

УДК 004.942

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ СУДНА НА РУСЛОВОЙ ПРОЦЕСС В КАНАЛЕ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРАВЛИКИ ПОТОКА

Герасимов Сергей Сергеевич<sup>1</sup>, аспирант

e-mail: [Gerasimov.s.sergeevich@mail.ru](mailto:Gerasimov.s.sergeevich@mail.ru)

Ситнов Александр Николаевич<sup>1</sup>, доктор технических наук, профессор кафедры водных путей и гидротехнических сооружений

e-mail: [stnv1952@rambler.ru](mailto:stnv1952@rambler.ru)

<sup>1</sup> Волжский государственный университет водного транспорта, 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 судоходных каналов, что сопровождается отсутствием естественного течения, основным фактором, влияющим на размыв дна канала, является судоходство. Главным образом на донную эрозию оказывает влияние стеснение площади живого сечения русла и работа гребных винтов. Оценить влияние судоходства 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 с разной скоростью движения.

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

## DETERMINATION OF A SAFE SPEED MODE FOR A VESSEL MOVING ALONG A CANAL USING MATHEMATICAL MODELING

Sergey S. Gerasimov<sup>1</sup>, Doctoral student

e-mail: [Gerasimov.s.sergeevich@mail.ru](mailto:Gerasimov.s.sergeevich@mail.ru)

Aleksandr N. Sitnov<sup>1</sup>, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Waterways and Hydraulic Structures

e-mail: [stnv1952@rambler.ru](mailto:stnv1952@rambler.ru)

<sup>1</sup> Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

**Abstract.** Currently, a single deep-water system (SDWS) exists and functions on the territory of the Russian Federation, including a large number of shipping rivers and canals. Some of them are crossed by main pipelines, which, as practice shows, are often located at a shallow depth, which

subsequently leads to deviations in the planned-elevation position of the pipeline. Due to the regulation of shipping channels, which is accompanied by the absence of natural flow, the main factor affecting the erosion of the channel bottom is shipping. Bottom erosion is mainly affected by the constraint of the cross-sectional area of the channel and the operation of propellers. The impact of shipping 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 vessel of project 507G-020-012 along the channel at different speeds.

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

### Методические подходы к решению поставленной задачи

Для определения безопасного скоростного режима движения судов в канале была разработана математическая модель, которая принципиально состоит из двух элементов: судно и физический континуум (канал). Судно состоит из корпуса и двух движителей (гребных винтов), внешний диаметр винтов 1,8 м. Физический континуум представляет собой канал протяженностью 500-2000 м, шириной 50 м, глубиной 4,5.

В качестве расчетного судна используется 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.

