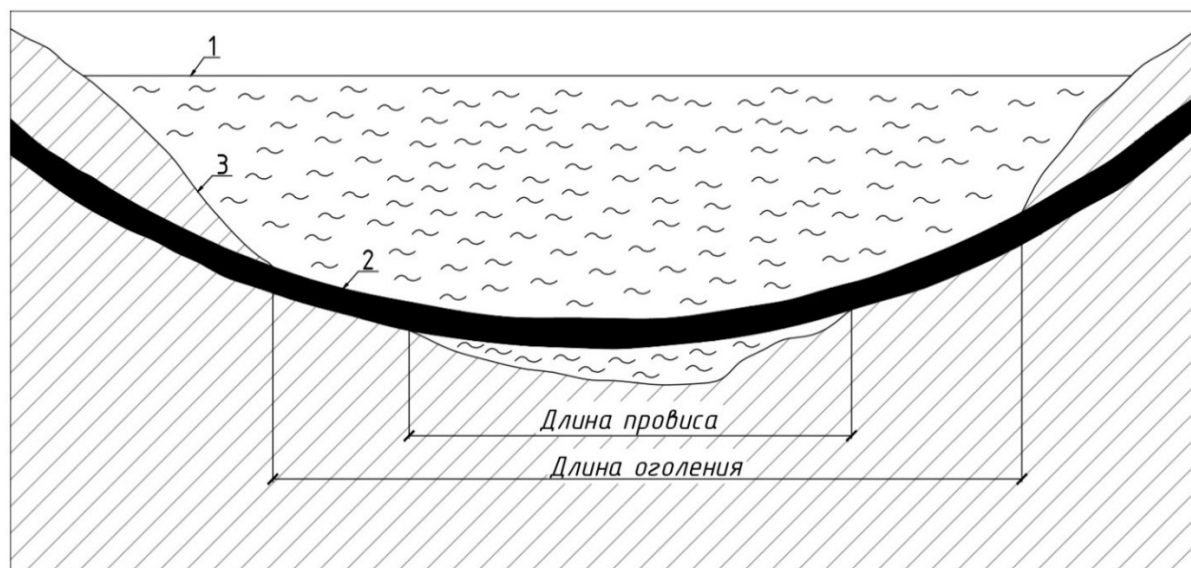


Рисунок 1 – Магистральный трубопровод в условиях оголения и провиса

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

Схемы, поясняющие характер взаимодействия элементов системы «судно-трубопровод» представлены на рисунках 2, 3.

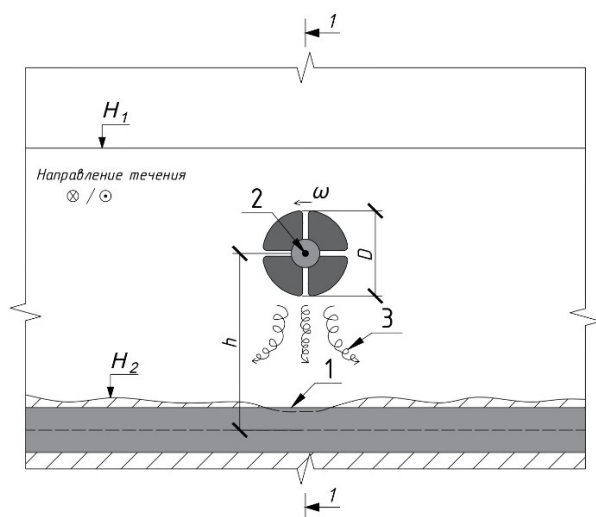


Рисунок 2 – Общая расчетная схема

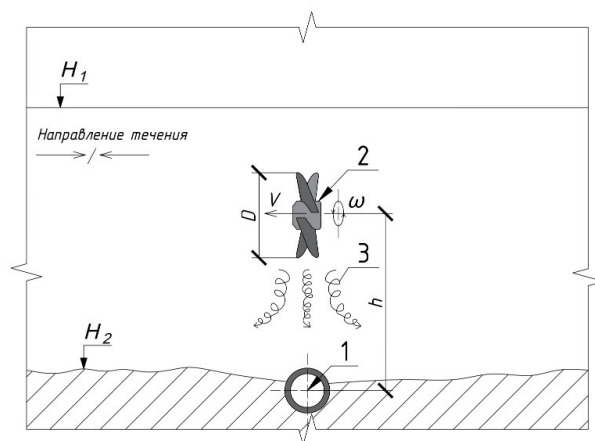


Рисунок 3 – Сечение 1 – 1

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 с помощью применения таких физических величин, 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 [1, 2].

