

Транспортные сооружения / Russian Journal of Transport Engineering <https://t-s.today>

2025, Том 12, № 1 / 2025, Vol. 12, Iss. 1 <https://t-s.today/issue-1-2025.html>

URL: <https://t-s.today/PDF/09SATS125.pdf>

DOI: 10.15862/09SATS125 (<https://doi.org/10.15862/09SATS125>)

2.1.8. Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей (технические науки)

Взаимодействие подводного плавающего тоннеля и различного подвижного состава

¹Поляков В.Ю., ²Демидов И.М.

¹ФГБОУ ВО «Российский университет транспорта», Москва, Россия

²ООО «ММС Интернэшнл», Москва, Россия

Автор, ответственный за переписку: Поляков Владимир Юрьевич, e-mail: pvu55@mail.ru

Аннотация. Подводные плавающие тоннели представляют собой новый вид транспортных сооружений, сфера применения которых — пересечение глубоководных препятствий, таких как морские заливы, проливы и т. п. Отсутствие опыта строительства этих сооружений ставит задачу разработки рациональных решений актуальной. В статье рассматривается проблема взаимодействия железнодорожного подвижного состава с подводными плавающими тоннелями, проблема непотопляемости тоннеля при движении тяжелых грузовых поездов. Рассматривается также взаимодействие сооружения с высокоскоростным поездом на скорости до 360 км/ч. Рассмотрение движения сверхскоростных поездов со скоростью до 1 000 км/ч (технология Маглев и Hyperloop) касается проблемы критической скорости движения, при которой наблюдается значительный

рост динамического отклика сооружения. Известное решение о критической скорости движения силы по бесконечной балке на упругом основании позволяет оценить достоверность результатов, публикуемых в этой статье. Кроме того, приведены результаты исследования достоверности решений по асимптотической сходимости, устойчивости решения по шагу интегрирования дифференциальных уравнений и длине волны в балке. Рассмотрены вопросы обеспечения непотопляемости сооружения под различными видами поездов. Ввиду отсутствия в мире сооружений подобного вида основным методом исследования является численный эксперимент.

Ключевые слова: погруженный плавающий тоннель; оптимизация; динамическое взаимодействие; критическая скорость; Hyperloop

Interaction of submerged floating tunnels and various types of rolling stock

¹Vladimir Yu. Poliakov, ²Ivan M. Demidov

¹Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia

²Limited Liability Company MMC International, Moscow, Russia

Corresponding author: Vladimir Yu. Poliakov, e-mail: pv55@mail.ru

Abstract. Submerged floating tunnels represent a novel type of transport structure designed for crossing deep-water obstacles such as sea bays, straits, and similar features. The lack of construction experience for such structures makes the development of rational solutions an urgent task. This article addresses the problem of interaction between railway rolling stock and submerged floating tunnels, particularly the challenge of maintaining buoyancy stability during the passage of heavy freight trains. Additionally, the interaction of the structure with high-speed trains traveling at speeds up to 360 km/h is examined. The analysis of ultra-high-speed trains operating at velocities up to 1 000 km/h (Maglev and Hyperloop technologies) focuses on the critical speed phenomenon, where a significant increase in the dynamic

response of the structure is observed. The well-known solution for critical speed forces on an infinite beam resting on an elastic foundation is used to assess the validity of the results presented in this study. Furthermore, findings from investigations into the reliability of solutions regarding asymptotic convergence, numerical stability of integration steps for differential equations, and beam wavelength are provided. The article also explores measures to ensure buoyancy stability under different types of train loads. Given the absence of real-world structures of this kind, numerical experimentation serves as the primary research method.

Keywords: submerged floating tunnel; optimization; dynamic interaction; critical speed; Hyperloop

Данная статья доступна по лицензии Creative Commons “Attribution” («Атрибуция») 4.0 Всемирная

This article is available under the Creative Commons “Attribution” 4.0 Global License



Введение

Introduction

Подводный плавающий тоннель (ППТ) представляет собой балку жесткости с сечением замкнутого профиля с положительной плавучестью, закрепленную на дне водного препятствия от всплытия на всем протяжении анкерными тросами [1]. Конструктивной особенностью ППТ является баланс между вертикальными нагрузками и выталкивающими, архимедовыми силами [2]. Этот тип сооружения известен еще с XIX века, но до сих пор не построено ни одного такого сооружения, известны лишь проекты [3–7]. Как правило, глубоководные препятствия пересекаются традиционными тоннелями, требующими значительной глубины заложения. Например, тоннель Сейкан в Японии имеет лишь 1/3 длины под проливом, 2/3 длины занимают подходы для того, чтобы опуститься на глубину на 100 м ниже самой глубокой отметки дна для предотвращения поступления воды в тоннель. Сооружение мостов над глубоководными препятствиями затруднено строительством опор на значительной глубине, сегодня рекордная глубина воды для опор мостов — 60 м [1]. Пересечение пролива Гибралтар потребует преодоления глубины более 900 м, Мессинского пролива — 500–600 м, горло Белого моря и пролив Лаперуза — более 100 м. Чтобы опуститься на такую глубину 500 м потребуются традиционный тоннель длиной 40 км, а ППТ — лишь 8 км, поскольку достаточно опуститься ниже уровня воды на ~30 м.

Замкнутый профиль сечения, напоминающий тоннельную обделку транспортного тоннеля, и дал имя этому новому виду сооружения, хотя по напряженно-деформированному состоянию под поездной нагрузкой сооружение следует отнести к мостам. Балка жесткости ППТ рассматривается как балка Бернулли-Эйлера, имеющая на границе жесткие закрепления, препятствующие вертикальным перемещениям балки и повороту крайних сечений. Такие граничные условия конструктивно необходимы для обеспечения герметичности подводного сооружения.

Для численных экспериментов с рассматриваемым сооружением применяются либо стержневая модель, принимающая во внимание анкерные тросы, либо балка на упругом основании. В статье [8] рассматриваются различные модели балки на упругом основании под действием перемещающейся силы. В численном эксперименте [8] используется балка с погонным коэффициентом постели $k = 7,5$ Мпа, такая характеристика довольно близка к рассмотренной в данной статье. Вывод о том, что модель балки Тимошенко, модель балки Рэлея, модель балки Эйлера-Бернулли дают очень близкие результаты при моделировании прогибов при действии подвижной нагрузки [8] применим и для ППТ.

Следовательно применение модели Эйлера-Бернулли при расчёте конструкций с использованием предлагаемой методики позволяет добиться приемлемой точности результатов, в тоже время, не перегружая математическую модель излишними подробностями.

