

УДК 626.122:556.536.5:519.876.5

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УЧАСТКА 140-156 КМ ВКМСК С
ОПРЕДЕЛЕНИЕМ ХАРАКТЕРИСТИК ПОТОКА ВЛЕКОМЫХ НАНОСОВ И
ОЦЕНКОЙ ВАРИАНТОВ РЕШЕНИЙ ПОВЫШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ КАНАЛА****Решетников Максим Алексеевич¹**, доцент, кандидат технических наук*e-mail:* serfskiwind@gmail.com**Воронина Юлия Евгеньевна¹**, доцент, кандидат технических наук*e-mail:* yulez@ya.ru¹ Волжский государственный университет водного транспорта, Нижний Новгород, Россия

Аннотация. В статье рассматривается математическое моделирование русловых процессов на участке 140–156 км ВКМСК с целью определения характеристик потока влекомых наносов. На основе выполненного моделирования проведена оценка эффективности предлагаемых вариантов повышения устойчивости канала. Полученные результаты позволяют определить наиболее эффективные инженерные решения, направленные на обеспечение устойчивого функционирования канала, повышение его пропускной способности и снижение эксплуатационных затрат.

Ключевые слова: Волго-Каспийский морской судоходный канал (ВКМСК), заносимость судоходных каналов, влекомые наносы, транспорт наносов, гидродинамическое моделирование, деформации дна.

**MATHEMATICAL MODELING OF THE 140-156 KM VKMSK SECTION WITH
DETERMINATION OF THE CHARACTERISTICS OF THE ENTRAINED SEDIMENT
FLOW AND ASSESSMENT OF SOLUTIONS FOR IMPROVING THE STABILITY OF
THE CHANNEL****Maksim A. Reshetnikov¹**, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences*e-mail:* serfskiwind@gmail.com**Yulia E. Voronina¹**, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences*e-mail:* yulez@ya.ru¹ Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. This paper presents the mathematical modeling of channel processes along the 140–156 km section of the Volga-Caspian Sea Shipping Canal aimed at determining the characteristics of the bed-load sediment transport. Based on the modeling results, the effectiveness of the proposed measures for improving channel stability is assessed. The obtained results make it possible to identify the most effective engineering solutions to ensure the stable operation of the canal, increase its conveyance capacity, and reduce maintenance and operational costs.

Keywords: Volga-Caspian Sea Shipping Canal (VCSSC), navigation channel siltation, bed load transport, sediment transport, hydrodynamic modeling, channel bed deformations.

Волго-Каспийский морской судоходный канал относится к числу крупнейших гидротехнических объектов России и является ключевым элементом транспортной инфраструктуры Каспийского региона, обеспечивая реализацию стратегических экономических интересов государства. В настоящее время состояние канала определяет возможность реализации ряда экономических и геополитических интересов государства, включая освоение нефтяных месторождений Каспийского моря российскими компаниями, транспортировку углеводородов как добытых на шельфе, так и проходящих транзитом в другие бассейны, развитие судоходства и судоходных путей, входящих в состав трансконтинентальных транспортных коридоров, формирование рыбных запасов и нерестовой миграции ценных видов рыб.

Интенсивное накопление наносов в пределах ВКМСК обусловлено расположением канала в области взаимодействия речных и морских потоков наносов. Главным фактором, определяющим масштабы заносимости, является объем влекомых и взвешенных наносов, транспортируемых вдоль канала. Понимание и учет объема наносов критически важны для решения задачи поддержания судоходных условий на канале, а знание объема и характера транспорта наносов позволяет прогнозировать возможные деформации на ВКМСК.

Одним из затруднительных участков ВКМСК является отрезок канала с 140-го по 156-й км. Ситуационная схема канала представлена на рисунке 1. Основные проблемы участка канала на 141–155 км обусловлены сложными гидрологическими процессами, возникающими при выклинивании потока канала в морскую часть. После поворота на 151 км наблюдается заносимость восточной части канала. Стесненные условия на поворотном участке в совокупности с недостаточными глубинами создают трудности для прохождения грузового флота.



Рисунок 1 – Ситуационный план исследуемого участка ВКМСК

Задача исследования состоит из двух этапов. На первом этапе необходимо качественно определить структуру потока. На втором этапе на основе результатов гидравлического моделирования определяется движение влекомых наносов. Для исследования гидравлики потока и донных наносов используется математическое моделирование. Авторами уже проведено много исследований и наработана «дорожная карта» по моделированию потока [1, 2]. Гидродинамика исследуемого участка воспроизводится посредством трехмерного численного моделирования, основанного на решении осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье—Стокса [3, 4]. Начальным этапом исследования являлось построение расчетной области, адекватно воспроизводящей морфологические особенности исследуемого участка канала. Результаты моделирования гидравлики потока в естественном состоянии представлены на рисунках 2-4.

