

УДК 625.1

К вопросу о воздействии гидродинамических факторов на береговые железнодорожные сооружения

А. А. Воробьев, А. С. Ватаев, Я. С. Ватулин, В. С. Майоров, С. А. Краснобрыжий

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Воробьев А. А., Ватаев А. С., Ватулин Я. С., Майоров В. С., Краснобрыжий С. А. К вопросу о воздействии гидродинамических факторов на береговые железнодорожные сооружения // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 1. — С. 119–130. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-119-130

Аннотация

Цель: Произвести анализ окружающего прибрежного рельефа перспективного с точки зрения развития высокоскоростного движения участка Северо-Кавказской железной дороги и традиционно применяемых на данном участке берегозащитных сооружений, построена трехмерная карта лоции вблизи исследуемого участка. Выполнен компьютерный эксперимент с помощью средств численного моделирования воздействия штормовых волн на берегозащитные сооружения и конструкции железнодорожного пути в районах интенсивного воздействия прибрежных штормовых приливов. Оценены интенсивность воздействия гидродинамических факторов на элементы конструкций и косвенное влияние традиционных берегозащитных сооружений на эрозию берега. **Методы:** Компьютерное моделирование методом гидродинамики сглаженных частиц. **Результаты:** Построена карта распределения скоростей потока и избыточного давления для набегающей и отраженной волны на примере участка берега, получены численные показатели воздействия гидродинамических факторов на береговые сооружения железнодорожного пути. Исследование показало преимущества интеграции указанных сооружений в естественный ландшафт благодаря значительному снижению воздействия отраженных волн на эрозию берега. **Практическая значимость:** Произведен сравнительный анализ воздействия указанных гидродинамических факторов на классическую и альтернативную конструкции нижнего строения пути в прибрежной зоне, обеспечивающую максимальное использование естественной защиты береговой линии.

Ключевые слова: Гидродинамика сглаженных частиц, подпорно-волноотбойные стены, железнодорожные сооружения, нижнее строение пути, эстакада.

Введение

Развитие высокоскоростного транспорта напрямую связано с обеспечением безопасности перевозок. Опыт эксплуатации зарубежных высокоскоростных магистралей в Европе и Японии показывает, что сильный порывистый боковой ветер может стать причиной значительных динамических нагрузок, действующих на движущийся подвижной состав, и, как следствие, вызывать колебания и перемещения надрессорного строения подвижного состава недопустимой амплитуды, приводящие к потере устойчивости и развитию аварийных ситуаций, в частности сходов и опрокидываний подвижного состава. Не менее

важным следствием воздействия ветровых нагрузок меньшей интенсивности на высокоскоростной подвижной состав является возникновение опрокидывающего момента, приводящего к перераспределению нагрузок на контактные поверхности колесных пар, снижению вследствие этого эффективности процесса торможения и повышению вероятности вкатывания реборды колеса на головку рельса. В настоящее время предельно допустимой является неравномерность распределения веса подвижного состава на колесные пары менее 10 %. Данные значения, как показывают результаты исследований, могут быть достигнуты при порывистом боковом ветре, характерном для прибрежных районов, а также долин некоторых рек и скорости подвижного состава порядка 250–300 км/ч. В нашей стране наиболее опасным в плане ветровых нагрузок является перспективный с точки зрения развития высокоскоростного движения участок Туапсе — Адлер Северо-Кавказской железной дороги в районе п. Головинка. Особенностью рельефа данной местности является наличие относительно плоского участка местности длиной 5 км и глубиной 2,4 км в устье реки Шахе, что способствует беспрепятственному разгону воздушных масс (рис. 1). Не менее важной особенностью данной местности является также значительный перепад глубин (более 200 м) в непосредственной близости от береговой линии, что создает условия формирования волн значительной высоты (до 6–8 м), что требует усиления устройства береговой линии. Опыт эксплуатации участка показал, что здесь возможны штормы с высотой волн порядка 8 метров и скоростью ветра до 40 м/с, приводящие к разрушению пути и берегоукрепляющих сооружений.