В данной статье численные эксперименты на компьютере производились на основании метода, в котором балка жесткости описывается дифференциальными уравнениями в частных производных, а каждый вагон в составе поезда с 10 степенями свободы ОДУ [9]. При этом рассматривается взаимодействие поездов и сооружения в вертикальной продольной плоскости. Для этого достаточно рассматривать вертикальные тросы, моделирующие вертикальную жесткость закрепления. В случае применения наклонных тросов [1] определение вертикальной жесткости закрепления не представляет собой проблемы, а возникающее при наклонных тросах продольное взаимодействие тросов с балкой жесткости выходит за пределы этой статьи.

1. Критическая скорость движения и достоверность результатов

1. Critical speed of movement and reliability of results

Для нахождения критической скорости движения одиночной силы воспользуемся решением В.Л. Бидермана для бесконечной балки Бернулли-Эйлера на упругом основании [10]:

$$v_{cr}^2 = \sqrt{\frac{4kEI}{m^2}}, \quad (1)$$

где:

m — погонная масса тоннеля;

k — коэффициент жесткости основания (погонный коэффициент постели);

EJ — жесткость сечения на изгиб. Применение упругого основания для задачи о критической скорости для ППТ оправдано тем, что, во-первых, тросы ППТ предварительно растянуты архимедовой силой (условия повсеместного растяжения могут быть обеспечены, что показано далее).

Другими словами, сжатие основания означает падение предварительного растяжения, что снимает проблему одностороннего характера основания балки и позволяет применить решение В.Л. Бидермана.

Коэффициент жесткости основания, или погонный коэффициент постели k определим как отношение вертикальной жесткости тросового закрепления к расстоянию между этими закреплениями.

Такой подход представляется уместным, т. к. длина сооружения составляет километры, а расстояние между узлами — десятки метров при значительной изгибной жесткости балки высотой около 10 м.

Если учесть, что для постоянной вертикальной жесткости закреплений необходимо увеличивать площадь сечения с глубиной, то k не зависит от глубины.

$$k = \frac{E_{\kappa} A_{\kappa}(x)}{l_{\text{глуб}}(x) d'} \quad (2)$$

т. е. отношение $E_{\kappa} A_{\kappa} / l_{\text{глуб}} = \text{const}$.

Найдем погонный коэффициент постели для модели с параметрами указанными в таблице 1 и для данных параметров сооружения получим критическую скорость движения одиночной силы [10], движущейся в средней части сооружения, где влияние краевых эффектов незначительно.

Таблица 1 / Table 1

Критическая скорость и параметры ППТ

Critical velocity and submerged floating tunnel parameters

Фактор жесткости <i>Stiffness factor</i>	EJ	376,6E+04	МНм ² <i>MN·m²</i>
Погонная масса тоннеля <i>Carrying weight of the tunnel</i>	m	4,69E+04	кг/м <i>kg/m</i>
Шаг узлов закрепления <i>Spacing of bracing nodes</i>	d	30,00	М <i>m</i>
Коэффициент постели <i>Bedding value</i>	k	3,94E+05	Па <i>Pa</i>
Критическая скорость <i>Critical speed</i>	V_{cr}	218,25	м/с <i>m/s</i>

Разработано авторами / Developed by the authors

Из-за небольшой жесткости тросов подводного плавающего тоннеля, однако достаточной для приемлемых деформаций, получена критическая скорость, которая достигается рассматриваемыми подвижными составами, например, сверхскоростным поездом.

Указанная критическая скорость 218,25 м/с получена для бесконечной балки на упругом основании при движении одиночной силы [10].

Рассмотрим задачу о движении одиночной силы равной весу вагона по рассматриваемому сооружению длиной более 2,5 тыс. м по методу [9] (рис. 1, табл. 2).

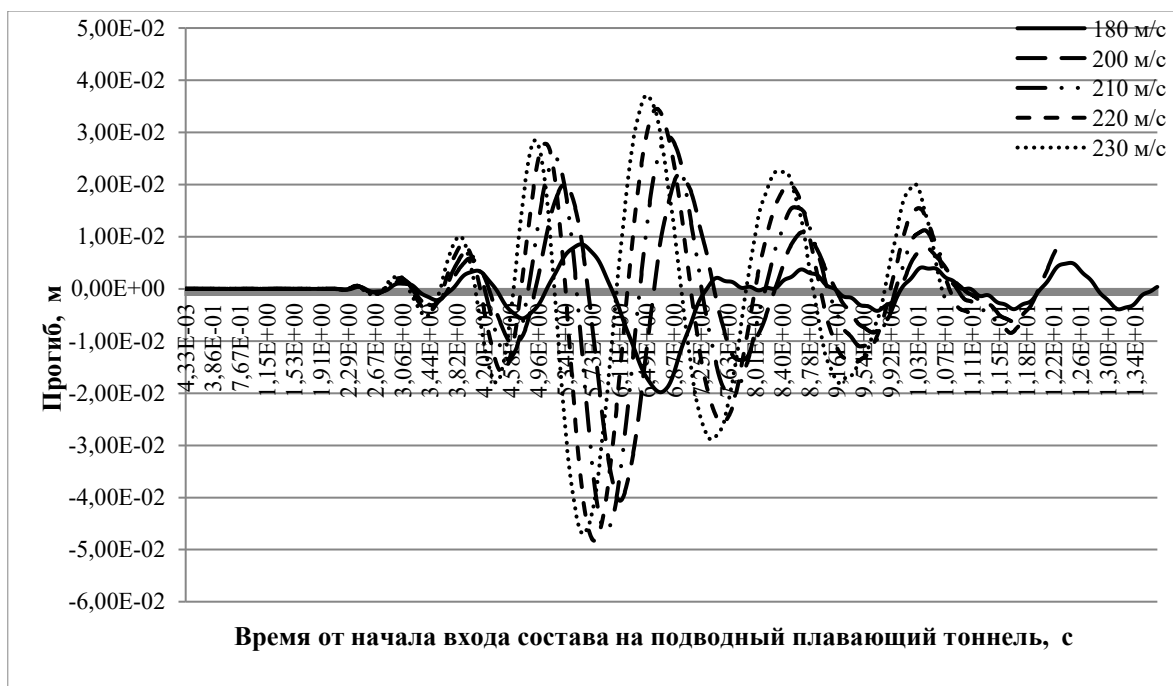


Рисунок 1. Прогобы середины балки жесткости при различных скоростях движения о методу [9]. Нагрузка в виде сосредоточенной силы (разработано авторами)

Figure 1. Deflections of the centre of the stiffening beam at different speeds according to the method [9]. The load is in the form of a concentrated force (developed by the authors)



