

УДК 656.6

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СКОРОСТНОГО РЕЖИМА ДВИЖЕНИЯ СУДОВ НА
ИНТЕНСИВНОСТЬ ДОННОЙ ЭРОЗИИ В КАНАЛЕ РАЗНОЙ ГЛУБИНЫ****Герасимов Сергей Сергеевич¹**, аспирант кафедры ВПиГС*e-mail:* Gerasimov.s.sergeevich@mail.ru**Ситнов Александр Николаевич¹**, профессор, д.т.н.*e-mail:* stnv1952@rambler.ru¹ Волжский государственный университет водного транспорта, Нижний Новгород, Россия

Аннотация. Магистральные трубопроводы, пересекающие судоходные реки и каналы, зачастую имеют небольшую глубину заложения, что впоследствии может привести к возникновению отклонения планово-высотного положения трубопровода. Одним из основных факторов, влияющих на деформацию дна судоходного канала, является скорость движения судов, оценка которой выполнена с использованием методов математического моделирования. В работе представлены результаты математического моделирования движения судов и связи их скорости с русловыми деформациями.

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

**ASSESSMENT OF THE IMPACT OF VESSEL SPEED ON THE INTENSITY OF
BOTTOM EROSION IN A CHANNEL OF DIFFERENT DEPTHS****Sergey S. Gerasimov¹**, Doctoral student*e-mail:* Gerasimov.s.sergeevich@mail.ru**Aleksandr N. Sitnov¹**, Professor, Doctor of Technical Sciences*e-mail:* stnv1952@rambler.ru¹ Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. Main pipelines crossing shipping rivers and canals are often buried at shallow depths, which can subsequently lead to deviations in the pipeline's planned elevation. One of the main factors influencing channel bed deformation is vessel speed, which was estimated using mathematical modeling methods. This paper presents the results of mathematical modeling of vessel movement and the relationship between vessel speed and channel deformation.

Keywords: shipping safety, mathematical modeling, computational fluid dynamics, shipping channel.

Определить безопасный скоростной режим движения судов и составов по каналу возможно с помощью результатов расчета разработанной математической модели, которая принципиально состоит из двух элементов: судна типа «Волго-Дон» и канала, имеющего прямоугольное поперечное сечение. Технические характеристики канала: длина варьируется от 500 до 2000 м, ширина 50,1 м, глубина: 4,5, 5, 5,5, 7 и 10 м. Для учета турбулентности, возникающей в расчетной области при движении судна и работе гребных винтов, используется модель турбулентности $K - \epsilon$ [1].

Связь скорости судна в условиях отсутствия естественного течения и частоты вращения его движителей имеет вид кривой, которая строится по результатам специальных тяговых расчетов.

Математическая модель рассчитана в различных вариациях, которые отличаются между собой лишь глубиной канала и скоростью движения судна. Вариации именуются М1-М5 в зависимости от скорости судна. Для фиксации придонной скорости (на расстоянии 10 см от дна) создан специальный индикатор в виде плоского сечения, параллельного горизонту.

Проведенными расчетами определены осредненные значения максимальной скорости течения вблизи дна канала v_{max} при разных соотношениях осадки судна к глубине потока Т/Н, 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 1.

Таблица 1. Результаты математического моделирования

Вариация модели	Скорость судна V_c		Максимальная скорость течения вблизи дна канала				
			$v_{max}, \text{ м/с} / \frac{v_{max}}{v_c}$				
			Глубина канала, м ($K_{ст}, \Omega$)				
	м/с	км/ч	4,5 ($K_{ст}=0,78,$ $\Omega=0,26$)	5,0 ($K_{ст}=0,70,$ $\Omega=0,23$)	5,5 ($K_{ст}=0,64,$ $\Omega=0,21$)	7,0 ($K_{ст}=0,50,$ $\Omega=0,17$)	10,0 ($K_{ст}=0,35,$ $\Omega=0,12$)
М1	0,17	0,61	0,12/0,71	0,09/0,53	0,07/0,41	0,05/0,29	0,03/0,18
М2	0,28	1,01	0,19/0,68	0,15/0,54	0,13/0,46	0,08/0,29	0,05/0,18
М3	0,69	2,48	0,50/0,72	0,35/0,51	0,30/0,43	0,20/0,29	0,12/0,17
М4	1,11	4	0,82/0,74	0,58/0,52	0,49/0,44	0,33/0,30	0,19/0,17
М5	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 1 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 1).