Рис. 1. Рельеф участка Туапсе — Адлер Северо-Кавказской железной дороги в районе п. Головинка (а) и последствия шторма 26 октября 2024 г. на перегоне Адлер — Хоста (б)

На рассматриваемом участке система берегозащиты традиционно представлена галечными пляжами, бетонными волноотбойными стенами, бунами (каменными или из бетонных блоков) и фасонными массивами.

Волноотбойные стены сооружались для защиты берега от разрушительного воздействия волн с глубокой древности. Первые стены, построенные из простой каменной кладки без фундамента, были недолговечны и быстро разрушались под воздействием стихии. Со временем конструкция этих сооружений претерпела значительные изменения. Современные морские подпорно-волноотбойные стены представляют собой сложные инженерные сооружения из железобетона, обладающие прочным, глубоко заложённым фундаментом и многоступенчатым профилем. Также для улучшения эксплуатационных характеристик фасада стены могут оснащаться стеклопластиковыми панелями.

Подпорно-волноотбойная стена выполняет двойную функцию:

1. Принимает на себя воздействие волн, предотвращая размыв земляного полотна железной дороги со стороны моря.
2. Служит подпорным сооружением с нагорной стороны, предотвращая осыпание грунта под воздействием вибраций от движения поездов и естественных оползневых явлений.

Строительство волноотбойных стен из железобетона считалось оптимальным решением для защиты береговой линии и обосновывалось заменой податливых к эрозии пород более прочным материалом [1]. Однако этот подход не всегда эффективен: практический опыт показал, что на некоторых участках волноотбойные стены выходят из строя менее чем через 15 лет эксплуатации. Анализ разрушений на таких участках выявил усадку отдельных бетонных блоков под действием собственного веса, вызванную подмывом основания стены. В ряде случаев это приводило к их обрушению в сторону моря. На участках, характеризующихся продольным перемещением наносов при отсутствии бун, были зафиксированы также случаи образования сквозных щелей высотой до 0,4 м с последующим вымыванием грунта из-за стены и ее опрокидыванием в сторону суши [2].

Данные явления возникают ввиду нескольких причин, одной из которых является то, что в результате работы стен происходит размыв и сокращение ширины пляжа. На некоторых участках рассматриваемого пути пляж имеет ширину всего 5–7 м (например, на перегоне Мамедова Щель — Лазаревское), при этом сочетание приглубокого берега и галечных наносов способствует усилению гидродинамического ударного воздействия волн, особенно на уровне половины высоты прилива, и в некоторых случаях такое воздействие может превышать допустимые нагрузки для железобетонных конструкций, о чем свидетельствует характер разрушений. Кроме того, при ударе волны о стену мгновенно возникает сильный обратный поток, увлекающий за собой гальку и песок на глубину. Скорость этого потока может значительно превышать скорость течения в отсутствие стены, что приводит к усиленному размыву пляжа, деградация которого, в свою очередь, усиливает эрозионные процессы

на подводном склоне, что и ведет к деформации стены, снижению ее эксплуатационных характеристик и, как следствие, — деформации и даже разрушению железнодорожной насыпи.

В свою очередь, сам пляж также служит естественной защитой, постепенно рассеивая энергию накатывающихся волн без образования отраженной волны. Поэтому метод организации берегозащиты в виде интеграции инженерных сооружений в естественный рельеф является перспективным и востребованным, о чем также свидетельствуют отечественные и зарубежные исследования и публикации в области берегового строительства.

Методы и инструменты компьютерного моделирования гидродинамических процессов

Рассмотрим моделирование взаимодействия волн с неподвижными структурами. Современная вычислительная гидродинамика располагает рядом методов для проведения компьютерных экспериментов в рамках решения подобных задач.

Линейные и слабо нелинейные задачи взаимодействия волн и конструкций могут быть рассчитаны с высокой точностью и экономичностью с помощью уравнения потенциального течения для невязких безвихревых потоков. Однако этот метод имеет ограничения в обработке сильно нелинейных волн и ситуаций, связанных с явлениями разрушения волн. Взаимодействие волн второго порядка с неподвижными и плавающими конструкциями успешно исследовалось и рассматривалось в ряде отечественных и иностранных публикаций. Высокоточные вычислительные методы динамики жидкости, основанные на эйлерово-лагранжевой форме уравнений Навье — Стокса, с использованием сеточного или бессеточного подходов, предлагают альтернативные пути для решения этих сильно нелинейных задач [3].