Рисунок 2. Вертикальные скорости середины балки жесткости при различных скоростях движения. Нагрузка в виде сосредоточенной силы (разработано авторами)

Figure 2. Vertical velocities of the centre of the stiffener beam at different speeds. The load is in the form of a concentrated force (developed by the authors)

Таблица 2 / Table 2

**Экстремальные параметры динамики балки жесткости
ППТ при разных скоростях сосредоточенной силы по методу [9]
Extreme parameters of submerged floating tunnel stiffener beam
dynamics at different concentrated force velocities using the method of [9]**

Скорость состава, м/с <i>Waggonage speed, m/s</i>	Модуль максимального прогиба, м <i>Modulus of maximum deflection, m</i>	Максимальная вертикальная скорость, м/с <i>Maximum vertical velocity, m/s</i>
180	0,0198	0,0461
200	0,0406	0,123
210	0,0462	0,160
220	0,0483	0,187
230	0,0470	0,181

Разработано авторами / Developed by the authors

Из рисунка 1 и таблицы 2 видно, что при скорости 220 м/с наблюдаются максимальные параметры движения балки, что весьма близко к значению критической скорости, полученной для бесконечной балки на упругом основании (218 м/с) по [10]. Этот вывод указывает на достоверность результатов, получаемых численными экспериментами по [9]. Скорость до 180 м/с явно докритическая, затем происходит значительное увеличение (более чем в 4 раза) прогибов, скорости деформации возрастают более чем в 3 раза. При этом решение асимптотически устойчиво (рис. 1, 2). **Незначительное различие критической скорости, полученной разными методами, и асимптотическая устойчивость решения указывают на достоверность новых результатов.**

Важным является вопрос о длине волны в балке жесткости. На рисунке 1 можно заметить, что разница между экстремумами графиков составляет около 1,5 с, следовательно, при критической скорости $v_{кр} = \frac{218 \text{ м}}{с}$, длина волны равна 327 м. Такая длина волны много больше высоты стержня балки жесткости (около 10 м), поэтому колебания балки могут корректно описываться моделью Бернулли-Эйлера.

Бидерман В.Л. в [10] получил теоретически бесконечно большую реакцию балки при движении силы с критической скоростью. Однако делается вывод [10], что безграничное возрастание прогибов является следствием пренебрежения затуханием, в действительности при приближении скорости движения нагрузки к критической прогибы резко возрастают, но сохраняют конечное значение [10].

То есть, так как в реальной конструкции присутствует демпфирование, прогибы в нашем решении конечны. К тому же рассмотрение перемещающейся силы по балке жесткости ППТ не учитывает действительное взаимодействие поезда и ППТ. В реальной конструкции нагрузка представляет собой множество инерционных сил, распределенных вдоль состава, который к тому же имеет значительное

демпфирование. Поэтому далее будет рассмотрено движение реального состава при разных скоростях.

В результате удалось показать, что методика численного интегрирования на основе метода конечных разностей дает результаты, сходящиеся с известной формулой критической скорости для одиночной постоянной силы.

Дополнительные обоснования достоверности результатов численного моделирования взаимодействия поезда с сооружением заключаются в демонстрации асимптотической устойчивости решения. Рассмотрим колебания балки жесткости сооружения при численном интегрировании уравнений колебаний системы с различным шагом по времени для разностной схемы численного интегрирования. На рисунке 3 представлены колебания середины балки жесткости при проходе поезда из 10 вагонов с общей массой вагона 73,7 т и 10 степенями свободы вагона со скоростью 278 м/с (1 000 км/ч). Для обоснования асимптотической устойчивости решения положим сопротивление воды равно нулю.

В момент времени 9,34 с поезд полностью проходит сооружение. Как видно, свободные колебания средней точки ограничены по величине. Это свидетельствует об асимптотической устойчивости вычисления динамического процесса при достаточно малом шаге интегрирования, что означает корректность применения разностной схемы интегрирования уравнения колебаний системы, включающей подвижной состав и подводное сооружение. Как видно, затухания колебаний после прохода поезда весьма слабое, что естественно при отсутствии сопротивления среды, учитывается только демпфирование в материале сооружения.

Однако чрезвычайно важным является ограниченность амплитуды колебаний и отсутствие роста амплитуды, который свидетельствовал бы о неустойчивости численного метода интегрирования уравнения колебаний.

Рисунок 4 демонстрирует очевидную неустойчивость процесса интегрирования уравнений колебаний при слишком большом шаге интегрирования Δt . На рисунке 4 видно, что шаг интегрирования слишком велик, решение неустойчиво и перемещения превышают 250 м, это означает, что решение неверно.

Таким образом, проявляется важное свойство явной схемы интегрирования уравнений колебаний [9] — при неудачном назначении параметров интегрирования (временного шага) результат становится очевидно недостоверен. На рисунке 3 выбран более короткий шаг, при котором достигается устойчивое решение. При этом видно, что решения на рисунках 3, 4 получены для приблизительно одинаковых интервалов времени $\sim 9,5$ с.



Рисунок 3. Диаграмма перемещений середины балки жесткости сооружения при отсутствии вязкого сопротивления среды (разработано авторами)

Figure 3. Displacement diagram of the centre of a stiffening beam of a structure in the absence of viscous resistance of the medium (developed by the authors)



Рисунок 4. Диаграмма колебаний середины балки жесткости сооружения при скорости сверхскоростного состава 278 м/с. Демонстрируется неустойчивость численного интегрирования при слишком большом шаге интегрирования Δt (разработано авторами)

Figure 4. Diagram of vibrations of the middle of the stiffening beam of the structure at the velocity of the superfast train 278 m/s. The instability of numerical integration at too large integration step Δt is demonstrated (developed by the authors)

Из таблицы 3 следует, что коэффициент шага интегрирования 0,25 дает удовлетворительную точность решения, т. к. дальнейшее уменьшение шага в ~ 2 раза не вносит уточнений в значения прогибов, но приводит к чрезмерным затратам времени. Небольшой рост скорости деформирования с уменьшением шага объясняется учетом высокочастотных составляющих при меньших шагах Δt .

Таблица 3 / Table 3

**Максимальные прогибы и скорости середины балки
сооружения под поездом при разных шагах интегрирования**

**Maximum deflections and velocities of the centre beam
of the structure under the train at different integration steps**

Коэффициент шага интегрирования <i>Integration step coefficient</i>	Максимальный прогиб, м <i>Maximum deflection, m</i>	Максимальные скорости, м/с <i>Maximum velocities, m/s</i>
0,05	0,0196	0,0626
0,1	0,0196	0,0624
0,25	0,0196	0,0613
0,5	241,0	6 500

Разработано авторами / Developed by the authors

Таким образом, установлены условия асимптотической устойчивости численного интегрирования, обоснован выбор шага численного интегрирования уравнений колебаний, что указывает на достоверность результатов численных экспериментов.