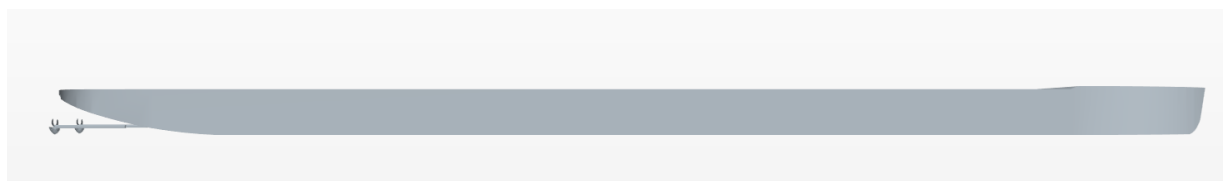
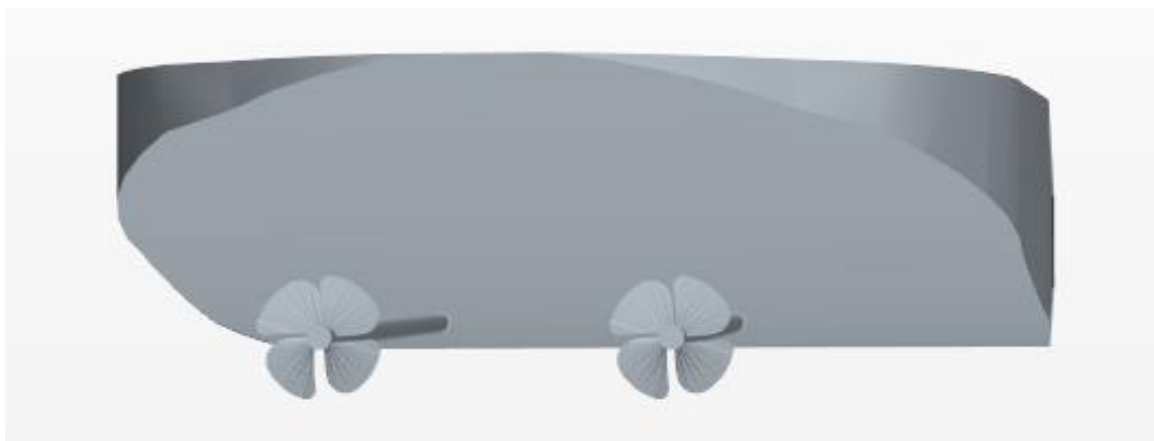
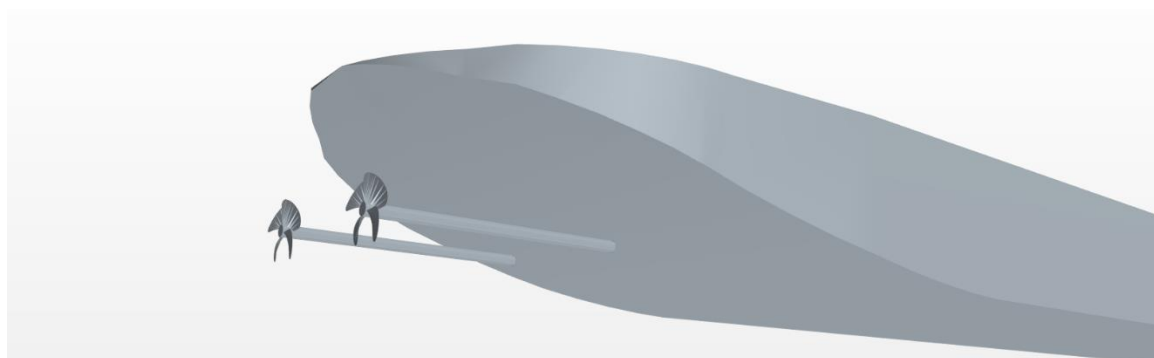