Сеточные подходы используют метод конечных разностей (FD), метод конечных объемов (FV) или метод конечных элементов (FE) для пространственной дискретизации уравнений течения и получения численных решений. Сеточный подход реализован в таких программных продуктах, как SolidWorks Flow Simulation и Ansys Fluent (FV), а также Comsol Multyphysics (FE). Бессеточный подход может быть реализован с помощью перспективного метода — гидродинамики сглаженных частиц (SPH), разработанного изначально для применения в газодинамических расчетах в астрофизике, но в настоящее время широко используемого во многих других областях исследований для решения задач моделирования генерации гидродинамических волн и взаимодействия волн с подвижными и неподвижными структурами. Метод SPH реализован в таких программных продуктах, как LS-DYNA, или бесплатной решающей программе с открытым кодом DualSPHysics, которая используется в настоящем исследовании. Данная

программа хорошо зарекомендовала себя в решении подобного рода задач. В частности, достоверность метода доказана в исследовании группы ученых из Университета Дипонегоро [4]. Также группа ученых из Университета Калабрии использовала двухмерную SPH-модель для моделирования взаимодействия волн с проницаемым волноломом [5].

Суть метода SPH — разбиение жидкости на дискретные элементы-частицы. Любая физическая величина любой частицы может быть получена путем суммирования соответствующих величин всех частиц, которые находятся в пределах двух радиусов сглаживания, с помощью функции ядра.

Компьютерный эксперимент

Для оценки воздействия гидродинамических факторов на железнодорожные конструкции был проведен численный эксперимент. На основе данных о рельефе дна на рассматриваемом участке была составлена его твердотельная модель, затем с помощью генератора длинных волн моделировались 6-балльные штормовые волны и производился сравнительный анализ конструкций береговых сооружений. Эксперимент проводился для двух конфигураций расчетной модели (рис. 2):

1. Классическая конструкция с подпорно-волноотбойной стеной.
2. С размещением железнодорожных путей на эстакаде.

Сооружения, подобные представленному в конфигурации 2, используются для защиты железнодорожного пути на периодически подтапливаемых участках и интеграции инженерных сооружений в естественный рельеф.