2. Взаимодействие подвижного состава с подводным плавающим тоннелем

2. Interaction of rolling stock with an underwater floating tunnel

Движение грузового поезда

Goods train movement

Рассмотрим движение грузового поезда из 60 полувагонов 12-132 (длина вагона по осям сцепок 13,92 м) с тележками ЦНИИ-ХЗ-О 18-194-1. Рассматривается 10 степеней свободы вагона. Общая масса груженого вагона составляет 92 т. Общая масса поезда — 5 520 т, его длина — 835,2 м, что соответствует минимальной длине приемо-отправочных путей. Скорость движения — 27,8 м/с, или 100 км/ч (конструкционная скорость вагона 120 км/ч). Движение осуществляется по однопутному подводному плавающему тоннелю ($EJ = 317,18e + 4 \text{ МН}\cdot\text{м}^2$), закрепленному тросами, жесткость каждого $EA = 1,04e + 0,4 \text{ Мпа}\cdot\text{м}^2$ (Параметры жесткости указаны из расчета по прочности исходя из суммы постоянных нагрузок 344 кН/м). Отметим здесь, что нагружение постоянными нагрузками создает экстремальные усилия, т. к. появление поезда вызывает снижение усилий в тросах. Указанная нагрузка является следствием значительной архимедовой силы, которая вытекает из геометрии балки жесткости ППТ, т. е. габарита приближения. Однако, можно добиться снижения суммы постоянных нагрузок увеличением собственного веса.

Как будет показано далее, сумма постоянных нагрузок (собственный вес и архимедова сила) может быть снижена для грузового поезда до 73,5 кН/м. При такой сумме постоянных нагрузок обеспечивается

повсеместное растяжение тросов при проходе поезда. Это условие необходимо для обеспечения плавучести. В случае сжатия троса балка жесткости будет погружаться, что недопустимо.

Рассмотрим задачу движения вышеуказанного поезда при отсутствии сопротивления (вязкости) воды. Определенные в такой постановке задачи скорости перемещений балки жесткости послужат обоснованием для назначения вязкого и инерционного сопротивления среды колебаниям балки. На рисунке 5 показана эпюра усилий в тросах при нахождении состава в средней части сооружения. Сжатия тросов не происходит ни в какой момент времени. Минимальное значение усилия $1,43 \cdot 10^3$ Н возникает в тросе № 77, когда состав выходит из подводного тоннеля.

Максимальная скорость центрального узла при движении поезда при отсутствии вязкости воды достигает $3,39 \cdot 10^{-2}$ м/с.



Рисунок 5. Эпюра усилий в тросах в момент $t = 76,5$ с без учета сопротивления воды. Состав из 60 вагонов между узлами 44 и 72 (разработано авторами)

Figure 5. Stresses epure in the cables at the moment $t = 76,5$ s without taking into account water resistance. Composition of 60 wagons between nodes 44 and 72 (developed by the authors)

Движение высокоскоростных поездов

Movement of high-speed trains

Рассмотрим движение по вышеописанному сооружению поезда с распределенной тягой типа Сапсан (ICE3, CRH3, CRH380В и др.) с параметрами, указанными в [11]. Общая масса вагона составляет 73 672 кг, средняя распределенная нагрузка от вагонов 29,9 кН/м, сумма постоянных нагрузок равна 0. В этом случае получим диаграмму усилий в тросе (рис. 6) в той части сооружения, которая свободна от краевых эффектов для скорости поезда $V = 100$ м/с (360 км/ч). Как видно, при достаточно большом удалении поезда от порталного закрепления усилие в тросе

равно нулю в силу нулевой суммы постоянных нагрузок. Однако при проходе поезда «сжатие» троса составит -940 кН. Такое значение усилия недопустимо т. к. трос не воспринимает сжатие, оно ведет к значительным вертикальным деформациям балки жесткости, её погружению (утрате положительной плавучести) и росту изгибающих моментов в ней. Суммы постоянных нагрузок в 33 кН/м оказывается достаточно, чтобы не происходило сжатия тросов (рис. 7).

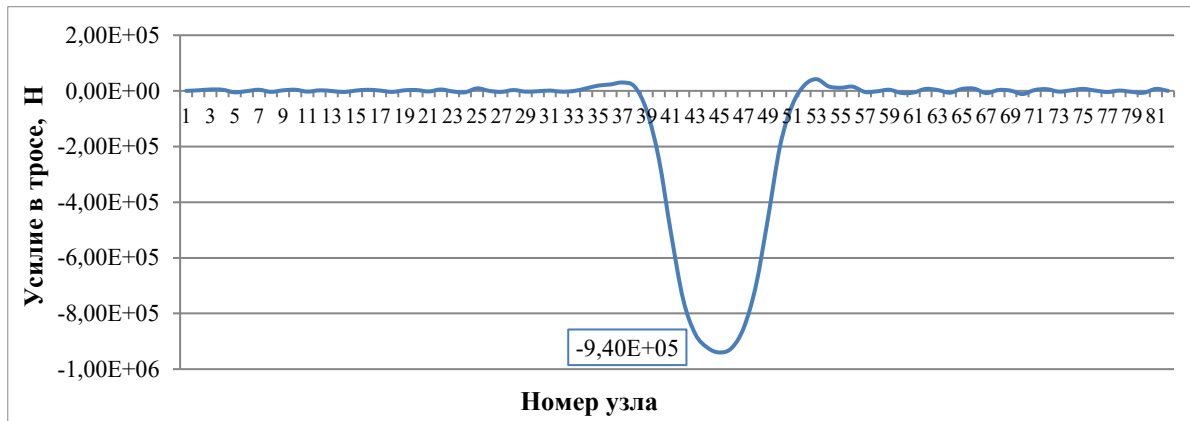


Рисунок 6. Эпюра усилий в тросах в момент $t = 14,55$ с без учета сопротивления воды при сумме постоянных нагрузок равной 0. Состав из 10 вагонов между узлами 40 и 49. Скорость движения 100 м/с (360 км/ч) (разработано авторами)

Figure 6. Stresses epure in cables at moment $t = 14,55$ s without taking into account water resistance with the sum of constant loads equal to 0. A train of 10 wagons between nodes 40 and 49. Travelling speed 100 m/s (360 km/h) (developed by the authors)