На основании теоретических положений Г.И. Шамова о механизме движения влекомых наносов, а также с использованием рассчитанных осреднённых по глубине скоростей течения и имеющихся данных о гранулометрическом составе и физико-механических свойствах донных грунтов, выполняется построение распределения расхода влекомых наносов на исследуемом участке канала.

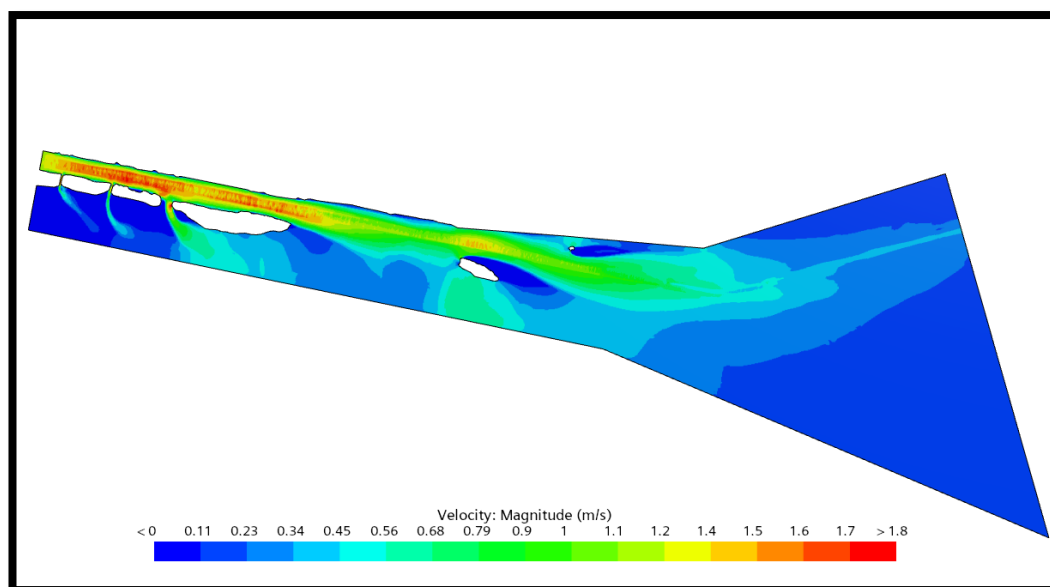


Рисунок 2 – Распределение поверхностных скоростей потока на исследуемом участке ВКМСК в естественном состоянии

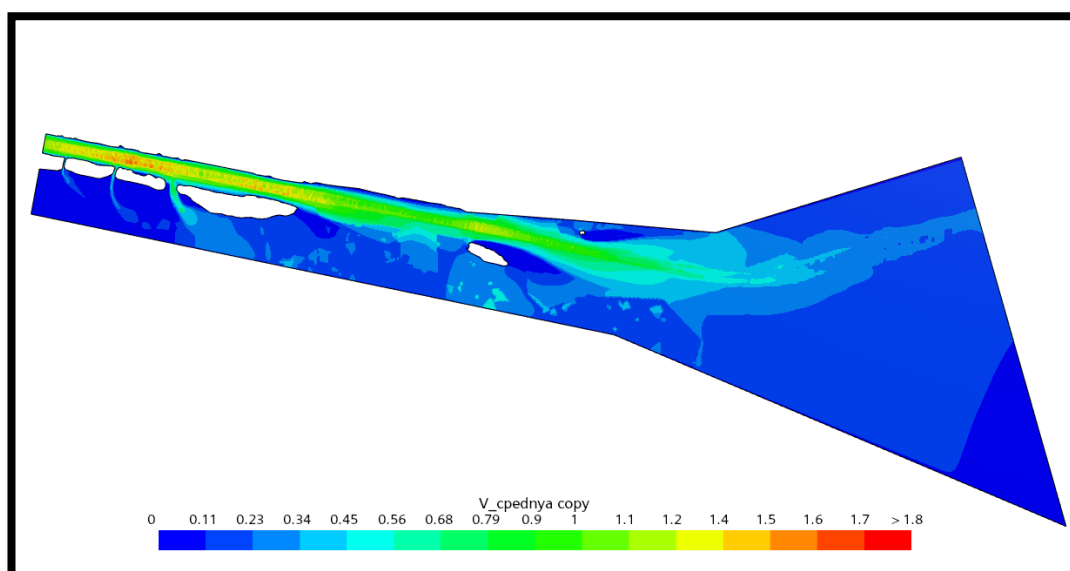


Рисунок 3 – Распределение осредненных скоростей потока по глубине на исследуемом участке ВКМСК в естественном состоянии

