

Научная статья

УДК 625.1

doi: 10.46684/2687-1033.2025.1.83-90

EDN DKAКCR

Анализ воздействия гидродинамических факторов на береговые железнодорожные сооружения

А.А. Воробьев^{1✉}, В.С. Майоров², С.А. Краснобрыжий³, А.В. Курков⁴

^{1,2,3,4} Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС);

г. Санкт-Петербург, Россия

¹ nttk@pgups.ru✉

² mayorov.pgups@gmail.com

³ nttk@pgups.ru

⁴ nttk@pgups.ru

АННОТАЦИЯ

Произведен 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. Проведено компьютерное моделирование методом гидродинамики сглаженных частиц.

Построена карта распределения скоростей потока и избыточного давления для набегающей и отраженной волны на примере участка берега, получены численные показатели влияния 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. Осуществлен сравнительный анализ влияния 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

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

Для цитирования: Воробьев А.А., Майоров В.С., Краснобрыжий С.А., Курков А.В. Анализ воздействия гидродинамических факторов на береговые железнодорожные сооружения // Техник транспорта: образование и практика. 2025. Т. 6. Вып. 1. С. 83–90. <https://doi.org/10.46684/2687-1033.2025.1.83-90>. EDN DKAКCR.

Original article

Analysis of the impact of hydrodynamic factors on coastal railway structures

Alexander A. Vorobyov^{1✉}, Vladimir S. Mayorov², Stanislav A. Krasnobryzhy³, Alexander V. Kurkov⁴

^{1,2,3,4} Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PGUPS); Saint Petersburg, Russian Federation

¹ nttk@pgups.ru✉

² mayorov.pgups@gmail.com

³ nttk@pgups.ru

⁴ nttk@pgups.ru

ABSTRACT

The analysis of the surrounding coastal relief of the North Caucasus Railway section, which is promising in terms of high-speed traffic development, and the coastal protection structures traditionally used on this section was carried out, and a three-dimensional map of the sailing directions near the section under study was constructed. A computer experiment was carried out using numerical modeling tools to examine the impact of storm waves on coastal protection structures and railway track structures in areas of intense coastal storm tide impact.

© А.А. Воробьев, В.С. Майоров, С.А. Краснобрыжий, А.В. Курков, 2025

The intensity of the impact of hydrodynamic factors on structural elements and the indirect impact of traditional coastal protection structures on coastal erosion were estimated. Computer modeling was carried out using the smoothed particle hydrodynamics method.

A map of the distribution of flow velocities and excess pressure for the incident and reflected wave was constructed using a section of the coast as an example, and numerical indicators of the impact of hydrodynamic factors on the coastal structures of the railway were obtained. The study showed the advantages of integrating these structures into the natural landscape due to a significant reduction in the impact of reflected waves on coastal erosion. A comparative analysis of the impact of the specified hydrodynamic factors on the classical and alternative designs of the substructure of the track in the coastal zone, ensuring maximum use of the natural protection of the coastline, was carried out.

Keywords: hydrodynamics of smoothed particles; retaining and seawalls; railway structures; substructure of the track; overpass

Acknowledgments. The research carried out on this topic was conducted within the framework of the implementation of the federal program of support for universities "Priority-2030".

For citation: Vorobyov A.A., Mayorov V.S., Krasnobryzhy S.A., Kurkov A.V. Analysis of the impact of hydrodynamic factors on coastal railway structures. *Transport technician: education and practice.* 2025;6(1).83-90. (In Russ.). <https://doi.org/10.46684/2687-1033.2025.1.83-90>. EDN DKAKCR.

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 (ПС), и, как следствие, вызывать колебания и перемещения наддресорного строения ПС недопустимой амплитуды, приводящих к потере устойчивости и развитию аварийных ситуаций, в частности сходов и опрокидываний ПС. Не менее важным последствием воздействия ветровых нагрузок меньшей интенсивности на высокоскоростной ПС является возникновение опрокидывающего момента, приводящего к перераспределению нагрузок на контактные поверхности колесных пар и снижению эффективности процесса торможения, повышению вероятности вкатывания реборды колеса на головку рельса.

В настоящее время предельно допустимая неравномерность распределения веса ПС 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 ПС 250–300 км/ч. В нашей стране наиболее опасен в плане ветровых нагрузок перспективный с точки зрения развития высокоскоростного движения участок Туапсе – Адлер Северо-Кавказской железной дороги в районе п. Головинка. Особенностью рельефа местности служит наличие относительно плоского участка местности длиной 5 км и глубиной 2,4 км

в устье р. Шахе, что способствует беспрепятственному разгону воздушных масс (рис. 1). Не менее важная особенность указанной местности — значительный перепад глубин (более 200 м) в непосредственной близости от береговой линии, это 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 м и скоростью ветра до 40 м/с, приводящие к разрушению пути и берегоукрепляющих сооружений.