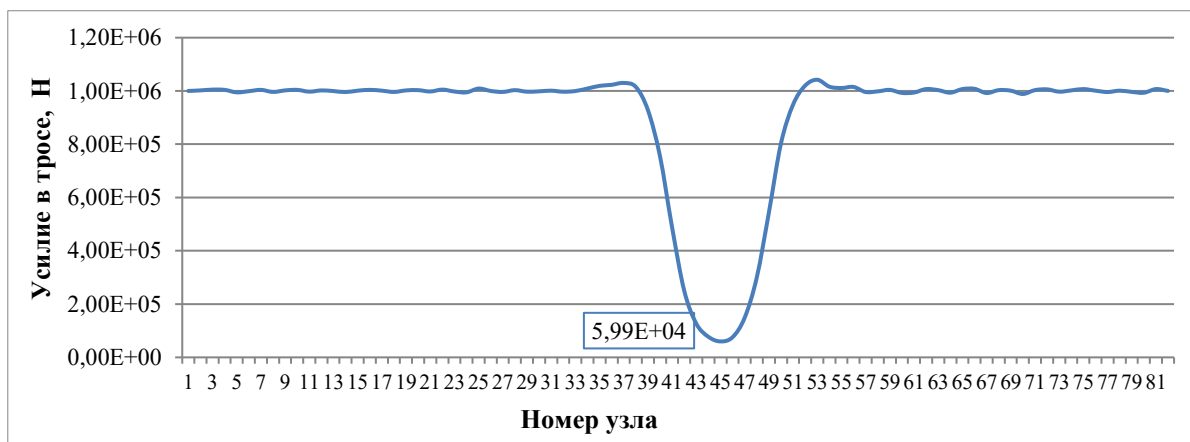


Рисунок 7. Эпюра усилий в тросах в момент $t = 14,55$ с без учета сопротивления воды. Состав из 10 вагонов между узлами 40 и 49. Сумма постоянных нагрузок 33 кН/м. Скорость движения 100 м/с (360 км/ч) (разработано авторами)

Figure 7. Stresses epure in cables at the moment $t = 14,55$ s without taking into account water resistance. A train of 10 wagons between nodes 40 and 49. The sum of constant loads is 33 kN/m. Travelling speed 100 m/s (360 km/h) (developed by the authors)

Максимальная скорость центрального узла при движении временной высокоскоростной нагрузки при отсутствии сопротивления воды достигает $1,84 \cdot 10^{-2}$ м/с.



Рисунок 8. Вертикальная скорость перемещения без учета сопротивления воды центрального узла № 41. Скорость движения 100 м/с (360 км/ч) (разработано авторами)

Figure 8. Vertical displacement velocity excluding water resistance of centre node № 41. The speed of movement is 100 m/s (360 km/h) (developed by the authors)

Движение сверхскоростных поездов

Movement of superfast trains

Ввиду обсуждаемых возможностей строительства вакуумной транспортной системы (Hyperloop, Маглев) рассмотрим скорость поезда 278 м/с (1 000 км/ч). На рисунках 9, 10 показаны результаты численных экспериментов для этой скорости поезда. При сумме постоянных нагрузок равной 45 кН/м не будет возникать сжимающих усилий.

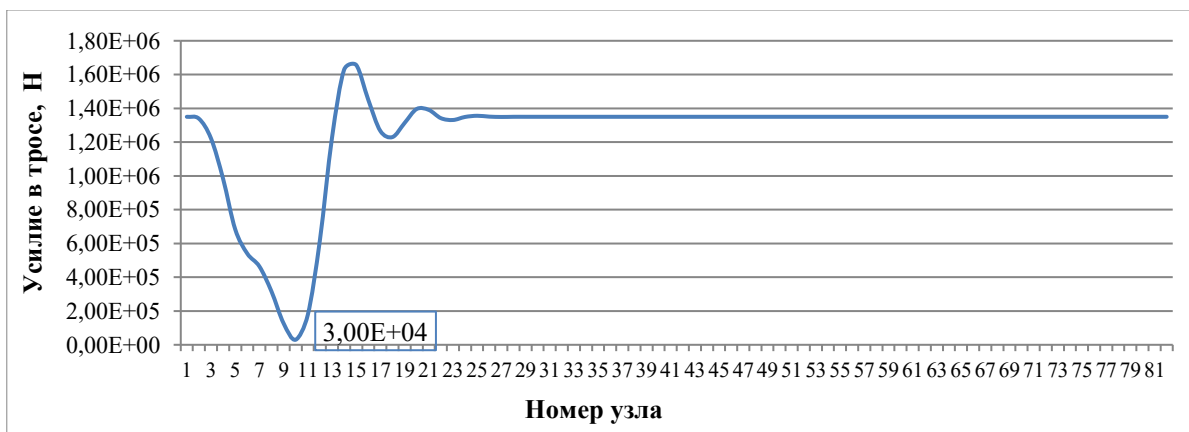


Рисунок 9. Эюра усилий в тросах в момент $t = 1,38$ с без учета сопротивления воды. Состав из 10 вагонов между узлами 4 и 13. Скорость движения 278 м/с (разработано авторами)

Figure 9. Stresses epure in cables at the moment $t = 1,38$ s without taking into account water resistance. A train of 10 wagons between nodes 4 and 13. The travelling speed is 278 m/s (developed by the authors)



Рисунок 10. Вертикальная скорость перемещения центрального узла № 41 без учета сопротивления воды. Скорость движения 278 м/с (1 000 км/ч) (разработано авторами)

Figure 10. Vertical movement velocity of centre node № 41 without considering water resistance. Travelling speed 278 m/s (1 000 km/h) (developed by the authors)

Максимальная скорость центрального узла при движении временной гипотетической нагрузки при отсутствии вязкости воды достигает $6,26 \cdot 10^{-2}$ м/с.

Полученные скорости перемещений балки жесткости позволили на основании¹ получить значения сопротивления воды на основе закона сопротивления Ньютона, учитывающего, в отличие от закона вязкости Стокса, не только вязкое, но и лобовое сопротивление в силу инерции среды (табл. 4).

Таблица 4 / Table 4

Сопротивление среды при различных скоростях движения и деформирования
Environmental resistance at different speeds of movement and deformation

Скорость поезда, м/с <i>Train speed, m/s</i>	Скорость деформации, м/с <i>Deformation velocity, m/s</i>	Re*	Коэффициент сопротивления, с, Н·с/м <i>Resistance coefficient, s, N·s/m</i>
27,8	$3,39 \cdot 10^{-2}$	$3,05 \cdot 10^5$	116,29
100	$1,84 \cdot 10^{-2}$	$1,66 \cdot 10^5$	63,12
278	$6,26 \cdot 10^{-2}$	$5,63 \cdot 10^5$	85,90

* Число Рейнольдса. Разработано авторами / * Reynolds number. Developed by the authors

По полученным данным видно, что наибольший коэффициент сопротивления получен для грузового поезда несмотря на то, что вертикальная скорость перемещений ниже, чем для сверхскоростного поезда. Дело в том, что в функции зависимости коэффициента лобового сопротивления от числа Рейнольдса можно наблюдать так называемый кризис около значений $Re \approx 4e5$ [12]. Такой кризис появляется из-за

¹ Путилов К.А. Курс физики. Том 1. Механика. Акустика. Молекулярная физика. Термодинамика. — М.: Физматгиз, 1963. — 560 с.