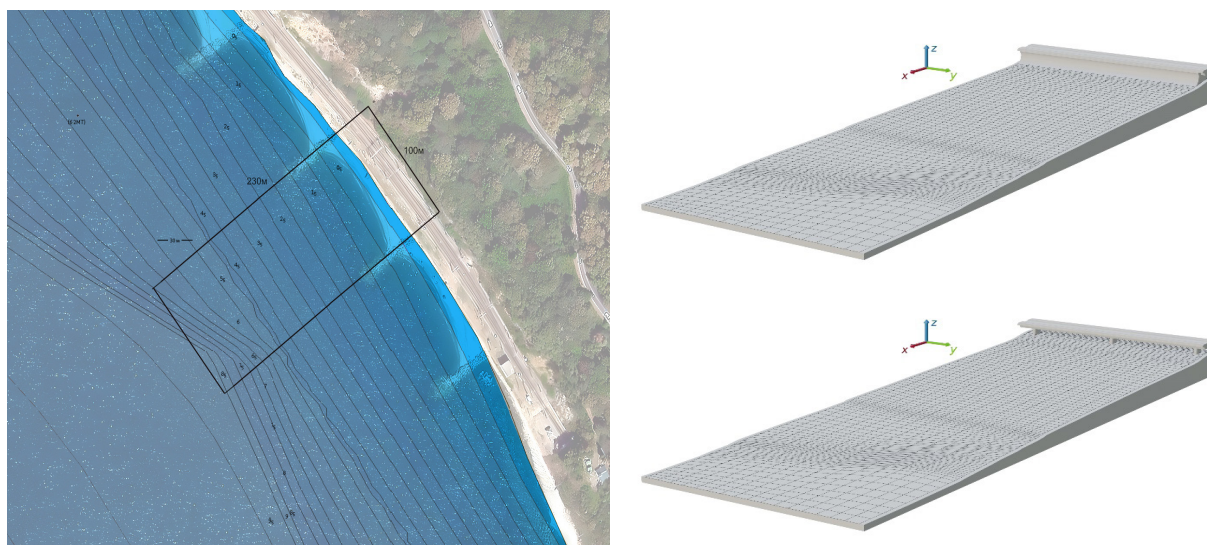


Рис. 2. Карта лоции рассматриваемого участка и компьютерная модель

В качестве примеров подобных конструкций можно привести эстакаду на Треслс Бич (Калифорния, США) — небольшой участок железнодорожного пути на подтапливаемом участке берега в устье Сан-Матео-Крик. Другим ярким примером служит эстакада, построенная на протяженной периодически затапливаемой отмели, ведущая к мосту через пролив Памбан между мысом Рамнад и островом Рамешварам (Индия). Отмель является частью Моста Рамы — геологически примечательного возвышения песчаного морского дна в виде вереницы отмелей и островков протяженностью 48 км между Индией и Шри-Ланкой, местами выступающей небольшими островками, но в высокий прилив ее большая часть лежит под водой на глубине от 1 до 1,25 м (незатапливаемые участки указанного участка дороги имеют классические железобетонные волноотбойные стены). Также стоит отметить подобные конструкции на железной дороге SGR (национальный парк Тсаво, Кения), построенной в 2022 г. китайскими инженерами: хотя в данном случае не стояла задача берегозащиты, проект содержит исключительно протяженные и высокие эстакады, возведенные для минимизации влияния железнодорожного движения на дикую природу Африки (дорога проходит через природоохранную зону, и, таким образом, при строительстве необходимо было решить задачу интеграции в естественный ландшафт).

В общем виде расчетная модель (рис. 3) состоит из основания 1, генератора волн 2, подводного склона 3, пляжа 4, берегового инженерного сооружения 5 (в данном случае — волноотбойной стены) и двухфазной среды 6. Модель также предусматривает возможность добавления волноломов разной конфигурации и подвижных объектов.



Рис. 3 Общий вид расчетной модели

В ходе компьютерного эксперимента была выполнена симуляция со следующими параметрами.

В качестве функции сглаживающего ядра была использована функция Вендланда [6], которая имеет ряд преимуществ перед функцией Гаусса, кубическим или В-сплайном, часто используемыми в данном методе [7]. Функция имеет вид:

$$W(r, h) = \frac{7}{4\pi h^2} \left(1 - \frac{r}{2h}\right)^4 \left(\frac{2r}{h} + 1\right),$$

где r — расстояние между любыми двумя частицами,

h — радиус сглаживания, в предварительном расчете принятый равным 0,05 м.

В расчете использовался симплектический интегратор, время симуляции составляло 60 с. Граничные условия моделирования были заданы методом динамических граничных условий. В данном методе граничные частицы подчиняются тем же уравнениям, что и частицы жидкости, однако они не движутся под действием приложенных к ним сил. Вместо этого они остаются либо неподвижными, либо движутся в соответствии с заданной функцией движения (в данном случае — функции движения генератора волн).

В эксперименте был использован генератор волн второго порядка, основанный на теории генерации длинных волн Мадсена [8], не требующей существенных вычислительных ресурсов, при этом обеспечивающей эффективность и точность для волн первого и второго порядка. Коэффициент искусственной вязкости по Монагану был принят равным $\alpha = 0,001$ [9]. Глубина у подножия подводного склона — 9 м, дистанция — 200 м.

В результате эксперимента были получены распределения избыточного давления и скоростей потока (рис. 4). Сравнение эпюр показало, что волноотбойная стена увеличивает скорость обратного потока в 1,5–2 раза и таким образом действительно способствует вымыванию грунта. Также данный расчет позволяет определить силу воздействия волн на элементы сооружений (рис. 5).