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 влиянием стихии. Со временем конструкция этих сооружений претерпела изменения. Современные морские подпорно-волноотбойные стены представляют собой сложные инженерные сооружения из железобетона, обладающие прочным, глубоко заложением 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;



Рис. 1. Рельеф участка Туапсе – Адлер Северо-Кавказской железной дороги в районе п. Головинка (а) и последствия шторма 26.10.24 на перегоне Адлер – Хоста (б)

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, 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, одна из них то, что в результате работы стен происходит размыв и сокращение ширины пляжа. На отдельных участках рассматриваемого пути пляж имеет ширину всего 5–7 м (например, на перегоне Мамедова щель – Лазаревское), при этом сочетание приглубого 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, увеличивает эрозионные процессы на подводном склоне, что и ведет к деформации стены, снижению ее эксплуатационных характеристик и, как следствие, деформации и даже разрушению железнодорожной насыпи.

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 — перспективный и востребованный, 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. Но 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 анализировалось 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 работе группы ученых из университета Дипонегоро [4]. Так же ученые из университета Калабрии использовали 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 проведен численный эксперимент. На основе информации 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 выполнялся для двух конфигураций расчетной модели (рис. 2):

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

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

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

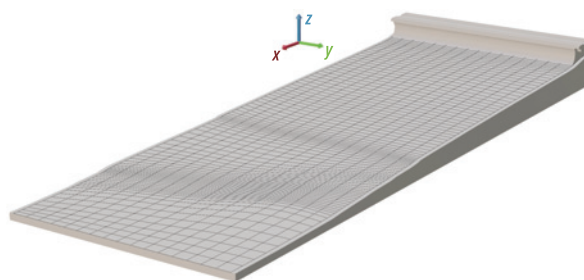


Рис. 2. Карта лоции рассматриваемого участка и компьютерная модель



Рис. 3. Общий вид расчетной модели

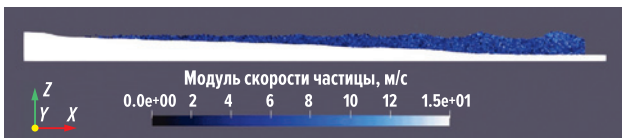


Рис. 4. Генерация волн в центральном сечении участка

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 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, а также подвижных объектов.

В ходе компьютерного эксперимента была выполнена симуляция со следующими параметрами.

В качестве функции сглаживающего ядра применена 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 заданы методом динамических граничных условий. В этом 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 рассматриваемом случае — функции движения генератора волн).

В эксперименте 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 принят $\alpha = 0,001$ [9]. Глубина у подножия подводного склона — 9 м, дистанция — 200 м.

В результате эксперимента 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).

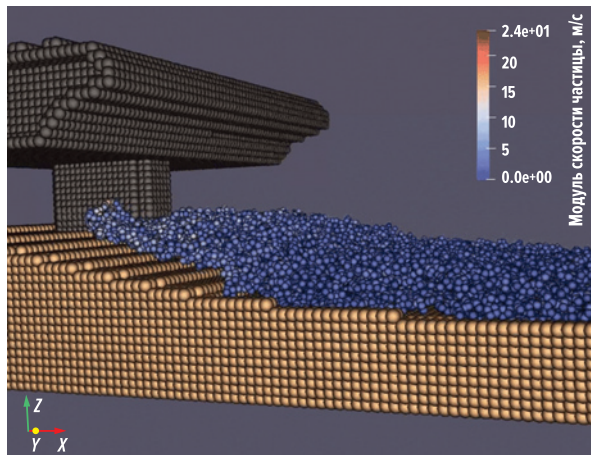
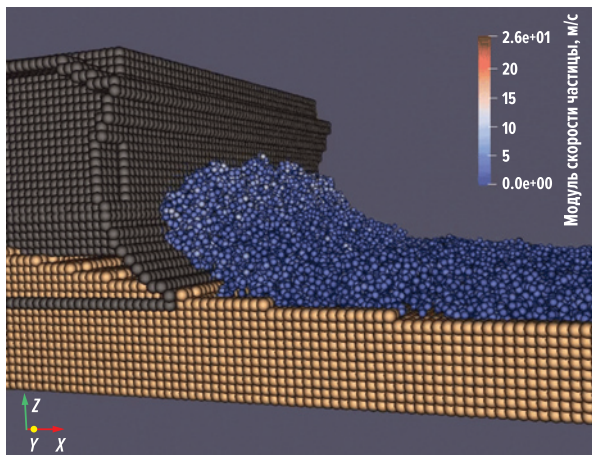