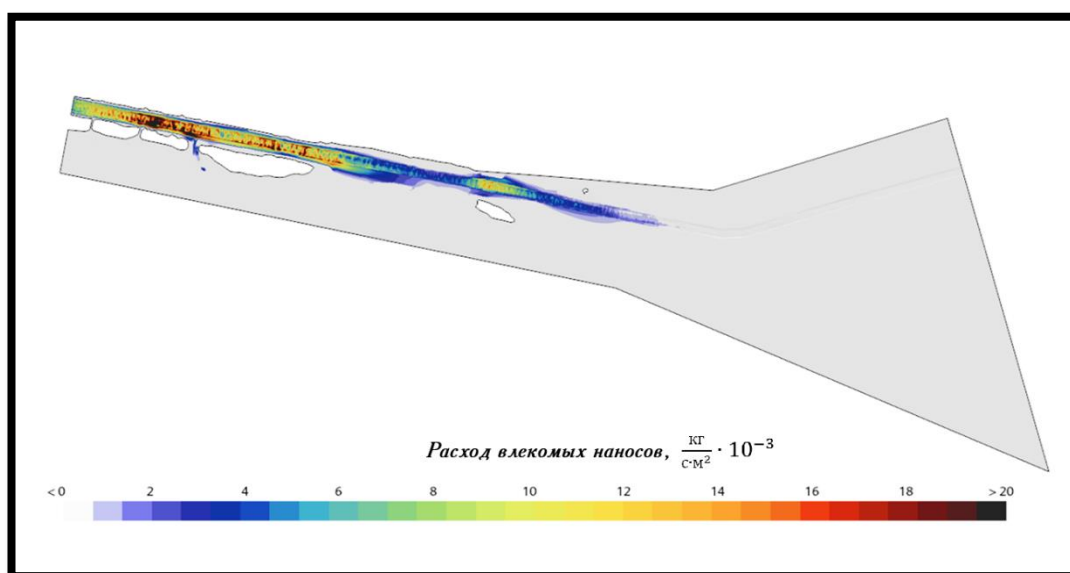


Рисунок 4 – Распределение расхода влекомых наносов на исследуемом участке ВКМСК в естественном состоянии

Наиболее рациональные технические решения для улучшения условий на данном участке должны обеспечивать решение следующих задач: – равномерное распределение расхода по ширине русла при переходе в морскую часть;

- перехват взвешенных и влекомых наносов до входа в поворотный участок;
- выравнивание кривой средних скоростей по длине канала;
- снижение интенсивности транспортировки влекомых наносов на участках, подверженных деформациям дна;
- увеличение расхода воды в поперечных сечениях канала начиная с 150 км.

Для улучшения условий на данном участке рассматриваются следующие основные варианты и их комбинации (рисунок 5):

1. Устройство отводящего канала для наносов в юго-западном направлении.

2. Разработка западного (правобережного) острова между 147-148 км.

3. Подрезка канала на поворотном участке 151 км.

На основании распределения поверхностных скоростей следует выделить три зоны по длине канала:

1. Зона №1 с 141 по 145 км. Характеризуется высокими значениями скоростей в суженном участке. На этом участке острова «канализируют» поток, что вызывает высокие значения скоростей до 1,8 м/с. Наиболее ярко выражен стрежень потока.

2. Зона №2 с 145 по 150 км. После выхода из зоны островов поток начинает расширяться (растекаться), а скорости постепенно снижаются. Наличие острова на 147,5 км вызывает локальный скачок скоростей в канале. На этом участке скорости снижаются до 0,8 м/с.

3. Зона №3 с 150 по 155 км. Растекание потока по морской части приводит к интенсивному снижению скорости потока в канале и исчезновению основной струи, ранее поддерживаемой островами.