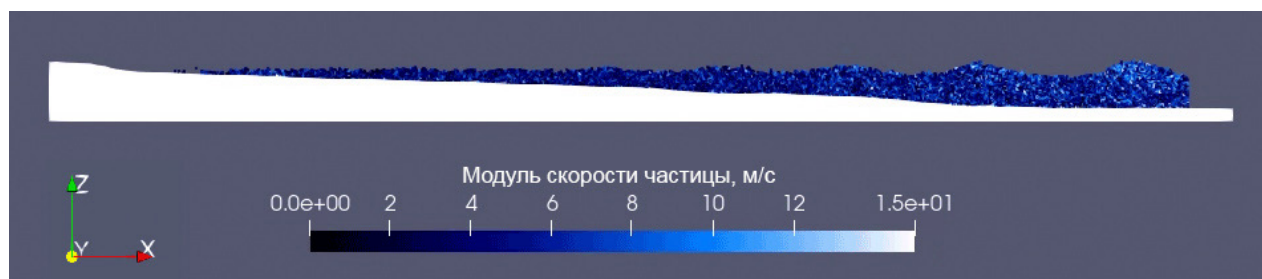


Рис. 4. Генерация волн в центральном сечении участка

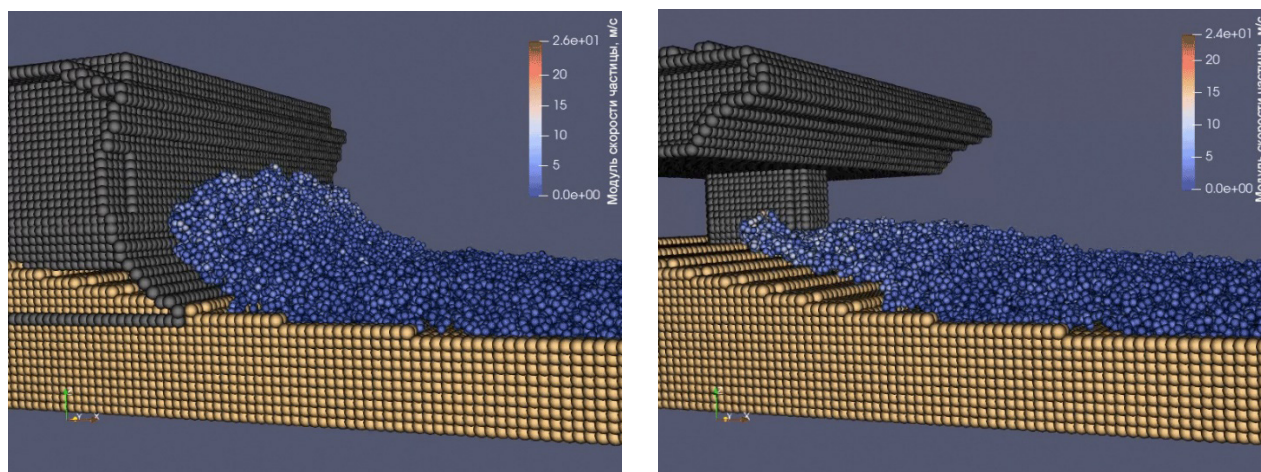


Рис. 5. Набегание волны на опору эстакады и волноотбойную стену

На рис. 6, 7 показаны эпюры изменения проекций вектора скорости потока на ось X по времени, в центральном сечении участка, в точках, соответствующих глубине 0,5, 1 и 1,5 м. Отрицательные значения показывают движение воды в сторону берега, положительные — в сторону моря. Интересен вид графиков в правой части, после отметки 4 с: при сравнении видно бóльшую скорость обратного потока на рис. 6, соответствующем конфигурации 1 модели с волноотбойной стеной, вызванную отражением набегающей волны.