изменения характера обтекания жидкостью поверхности цилиндра [12], или движении цилиндра в жидкости.

Полученные значения сопротивления s будут использованы в уравнении колебаний балки Бернулли-Эйлера при численном интегрировании уравнения колебаний балки жесткости. Далее мы увидим, что сопротивление среды слабо влияет на поведение сооружения, в большей степени это поведение зависит от характеристик самого сооружения и подвижного состава.

3. Взаимодействие грузового состава с подводным плавающим тоннелем с учетом сопротивления среды

3. Interaction of a goods train with an underwater floating tunnel taking into account the environmental resistance

Рассмотрим движение грузового состава с учетом демпфирования среды при постоянной вертикальной жесткости анкерных тросов. На рисунке 11 приведена диаграмма изменения прогиба балки жесткости в середине сооружения при движении состава из 60 вагонов с параметрами, указанными ранее, на рисунке 12 — диаграмма усилия в тросах в середине сооружения. Как мы можем наблюдать, форма графиков похожа, потому что в середине сооружения находится трос и усилие в тросе прямо пропорционально перемещению.

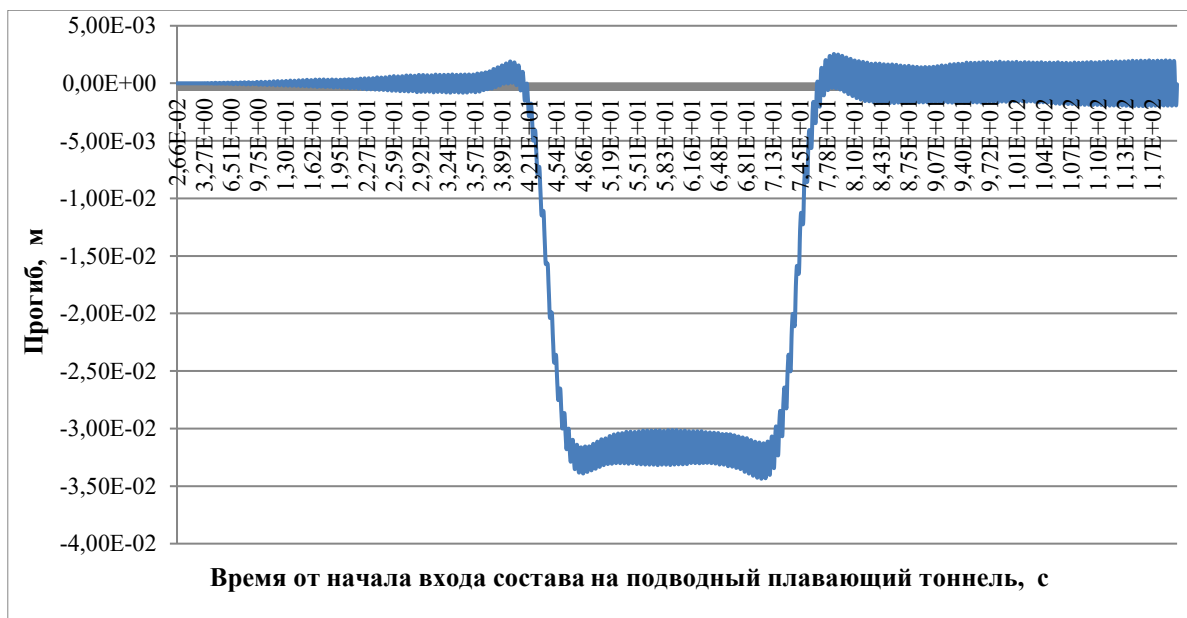


Рисунок 11. Диаграмма прогиба балки жесткости в середине сооружения во времени от грузового состава при скорости 27,8 м/с (разработано авторами)

Figure 11. Diagram of stiffener beam deflection in the middle of the structure in time from a freight train at a speed of 27,8 m/s (developed by the authors)

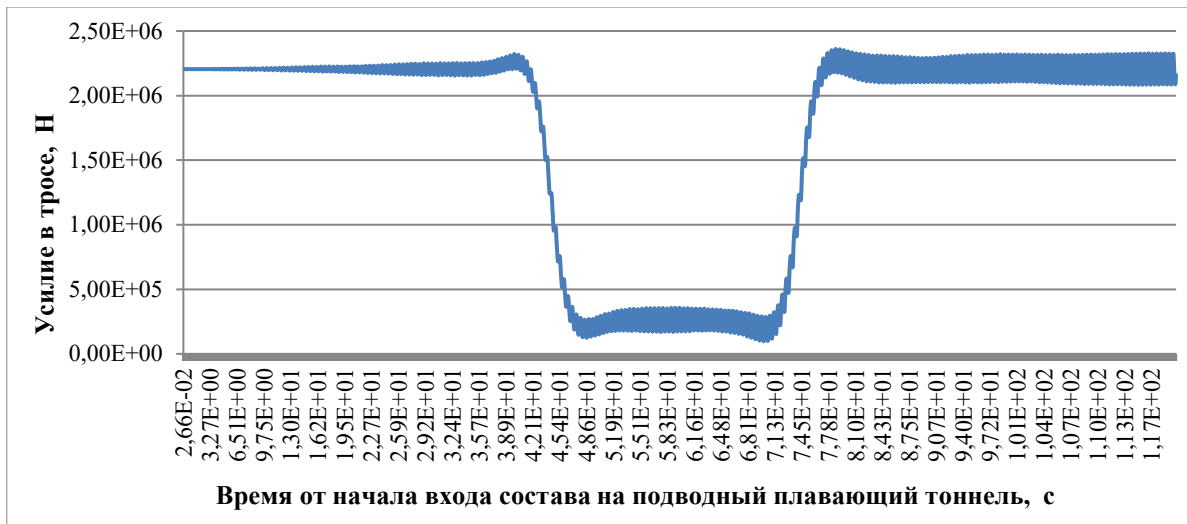


Рисунок 12. Диаграмма усилия в тросе 41 узла в середине сооружения (разработано авторами)

Figure 12. Stress diagram in the cable of 41 knots in the middle of the structure (developed by the authors)

Сопоставление рисунка 5 (отсутствие сопротивления) и рисунка 13 (с учетом сопротивления) показывает, что разница динамических усилий в тросах не превышает 1 %.