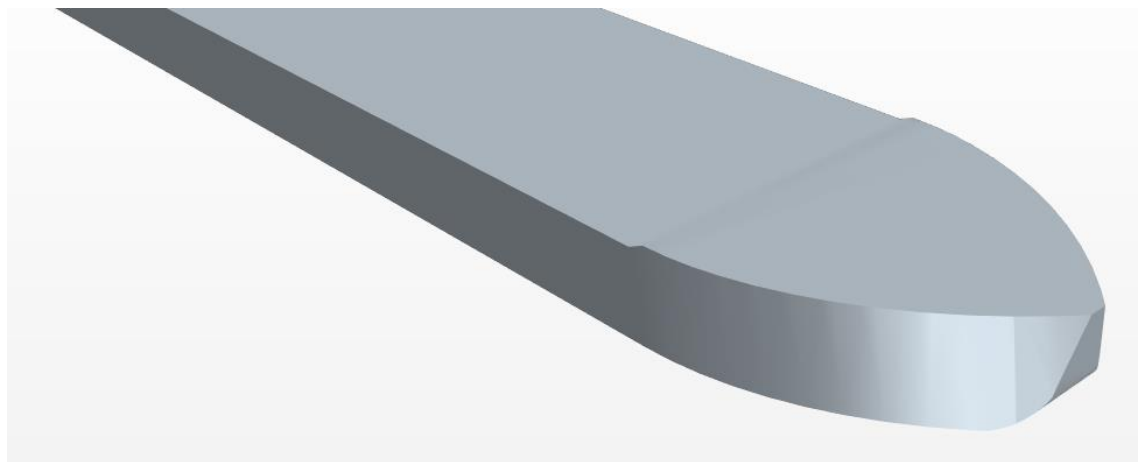
Рисунок 1 – Общая конфигурация судна



*Рисунок 2 – Корма судна с гребными винтами*

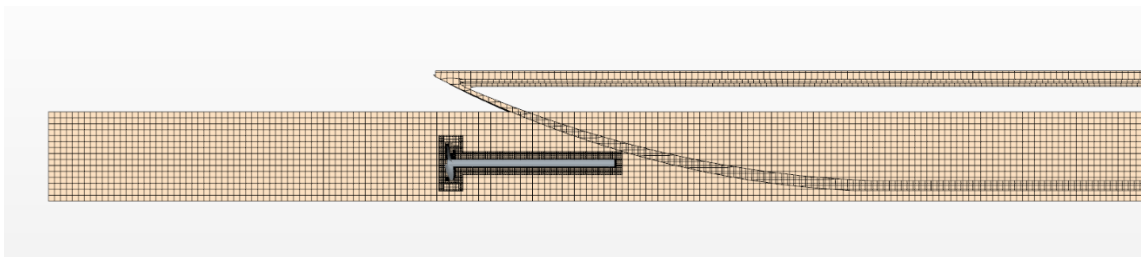


*Рисунок 3 – Корма судна*

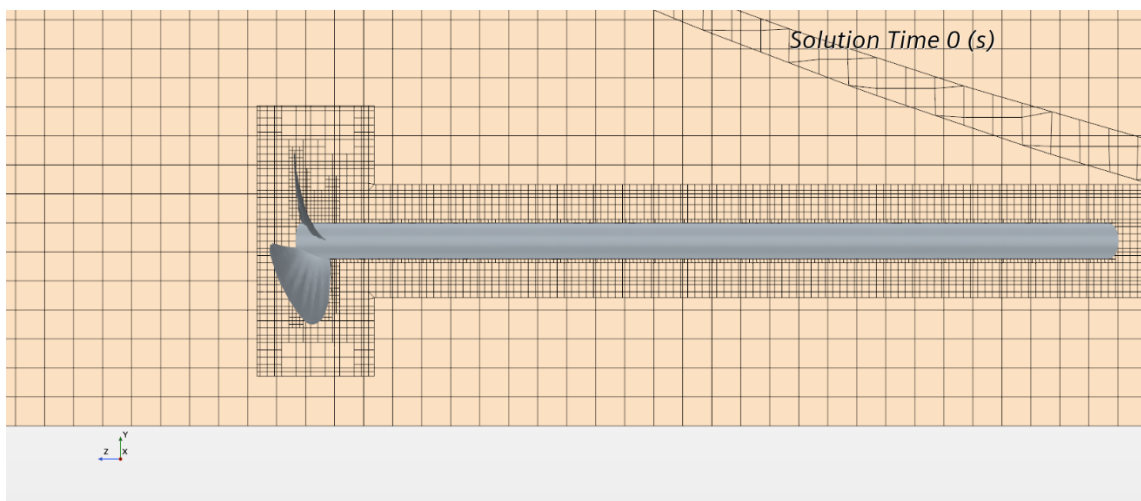


*Рисунок 4 – Носовая часть судна*

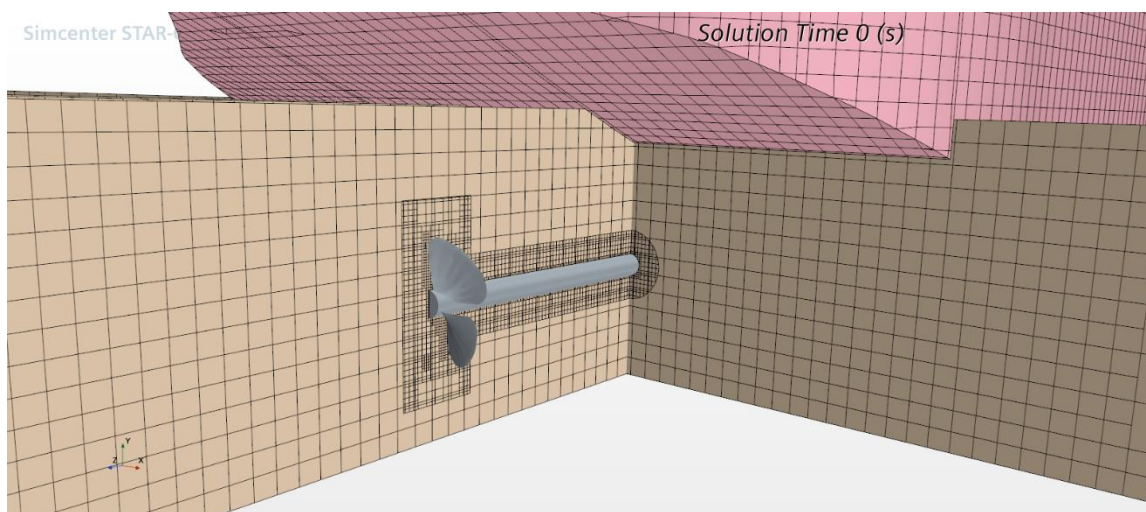
Для каждого элемента модели была сгенерирована прямоугольная объёмная сетка, которая представлена на рисунках 5-7.



*Рисунок 5 – Объемная сетка (корма)*



*Рисунок 6 – Расчетная объемная сетка (гребной винт)*



*Рисунок 7 – Расчетная объемная сетка (корма судна)*

Для математического моделирования движения судна была определена взаимосвязь скорости хода судна и скорости вращения его движителей. Такая взаимосвязь имеет вид кривой, которая строится на основе результатов тяговых расчетов. Для судна проекта 507Г-020-012 такая зависимость уже имеется и представлена на рисунке 8.