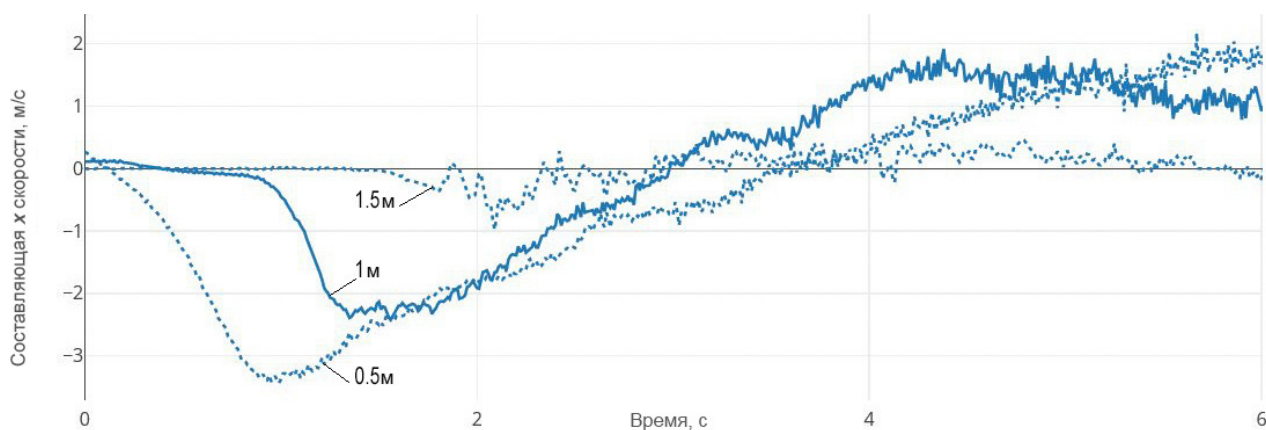


Рис. 6. Эпюры скоростей потока для конфигурации модели 1 (с волноотбойной стеной)



Рис. 7. Эпюры скоростей потока для конфигурации модели 2 (с эстакадой)

Результирующая сила, с которой набегающая волна воздействует на береговое сооружение, может быть получена как произведение избыточного давления на смоченную поверхность стенки сооружения. В силу конструктивных особенностей оба параметра для опор эстакады будут всегда меньше, чем для участка волноотбойной стены на аналогичной длине железнодорожного пути, а следовательно — и силовое воздействие волн, что наглядно показывают приведенные на рис. 8, 9 графики.

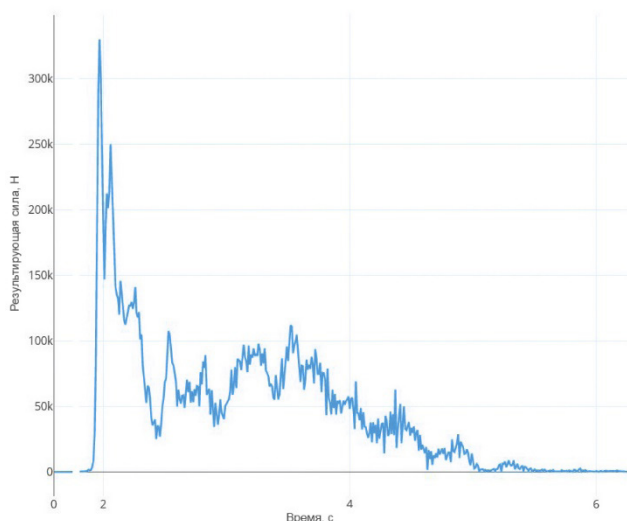


Рис. 8. Результирующая сила для конфигурации 1

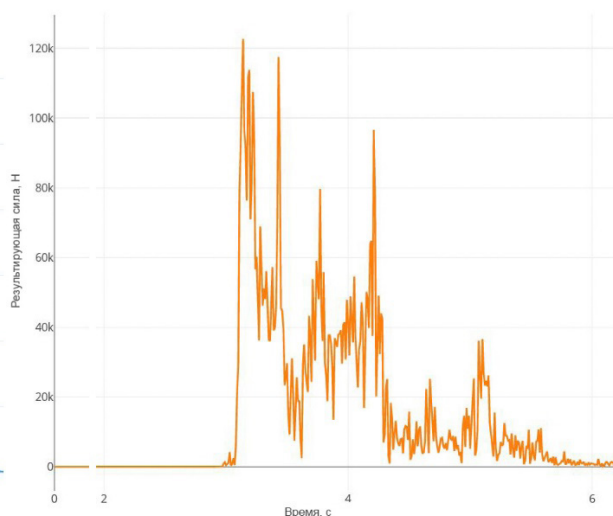


Рис. 9. Результирующая сила для конфигурации 2

Заключение

Выполнено численное моделирование воздействия штормовых волн на берегозащитные сооружения и конструкции железнодорожного пути в районах интенсивного воздействия прибрежных штормовых приливов. Оценена интенсивность воздействия гидродинамических факторов на элементы конструкций и косвенное влияние сооружений на эрозию берега

Построена карта распределения скоростей потока и избыточного давления для набегающей и отраженной волны на примере участка берега. Исследование показало преимущества интеграции береговых железнодорожных сооружений в естественный ландшафт.