На первом этапе происходит процесс фиксации интересующих нас волновых процессов в заданной области с помощью установленных заранее индикаторов. Для этого в математической модели создаются несколько горизонтальных сечений Γ_i , расположенных под винтом и несколько произвольных объёмов 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.

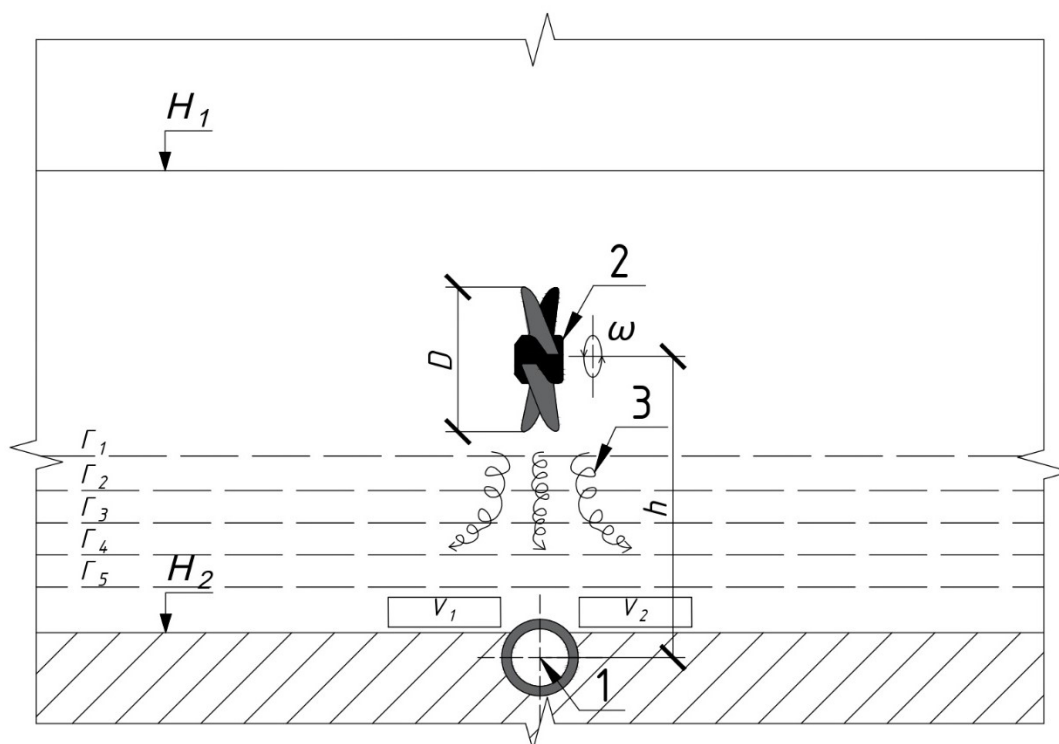


Рисунок 4 – Схема размещения контрольных индикаторов

В процессе расчета модели осуществляется мониторинг изменения максимальной скорости течения жидкости в пределах каждого индикатора при разной скорости вращения гребного винта. На выходе мы получаем график изменения во времени максимальной скорости движения жидкости в пределах заданной области (индикатора).

Далее, на основе полученных результатов, выполняется построение графика изменения максимальной скорости вихря по глубине при конкретной скорости вращения гребного винта (рис. 5).