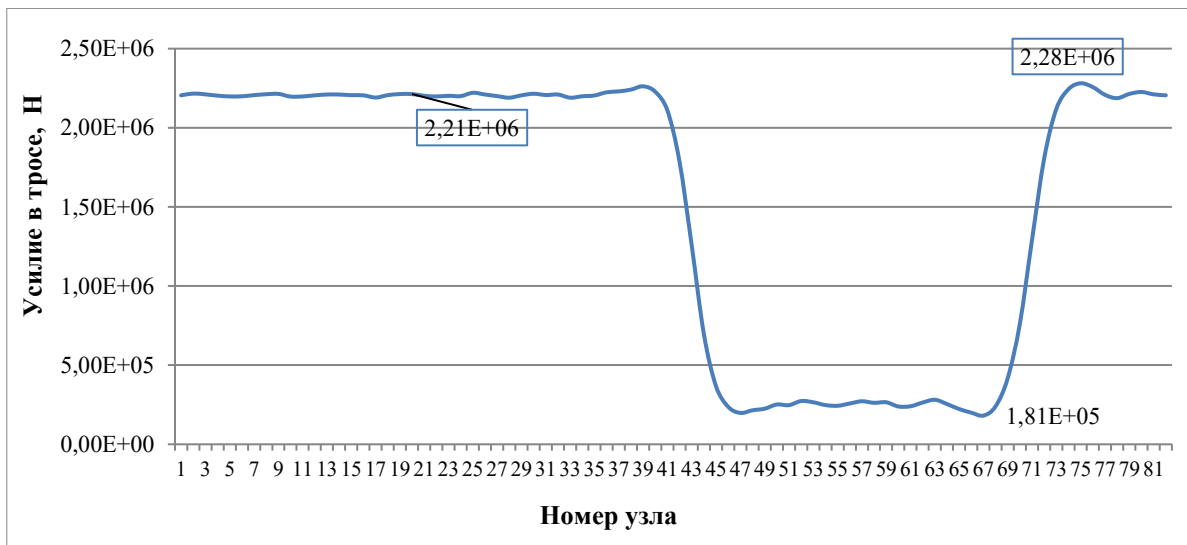


Рисунок 13. Эпюра усилий в тросах в момент $t = 76,5$ с. Состав из 60 вагонов между узлами 44 и 72 (разработано авторами)

Figure 13. Stresses epure in cables at the moment $t = 76,5$ s. Composition of 60 wagons between nodes 44 and 72 (developed by the authors)

Также рассмотрим влияние демпфирования на вертикальную скорость перемещения. Максимальная вертикальная скорость при учете вязкости воды уменьшается на 3 %. Таким образом, можно пренебречь вариацией скорости перемещений балки при учете сопротивления среды, которое, в целом, невелико. Результаты сравнения приведены в таблице 5.

Таблица 5 / Table 5

**Параметры внутренних усилий в конструкции ППТ
при разном сопротивлении среды c при движении грузового поезда**

**Parameters of internal forces in the submerged floating tunnels
structure at different medium resistance c during goods train movement**

Наименование <i>Name</i>	$c = 0$	$c = 116$	Разность <i>Difference</i>	Разность, % <i>Difference, %</i>
Минимальное усилие в тросе №41, кН <i>Minimum force in cable №41, kN</i>	183	181	2	1,1
Изгибающий момент узел №41, кН·м <i>Bending moment of node №41, kN·m</i>	21 440	21 100	340	1,61
Максимальный изгибающий момент, кН·м <i>Maximum bending moment, kN·m</i>	52 200	51 780	100	0,81
Максимальная скорость, м/с <i>Maximum speed, m/s</i>	0,0339	0,0328	0,0011	3,35

Разработано авторами / Developed by the authors

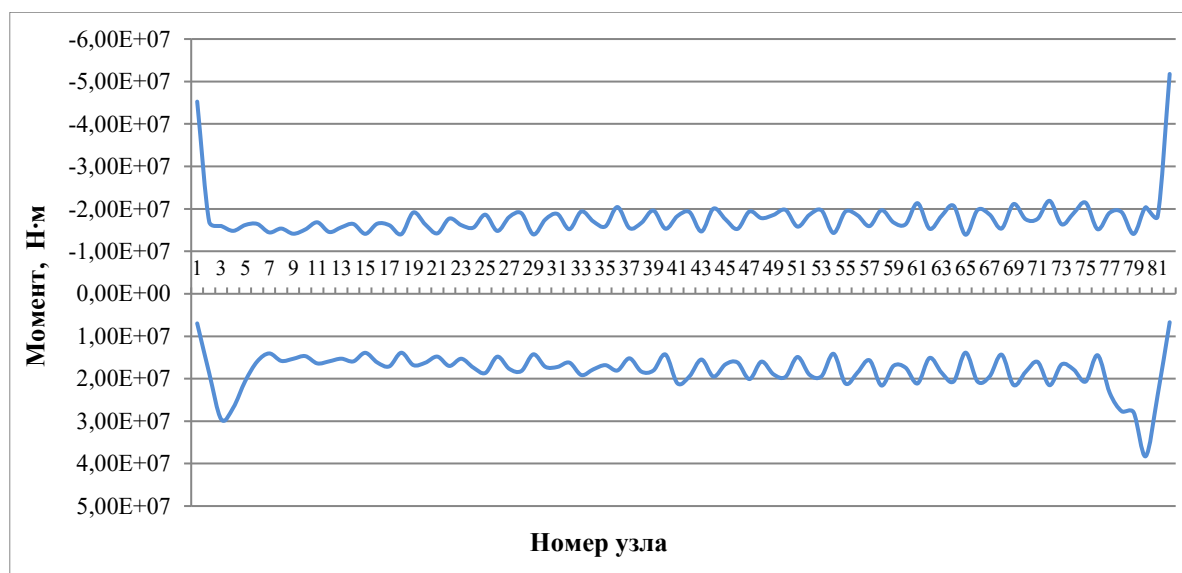


Рисунок 14. Огибающая эпюра моментов от временной нагрузки. Отчетливо видны краевые эффекты (разработано авторами)

Figure 14. Envelope epure of moments from the temporary load. Edge effects are clearly visible (developed by the authors)

Сложив огибающую эпюру моментов (рис. 14) и огибающую эпюру моментов в узлах от постоянных нагрузок, равных 73,5 кН/м получим эпюру моментов на рисунке 15. Обратим внимание на значительные краевые эффекты при одинаковой жесткости тросов, т. е. до оптимизации при воздействии постоянных нагрузок [13]. Кроме того, видно, что внутренние усилия от временной и постоянных нагрузок имеют разные знаки.