Исследования, выполненные по данной тематике, проводились в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет-2030».

Список источников

1. Серебряков Г. Б. Обзор методов берегозащиты на Черноморском побережье России / Г. Б. Серебряков, Н. А. Гришин // Архитектура Сочи. — URL: <https://arch-sochi.ru/2012/10/obzor-metodov-beregozashhityi-na-chernomorskom-poberezhe-rossi>.
2. Ашпиз Е. С. Защита железнодорожного пути линии Туапсе - Адлер от опасных склоновых процессов / Е. С. Ашпиз, А. Н. Савин, В. А. Явна // Железнодорожный транспорт: научно-теоретический технико-экономический журнал. — 2017. — № 7. — С. 52–57.

3. Ouyang Z. Two-Phase Smoothed Particle Hydrodynamics Modelling of Hydrodynamic-Aerodynamic and Wave-Structure Interaction / Z. Ouyang, B. C. Khoo // *Energies* 2022. — Apr 28. — Vol. 15(9). — P. 3251. — DOI:10.3390/en15093251.
4. Trimulyono A. Numerical simulation of water wave propagation using DualSPHysics / A. Trimulyono, B. R. Dhanureski, S. Samuel et al. // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. — 2024. — Vol. 1298. — Iss. 1. — Pp 1–9. — DOI: 10.1088/1755-1315/1298/1/012002.
5. Meringolo D. SPH numerical modeling of wave-perforated breakwater interaction / D. Meringolo, F. Aristodemo, P. Veltri // *Coastal Engineering*. — 2015. — Vol. 101. — Pp 48–68. — DOI: 10.1016/j.coastaleng.2015.04.004.
6. Wendland H. Piecewise polynomial, positive definite and compactly supported radial functions of minimal degree / H. Wendland // *Advances in Computational Mathematics*. — 1995. — Vol. 4(1). — Iss. 1. — Pp. 389–96. — DOI: 10.1007/BF02123482.
7. Macià F. Benefits of using a Wendland Kernel for free-surface flows / F. Macià, A. Colagrossi, M. Antuono et al. // 6th ERCOFTAC SPHERIC workshop on SPH applications, Hamburg, Germany, June, 08–10 2011. — URL: https://www.researchgate.net/publication/303637287_Benefits_of_using_a_Wendland_kernel_for_free-surface_flows.
8. Madsen O. S. On the generation of long waves / Madsen O. S. // *Journal of Geophysical Research*. — 1971. — Vol. 76(36). — Pp. 8672–8683. — DOI: 10.1029/JC076i036p08672.
9. Trimulyono A. et al. Sensitivity analysis of SPH parameters for long-distance water wave propagation / A. Trimulyono et al. // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 1198. — 2023. — DOI: 10.1088/1755-1315/1198/1/012001.

Дата поступления: 08.12.2024

Решение о публикации: 31.01.2025

Контактная информация:

ВОРОБЬЕВ Александр Алфеевич — д-р техн. наук, проф.; nttk@pgups.ru

ВАТАЕВ Андрей Сергеевич — канд. техн. наук, доц.; avataev@yandex.ru

ВАТУЛИН Ян Семенович — канд. техн. наук, доц.; avataev@yandex.ru

МАЙОРОВ Владимир Сергеевич — канд. техн. наук, доц.; mayorov.pgups@gmail.com

КРАСНОБРЫЖИЙ Станислав Андреевич — канд. техн. наук, доц.; nttk@pgups.ru

On the Issue of Hydrodynamic Forces Acting on Coastal Railway Structures

A. A. Vorobev, A. S. Vataev, Ya. S. Vatulin, V. S. Mayorov, S. A. Krasnobryzhiy

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Vorobev A. A., Vataev A. S., Vatulin Y. S., Mayorov V. S., Krasnobryzhiy S. A. On the Issue of Hydrodynamic Forces Acting on Coastal Railway Structures. *Bulletin of scientific research results*, 2025, vol. 22, iss. 1, pp. 119–130. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-119-130