Рис. 5. Набегание волны на опору эстакады и волноотбойную стену

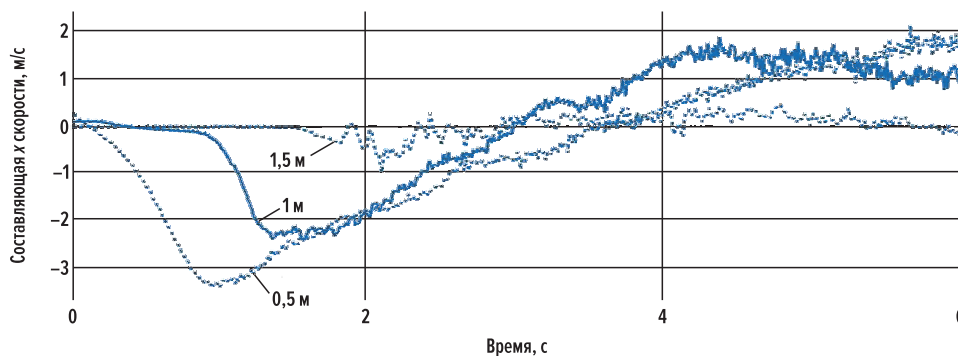


Рис. 6. Эпюры скоростей потока для конфигурации модели 1 (с волноотбойной стеной)

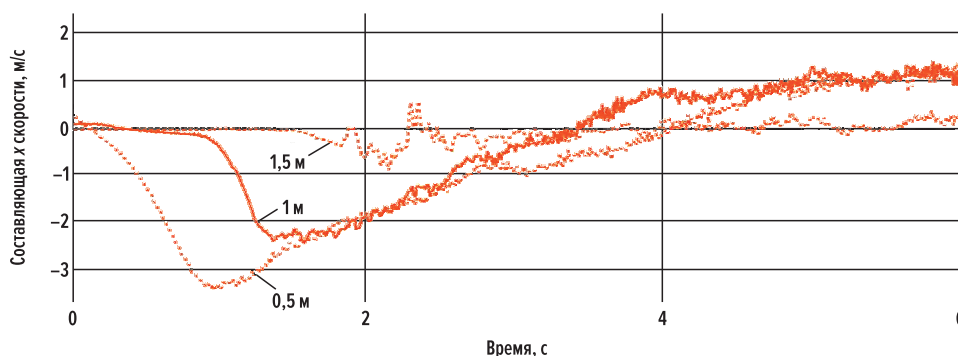


Рис. 7. Эпюры скоростей потока для конфигурации модели 2 (с эстакадой)

На рис. 6, 7 представлены 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.

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.