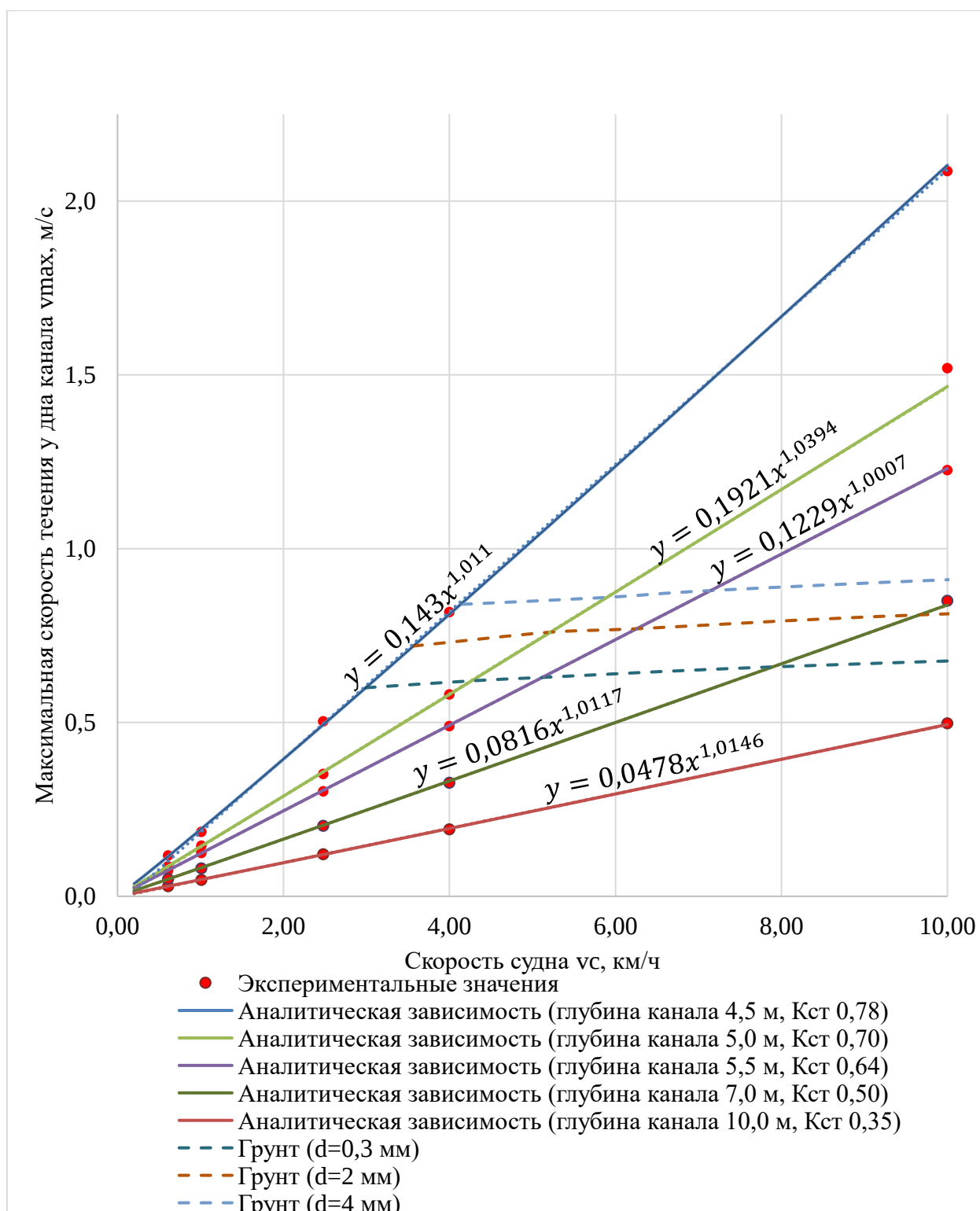


Рисунок 1 – Аналитические зависимости $v_{max} = f(v_c)$ при разных $K_{ст}$

Из данных таблицы 1 и рисунка 1 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.

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 , $K_{ст}$ и Ω в основном определяет скорость течения у дна v_{max} (множественный коэффициент корреляции 0,93).

Пользуясь нормативными материалами [2], в таблице 2 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 [3]. Приравнивая их к величине v_{max} можно по аналитическим зависимостям, (рисунок 1) получить безопасную для размыва грунта скорость судна $v_{без}$ (таблица 2).

Таблица 2. Безопасные скорости движения судна по каналу разной глубины

Вид грунта	Глубина потока Н, м	Коэффициент стесненности $K_{ст}$	Допустимая неразмывающая скорость потока, м/с	Безопасная скорость судна $v_{без}$	
				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 [4].

Исследование установило, что доминирующим фактором, определяющим скорость течения у дна канала при движении судна, является скорость движения судна, а вот отношение осадки судна к общей глубине потока Т/Н влияет незначительно. 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 Т/Н=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. (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>
2. 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).
3. Гришанин К.В., Сорокин Ю.И. Гидрология и водные изыскания. Учебник для вузов/Под ред. К.В. Гришанин. – М.: Транспорт, 1982 – 212 с.
4. R. Courant, K. Friedrichs, H. Lewy. Über die partiellen Differenzengleichungen der mathematischen Physik // Mathematische Annalen. — 1928. — Т. 100, № 1. — С. 32—74.