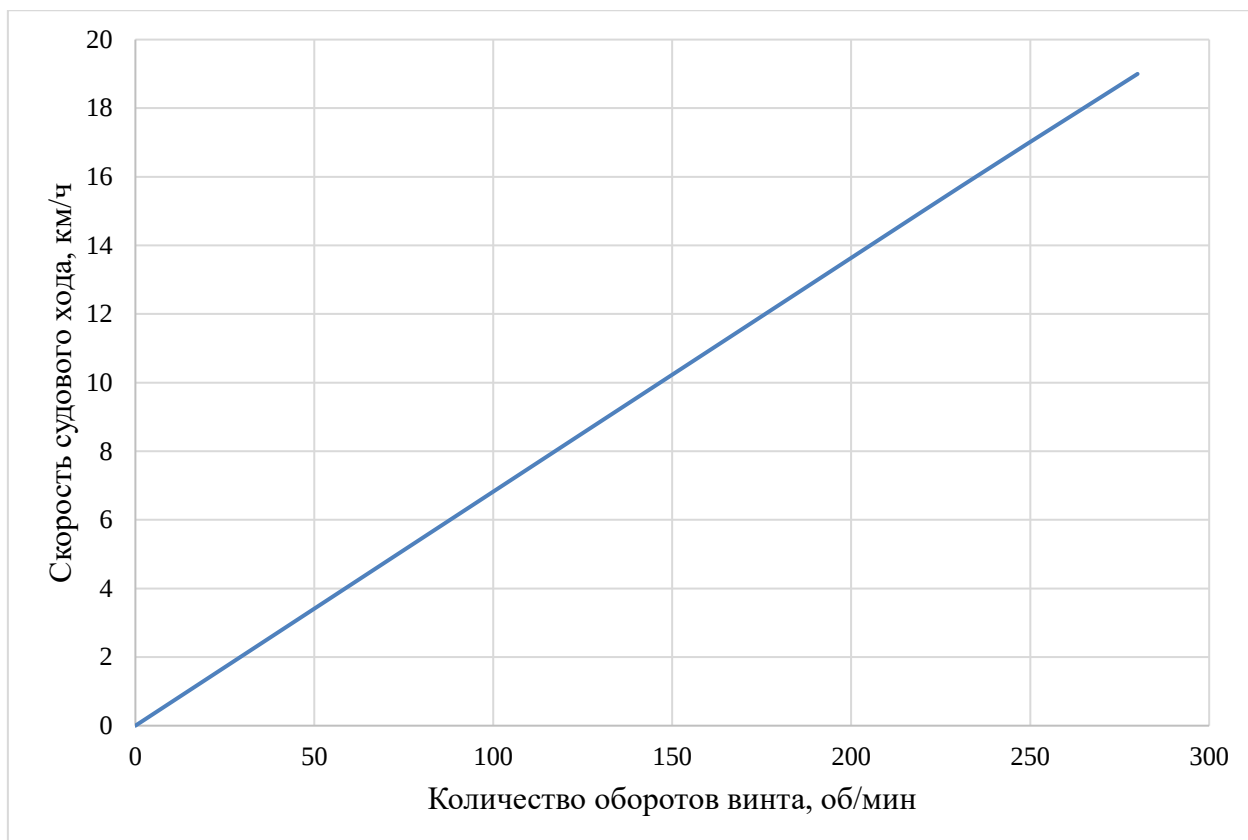


Рисунок 8 – Зависимость  $V_c = f(\omega_v)$

По данному графику были получены значения скорости движения судна на тихой воде при конкретной скорости вращения гребного винта. Значения скоростей, используемые в вариациях М1-М5, представлены в таблице 2.

Таблица 2. Значения скорости движения судна при разных скоростях вращения винта

| Собственная скорость судна,<br>км/ч | Обороты винта, об/мин | Обороты винта, рад/с |
|-------------------------------------|-----------------------|----------------------|
| <b>0,60</b>                         | <b>8,70</b>           | <b>0,91</b>          |
| <b>1,00</b>                         | <b>14,59</b>          | <b>1,53</b>          |
| <b>2,50</b>                         | <b>36,68</b>          | <b>3,84</b>          |
| <b>4,00</b>                         | <b>58,77</b>          | <b>6,15</b>          |
| <b>10,00</b>                        | <b>147,14</b>         | <b>15,41</b>         |

На основе данных, приведенных в таблице 2, было разработано и рассчитано несколько вариаций математической модели: М1-М5, каждая из которых имитировала движение судна в канале с заданной скоростью [4]. Цель данного математического моделирования – исследование гидродинамических процессов, возникающих вблизи дна канала при прохождении по нему судов. Для исследования гидродинамических процессов, возникающих вблизи дна канала, был создан контрольный индикатор – плоское сечение, расположенное на расстоянии 0,2 м от дна канала.

В процессе моделирования программа фиксировала максимальную скорость движения воды  $V_{max}$  в заданном контрольном индикаторе. Полученные результаты позволяют сделать выводы об изменении скорости движения воды вблизи дна канала в процессе прохождения судна.

## Результаты

В результате выполнения математического моделирования были получены графики изменения максимальной скорости течения вблизи дна канала при разной скорости движения судна. Графики приведены на рисунке 9.