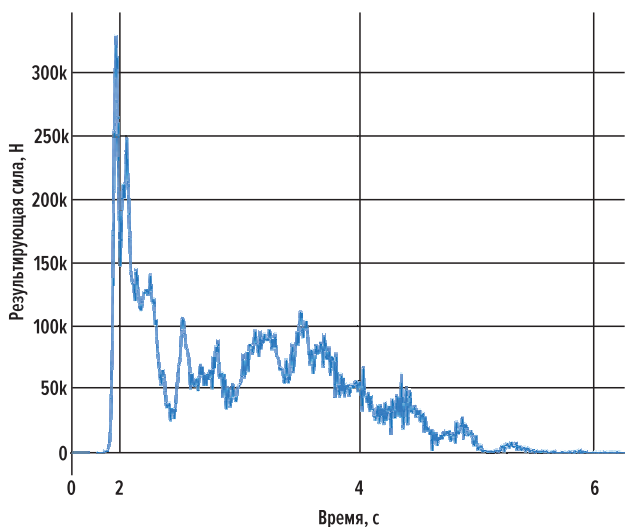


Рис. 8. Результирующая сила для конфигурации 1

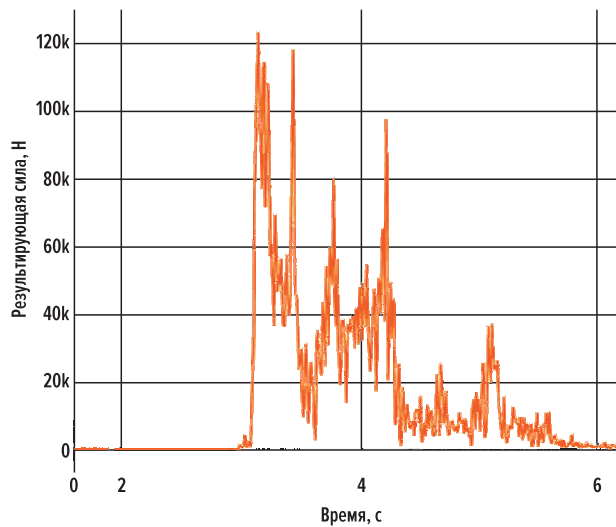


Рис. 9. Результирующая сила для конфигурации 2

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для численного моделирования воздействия штормовых волн на берегозащитные сооружения и конструкции железнодорожного пути использован метод гидродинамики сглаженных частиц. Генерация волн производилась путем перемещения поршня в волновом бассейне и реализации условия открытой границы воздушной фазы, валидация данного метода была ранее рассмотрена в литературе. Исследование проводилось на модели участка берега, расположенного на перегоне Мамедова щель – Лазаревское участка Туапсе – Адлер Северо-Кавказской железной дороги для двух конфигураций береговых железнодорожных сооружений: существующей на этом участке традиционной берегозащиты и предлагаемой конфигурации в виде сочетания естественного пляжа и железнодорожной эстакады.

В ходе исследования получены трехмерные карты распределения избыточного давления, которые позволили произвести численную оценку интенсивности воздействия гидродинамических факторов на такие элементы береговых железнодорожных конструкций, как подпорно-волноотбойные стены и опоры эстакады в виде векторов результирующей силы. Вычисления показали снижение пиковой нагрузки от набегающей волны в 2,5 раза при

возведении железнодорожной эстакады вместо подпорно-волноотбойных стен, традиционно используемых на рассматриваемом участке как в качестве подпорных сооружений земляного полотна железной дороги, так и берегозащитного сооружения.

Также было рассмотрено косвенное влияние традиционных берегозащитных сооружений на эрозию пляжа в районах интенсивного воздействия прибрежных штормовых приливов на примере участка берега. Выполненный компьютерный эксперимент продемонстрировал возникновение отраженной волны при столкновении набегающей волны с поверхностью волноотбойных стен. Полученные карты распределения скоростей потока позволили получить эпюры скоростей в характерных точках у поверхности подводного склона. Анализ графиков показал, что в конфигурации модели с волноотбойной стеной благодаря влиянию отраженной волны скорость обратного потока у дна в 1,5–2 раза выше, чем в случае с эстакадой, возведенной на пляже. Это явление приводит к нарушению баланса естественных гидро- и литодинамических процессов, ускоренной эрозии берега и в конечном счете может стать причиной обрушения береговых сооружений в сторону моря. Таким образом, исследование показало преимущества интеграции береговых железнодорожных сооружений в естественный ландшафт.

ЛИТЕРАТУРА

1. Серебряков Г.Б., Гришин Н.А. Обзор методов берегозащиты на Черноморском побережье России // *Архитектура Сочи*. 2012. URL: <https://arch-sochi.ru/2012/10/obzor-metodov-beregozashhityi-na-chernomorskom-poberezhe-rossi>
2. Ашпиз Е.С., Савин А.Н., Явна В.А. Защита железнодорожного пути линии Туапсе – Адлер от опасных склоновых процессов // *Железнодорожный транспорт*. 2017. № 7. С. 52–57. EDN YZHMXXN.
3. Ouyang Z., Khoo B.C. Two-Phase Smoothed Particle Hydrodynamics Modelling of Hydrodynamic-Aerodynamic and Wave-Structure Interaction // *Energies*. 2022. Vol. 15. Issue 9. P. 3251. DOI: 10.3390/en15093251
4. Trimulyono A., Dhanureski B.R., Samuel S., Jokosisworo S. Numerical simulation of water wave propagation using DualSPHysics // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2024. Vol. 1298. Issue 1. P. 012002. DOI: 10.1088/1755-1315/1298/1/012002
5. Meringolo D.D., Aristodemo F., Veltri P. SPH numerical modeling of wave-perforated breakwater interaction // *Coastal*