Summary

Purpose: Numerical modelling of the storm wave impact on the coastal protection structures and railway tracks in the areas of intensive coastal storm tides has been performed. The intensity of the hydrodynamic impact on structural elements and the indirect effect of man-made structures on coastal erosion have been evaluated. **Methods:** Computer simulation by SPH method. **Results:** A map of the sea-wave velocity and overpressure distribution for incoming and reflected waves for a coastline zone has been built. The study has shown the benefits of inserting coastal rail facilities in the natural landscape. **Practical significance:** A comparative analysis of the stated-above hydrodynamic impact on the standard and alternative railtrack substructure in the coastal area has been conducted.

Keywords: Hydrodynamics of smoothed particles, retaining walls, railway structures, track substructure, trestle.

References

1. Serebryakov G. B., Grishin N. A. Obzor metodov beregozashchity na Chernomorskom poberezh'e Rossii [Review of coastal protection methods on the Black Sea coast of Russia]. *Arkhitektura Sochi* [Architecture of Sochi]. Available at: <https://arch-sochi.ru/2012/10/obzor-metodov-beregozashchity-na-chernomorskom-poberezhe-rossi>. (In Russian)

2. Ashpiz E. S., Savin A. N., Yavna V. A. Zashchita zheleznodorozhnogo puti linii Tuapse - Adler ot opasnykh sklonovykh protsessov [Protection of the Tuapse - Adler railway line from dangerous slope processes]. *Zheleznodorozhnyy transport: nauchno-teoreticheskiy tekhniko-ekonomicheskiy zhurnal* [Railway transport: scientific-theoretical technical and economic journal]. 2017, Iss. 7, pp. 52–57. (In Russian)

3. Ouyang Z., Khoo B. C. Two-Phase Smoothed Particle Hydrodynamics Modelling of Hydrodynamic-Aerodynamic and Wave-Structure Interaction. *Energies* 2022, Apr 28, vol. 15(9), p. 3251. DOI:10.3390/en15093251.

4. Trimulyono A., Dhanureski B. R., Samuel S. et al. Numerical simulation of water wave propagation using DualSPHysics. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2024, vol. 1298, Iss. 1, pp 1–9. DOI: 10.1088/1755-1315/1298/1/012002.

5. Meringolo D., Aristodemo F., Veltri P. SPH numerical modeling of wave-perforated breakwater interaction. *Coastal Engineering*, 2015, vol. 101, pp 48–68. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2015.04.004.

6. Wendland H. Piecewise polynomial, positive definite and compactly supported radial functions of minimal degree. *Advances in Computational Mathematics*, 1995, vol. 4(1), Iss. 1, pp. 389–96. DOI: 10.1007/BF02123482.

7. Macià F., Colagrossi A., Antuono M. et al. Benefits of using a Wendland Kernel for free-surface flows. 6th ERCOFTAC SPHERIC workshop on SPH applications, Hamburg, Germany, June, 08–10 2011. Available at: https://www.researchgate.net/publication/303637287_Benefits_of_using_a_Wendland_kernel_for_free-surface_flows.

8. Madsen O. S. On the generation of long waves. *Journal of Geophysical Research*, 1971, vol. 76(36), pp. 8672–8683. DOI: 10.1029/JC076i036p08672.

9. Trimulyono A. et al. Sensitivity analysis of SPH parameters for long-distance water wave propagation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 1198, 2023. DOI: 10.1088/1755-1315/1198/1/012001.

Received: December 08, 2024

Accepted: January 31, 2025

Author's information:

Alexander A. VOROBIEV — Dr. Sci. in Engineering, Professor; nttk@pgups.ru

Andrey S. VATAEV — PhD in Engineering, Associate Professor; avataev@yandex.ru

Jan S. VATULIN — PhD in Engineering, Associate Professor; yan-roos@yandex.ru

Vladimir S. MAYOROV — PhD in Engineering, Associate Professor; mayorov.pgups@gmail.com

Stanislav A. KRASNOBRYZHIY — PhD in Engineering, Associate Professor; nttk@pgups.ru