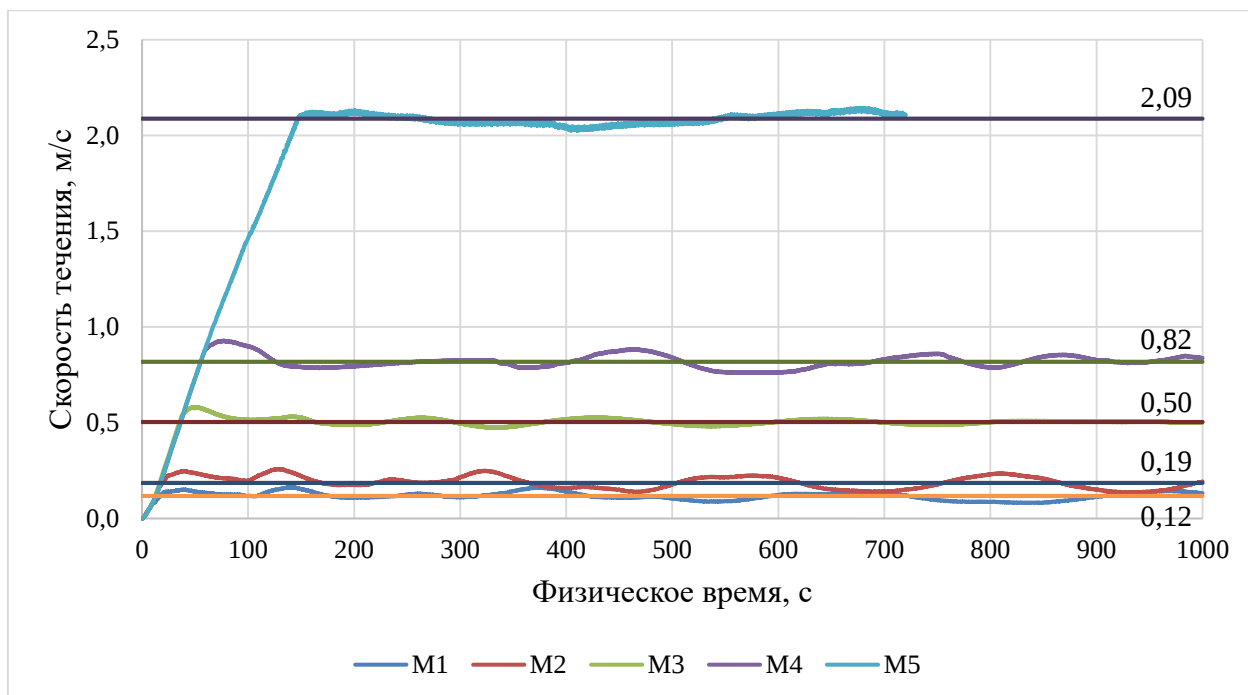


Рисунок 9 – Графики изменения скорости течения вблизи дна канала

По данным графикам, с помощью осреднения, были определены средние значения скорости течения вблизи дна канала и представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты математического моделирования

| Вариация модели | Скорость судна $V_c$ , км/ч | Максимальная скорость течения вблизи дна канала, м/с |
|-----------------|-----------------------------|------------------------------------------------------|
| M1              | 0,61                        | 0,12                                                 |
| M2              | 1,01                        | 0,19                                                 |
| M3              | 2,48                        | 0,50                                                 |
| M4              | 4                           | 0,82                                                 |
| M5              | 10                          | 2,09                                                 |

По полученным значениям была определена аналитическая зависимость скорости течения, возникающей вблизи дна канала, от скорости движения судна. Зависимость приведена на рисунке 10.