6. *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. Issue 1. Pp. 389–396. DOI: 10.1007/BF02123482
7. Macià F., Colagrossi A., Antuono M., Souto-Iglesias A. Benefits of using a Wendland Kernel for free-surface flows // 6th international SPHERIC workshop. Hamburg, Germany, 2011.
8. Madsen O.S. On the generation of long waves // *Journal of Geophysical Research*. 1971. Vol. 76. Issue 36. Pp. 8672–8683. DOI: 10.1029/JC076i036p08672
9. Trimulyono A., Abror I., Yudo H., Purwanto D.B. Sensitivity analysis of SPH parameters for long-distance water wave propagation // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2023. Vol. 1198. Issue 1. P. 012001. DOI: 10.1088/1755-1315/1198/1/012001

REFERENCES

1. Serebryakov G.B., Grishin N.A. Review of coastal protection methods on the Black Sea coast of Russia. *Architecture of Sochi*. 2012. URL: <https://arch-sochi.ru/2012/10/obzor-metodov-beregozashhityi-na-chernomorskom-poberezhe-rossi> (In Russ.).

2. Ashpiz E.S., Savin A.N., Yavna V.A. Protection of the railway line Tuapse – Adler from dangerous landslip and rockslide processes. *Railway Transport*. 2017;7:52-57. EDN YZHMXXN. (In Russ.).

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

4. Trimulyono A., Dhanureski B.R., Samuel S., Jokosisworo S. Numerical simulation of water wave propagation using DualSPHysics. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2024;1298(1):012002. DOI: 10.1088/1755-1315/1298/1/012002

5. Meringolo D.D., Aristodemo F., Veltri P. SPH numerical modeling of wave-perforated breakwater interaction. *Coastal Engineering*. 2015;101:48-68. 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;4(1):389-396. DOI: 10.1007/BF02123482

7. Macià F., Colagrossi A., Antuono M., Souto-Iglesias A. Benefits of using a Wendland Kernel for free-surface flows. *6th international SPHERIC workshop*. Hamburg, Germany, 2011.

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

9. Trimulyono A., Abror I., Yudo H., Purwanto D.B. Sensitivity analysis of SPH parameters for long-distance water wave propagation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2023;1198(1):012001. DOI: 10.1088/1755-1315/1198/1/012001

Об авторах

Александр Алфеевич Воробьев — доктор технических наук, доцент, профессор, заведующий кафедрой «Наземные транспортно-технологические комплексы»; **Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС)**; 190031, г. Санкт-Петербург, Московский пр., д. 9; член редакционного совета журнала; «**Техник транспорта: образование и практика**»; SPIN-код: 2244-1699, РИНЦ ID: 290846; nttk@pgups.ru;

Владимир Сергеевич Майоров — кандидат технических наук, доцент; **Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС)**; 190031, г. Санкт-Петербург, Московский пр., д. 9; mayorov.pgups@gmail.com;

Станислав Андреевич Краснобрыжий — кандидат технических наук, доцент; **Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС)**; 190031, г. Санкт-Петербург, Московский пр., д. 9; nttk@pgups.ru;

Александр Валентинович Курков — кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Наземные транспортно-технологические комплексы»; **Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС)**; 190031, г. Санкт-Петербург, Московский пр., д. 9; SPIN-код: 4712-9730, РИНЦ ID: 1186645; nttk@pgups.ru.

Bionotes

Alexander A. Vorobyov — Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor, Head of the Department of the Department of “Ground Transport and Technological Complexes”; **Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PGUPS)**; 9 Moskovsky pr., St. Petersburg, 190031, Russian Federation; member of the editorial board of the journal; “**Transport technician: education and practice**”; SPIN-code: 2244-1699, ID RSCI: 290846; nttk@pgups.ru;

Vladimir S. Mayorov — Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor; **Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PGUPS)**; 9 Moskovsky pr., St. Petersburg, 190031, Russian Federation; mayorov.pgups@gmail.com;

Stanislav A. Krasnobryzhy — Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor; **Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PGUPS)**; 9 Moskovsky pr., St. Petersburg, 190031, Russian Federation; nttk@pgups.ru;

Alexander V. Kurkov — Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of “Ground Transport and Technological Complexes”; **Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PGUPS)**; 9 Moskovsky pr., St. Petersburg, 190031, Russian Federation; SPIN-code: 4712-9730, ID RSCI: 1186645; nttk@pgups.ru.

Заявленный вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Автор, ответственный за переписку: Александр Алфеевич Воробьев, nttk@pgups.ru.

Corresponding author: Alexander A. Vorobyov, nttk@pgups.ru.

Статья поступила в редакцию 09.11.2024; одобрена после рецензирования 14.12.2024; принята к публикации 28.01.2025.

The article was submitted 09.11.2024; approved after reviewing 14.12.2024; accepted for publication 28.01.2025.