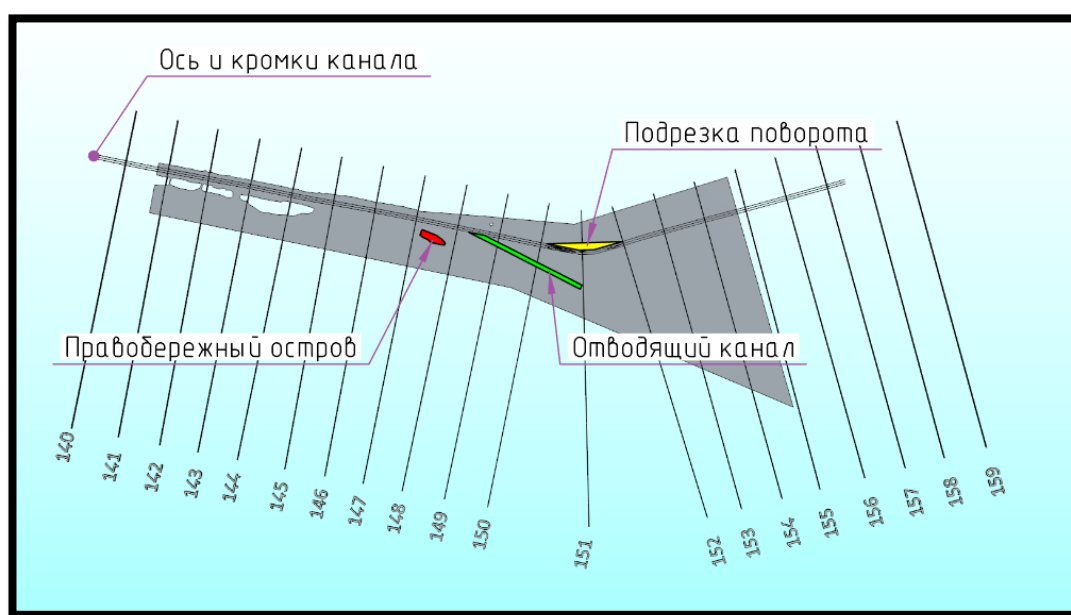


Рисунок 5 – План-схема вариантов улучшения судоходных условий на 140-156 км ВКМСК

Анализ распределения средних скоростей показывает, что отводящий канал в рассматриваемой конфигурации лишь незначительно влияет на перераспределение потока в плане. Основной стрежень потока практически не изменяет своего положения.

Существенное изменение в скоростном поле происходит при разработке правобережного острова. Разработка острова позволяет потоку начиная уже с 144,5 км получить свободу на плановую растекаемость. В результате снижается экстремальное значение скоростей в районе острова, что должно привести к уменьшению интенсивности русловых переформирований как в его пределах, так и ниже по течению.

Подрезка поворотного участка снижает гидравлическое сопротивление канала, дополнительно привлекая часть расхода в эту область. Такой вариант планового спрямления течения выравнивает стрежень потока по сравнению с естественной конфигурацией и уменьшает циркуляционную зону за поворотом. Спрямоление потока способствует снижению интенсивности заносимости после поворотного участка.

Наиболее оптимальным решением с точки зрения изменения гидравлики потока является вариант, предусматривающий подрезку поворота и разработку острова в районе 147,5 км.

Разработка острова существенно снижает расход влекомых наносов в зоне №2. Это свидетельствует о снижении интенсивности деформаций ложа канала и повышении устойчивости русловых процессов на данном участке.

В свою очередь, отводящий канал перехватывает часть влекомых наносов лишь на небольшом промежутке до 149,2 км. Для эффективного отвода наносов потребовалось бы перенаправление в него большего расхода воды, что привело бы к снижению проточности в нижерасположенных сечениях канала и, как следствие, к увеличению их заносимости. Таким образом, перенаправление значительной части потока в отводящий канал не является рациональным техническим решением.

Подрезка поворота на 151 км практически не влияет на общую картину распределения влекомых наносов.

Наиболее рациональным и гидродинамически обоснованным вариантом является сочетание двух мероприятий:

- удаления острова на 147,5 км;
- подрезки поворотного участка на 151 км канала.

Совокупное применение данных мер обеспечивает снижение размыва в верхнем участке (147–148 км), уменьшает объем наносов, поступающих ниже по течению, а также способствует перераспределению и концентрации расхода потока в пределах границ канала. Это приводит к снижению и стабилизации заносимости нижележащих участков канала.

В целом такое решение может уменьшить заносимость участка примерно на 10,6 % по сравнению с естественным состоянием и создать лучшие условия для прохождения судов, связанные с потенциальной возможностью уширения канала на участке подрезки поворота и организации на нем и ниже двухстороннего движения.

Список литературы:

1. Решетников, М. А. Математическое моделирование динамики водного потока и изменения русла в результате разработки карьера "Чермушинское" на 1185-1207 км Р. Волга на основе имеющихся навигационных карт, русловых и спутниковых съемок / М. А. Решетников, Ю. Е. Воронина // Транспорт. Горизонты развития : Труды 5-го Международного научно-промышленного форума, Нижний Новгород-Новосибирск-Владивосток, 20–23 мая 2025 года. – Нижний Новгород: Волжский государственный университет водного транспорта, 2025. – С. 153. – EDN JRLPKC.
2. Исследование влияния строительства мостового перехода через р. Ока (г. Нижний Новгород) на вышерасположенные водоводы с применением математического моделирования руслового потока / М. А. Решетников, А. Н. Ситнов, Ю. Е. Воронина, М. В. Шестова // Морские интеллектуальные технологии. – 2024. – № 4-2(66). – С. 142-146. – DOI 10.37220/MIT.2024.66.4.070. – EDN CBNBLC.
3. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.
4. EL TAHRY, S. H. (1983). k-epsilon equation for compressible reciprocating engine flows. Journal of Energy, 7(4), 345–353. doi:10.2514/3.48086