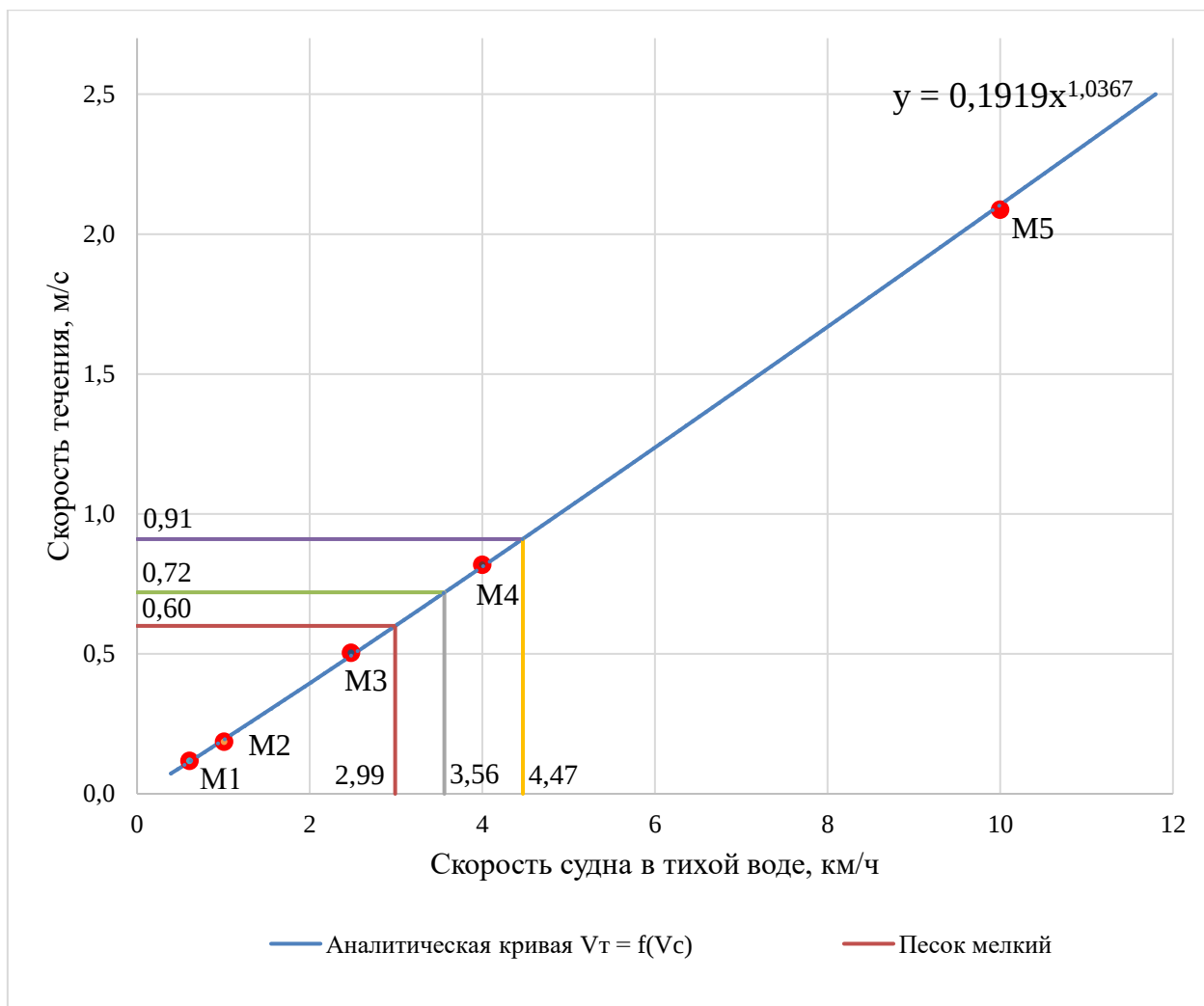


Рисунок 10 – Аналитическая зависимость  $v_t = f(v_c)$  с нанесенными экспериментальными значениями

Дополнительно на график нанесены значения допустимых неразмывающих скоростей движения воды для мелких (0,60 м/с), среднезернистых (0,72 м/с) и крупных (0,91 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» [5].

По полученной аналитической кривой были определены максимальные безопасные скорости движения судна, их значения представлены в таблице 4.

Таблица 4. Допустимые безопасные скорости движения судна по каналу

| Неразмывающая скорость, м/с<br>(глубина потока Н=4,5 м) | Безопасная скорость судна, км/ч |
|---------------------------------------------------------|---------------------------------|
| <b>Песок крупный</b>                                    |                                 |
| 0,91                                                    | 4,47                            |
| <b>Песок средней крупности</b>                          |                                 |
| 0,72                                                    | 3,56                            |
| <b>Песок мелкий</b>                                     |                                 |
| 0,6                                                     | 2,99                            |

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 допустимое максимальное значение. В отдельных областях модели значение критерия CFL было приближено к 1. Данное значение является идеальным [7, 8].

### Заключение

По результатам математического моделирования гидравлики потока при заданной скорости движения судна по каналу на тихой воде, получены следующие результаты:

- Допустимая безопасная скорость движения судна по каналу, сложенному преимущественно мелкими песками, составляет 2,99 км/ч;
- Допустимая безопасная скорость движения судна по каналу, сложенному преимущественно среднезернистыми песками, составляет 3,56 км/ч;
- Допустимая безопасная скорость движения судна по каналу, сложенному преимущественно крупными песками, составляет 4,47 км/ч.

### 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](http://вф-река-море.рф/2024/6_4.pdf)
3. Сухогрузный теплоход, проект 507Г-020-012
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. 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).
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. – 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](#)