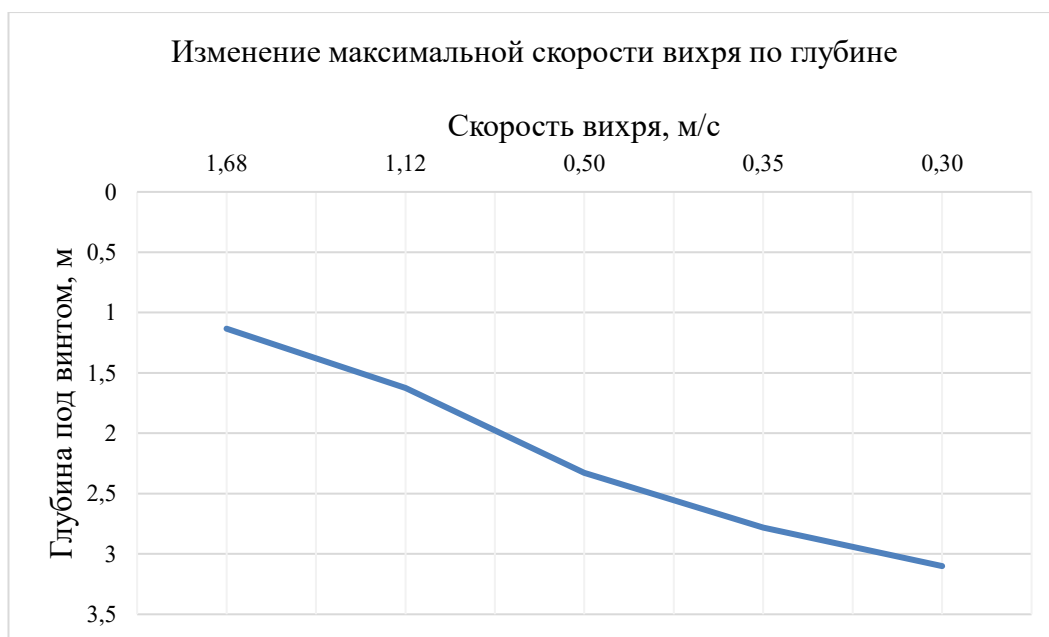


Рисунок 5 – Изменение максимальной скорости вихря по глубине под винтом

Данный график получен 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 скоростей 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 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.

Заключение

Подходы к исследованию системы «судно-трубопровода» на предмет характера и интенсивности русловых переформирований на участке оголенного или провисшего трубопровода – одна из главных задач исследования. В статье данная задача решается в упрощенном виде взаимодействия элементов системы «судно-трубопровод», в частности – в условиях спокойной (стоячей) воды. Волновые процессы могут быть зафиксированы с помощью условных «индикаторов», в качестве которых выступают горизонтальные сечения и произвольные объёмы. Перспектива дальнейших исследований направлена на учет влияния на рассматриваемую систему таких факторов как тип грунта, слагающего русло, скорость и направление естественного течения реки, скорость движения судна и других. Анализ волновых процессов, возникающих при вращении гребного винта, предполагается проводить с применением современных инструментов математического и лабораторного моделирования, в результате чего рассмотренные в статье методические подходы к решению задачи получат свою апробацию.



Список литературы:

1. Katritsis, Demosthenes (2007). «Wall Shear Stress: Theoretical Considerations and Methods of Measurement». Progress in Cardiovascular Diseases. 49 (5): 307 – 329.
2. Hibbeler, R.C. (2004). Mechanics of Materials. New Jersey USA: Pearson Education. p. 32. ISBN 0-13-191345-X
3. Howell, Kenneth B. Principles of Fourier Analysis. — CRC Press, 2001. — ISBN 978-0-8493-8275-8.
4. R. Courant, K. Friedrichs, H. Lewy. Über die partiellen Differenzengleichungen der mathematischen Physik // Mathematische Annalen. — 1928. — Т. 100, № 1. — С. 32 — 74.
5. Patankar S. Numerical methods for solving problems of heat transfer and fluid dynamics / Per. from English. – М.: Energoatomizdat, 1984. – 152 p.
6. 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.