Отношение достаточной суммарной постоянной нагрузки для повсеместного растяжения анкерных тросов к распределенной нагрузке от веса поезда в данном случае составляет $\frac{73,5 \frac{\text{кН}}{\text{м}}}{66,1 \frac{\text{кН}}{\text{м}}} = 1,11$. Эту величину можно

рассматривать как динамический коэффициент к временной нагрузке от веса поезда для рассмотрения вопроса о назначении суммарной статической нагрузки по весу поезда для недопущения отрицательных усилий в тросах и обеспечения непотопляемости.

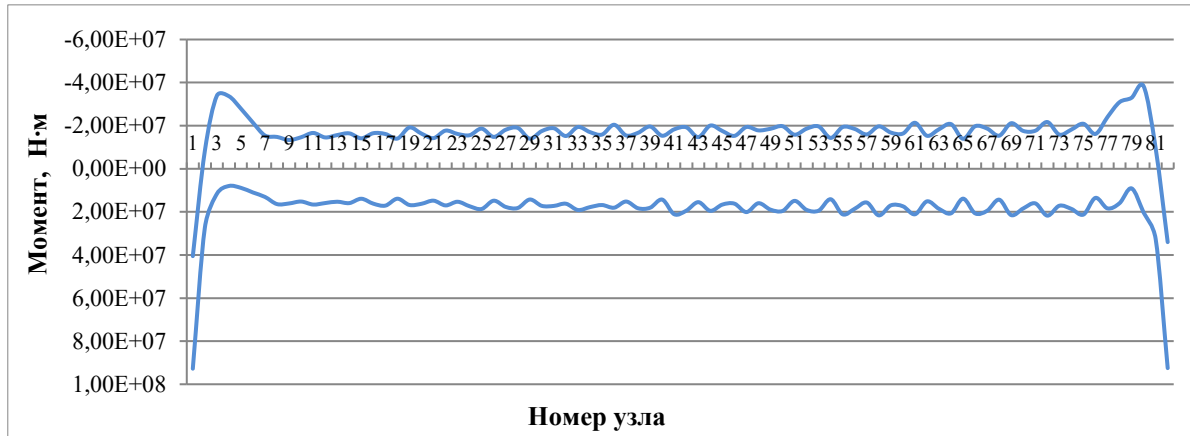


Рисунок 15. Суммарная огибающая эпюра моментов от временной и постоянной нагрузок при прохождении грузового состава 27,8 м/с до оптимизации краевых эффектов (разработано авторами)

Figure 15. Cumulative envelope epure of moments from temporary and permanent loads when the freight train passes 27,8 m/s before edge effects are optimised (developed by the authors)

На рисунке 13 можем наблюдать, что в центральной части ППТ перед составом и до состава присутствует небольшая «волна», которая дополнительно растягивает тросы. Отношение максимального растяжения троса к растяжению, вызванному только статической нагрузкой (достаточной суммарной постоянной нагрузкой для повсеместного растяжения анкерных тросов) назовем динамический коэффициент волны. Для рассматриваемой модели ППТ и грузового поезда он равен $\frac{2\,280\text{ кН}}{2\,210\text{ кН}} = 1,032$. Этот коэффициент нужен при расчете тросов на прочность.

4. Динамическое поведение сооружения при движении высокоскоростного поезда

Dynamic behaviour of a structure during high-speed train movement

Рассмотрим движение высокоскоростного состава с учетом демпфирования среды при постоянной вертикальной жесткости тросов. Для скоростного поезда временная нагрузка составляет 29,7 кН/м. Очевидно, что значение постоянной нагрузки влияет на усилия в тросах. Примем сумму постоянных нагрузок 33 кН/м чтобы при скорости 100 м/с не возникало сжимающих усилий в тросах (рис. 16–18, табл. 6).

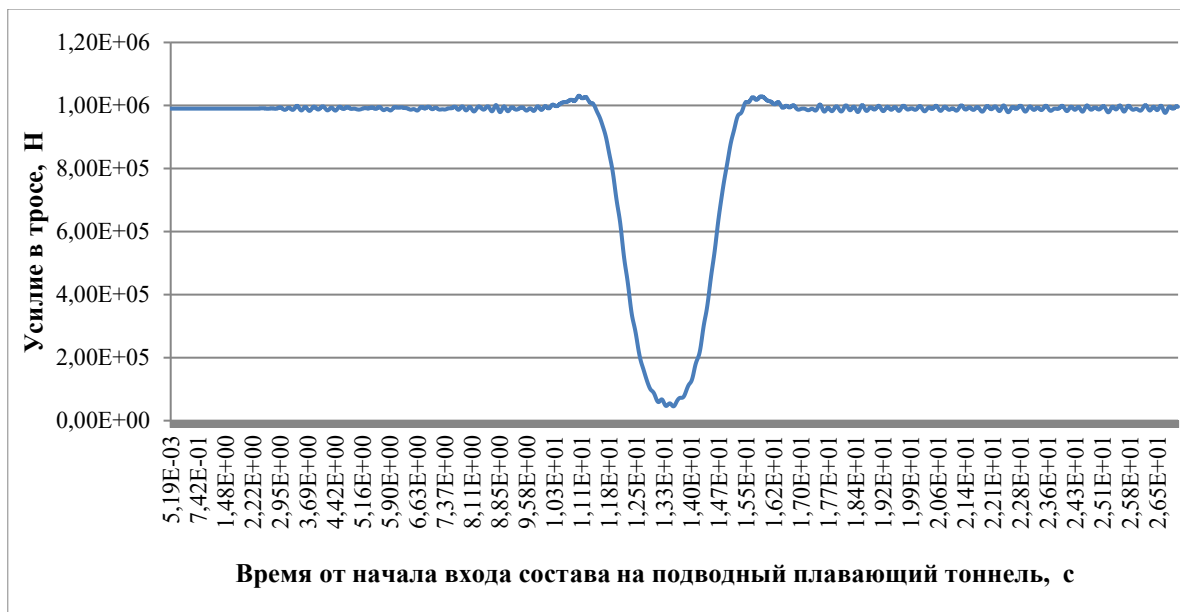


Рисунок 16. Диаграмма усилия в среднем тросе № 41 при сумме постоянных нагрузок 33 кН/м (разработано авторами)

Figure 16. Stress diagram in the middle cable № 41 at a sum of constant loads of 33 kN/m (developed by the authors)

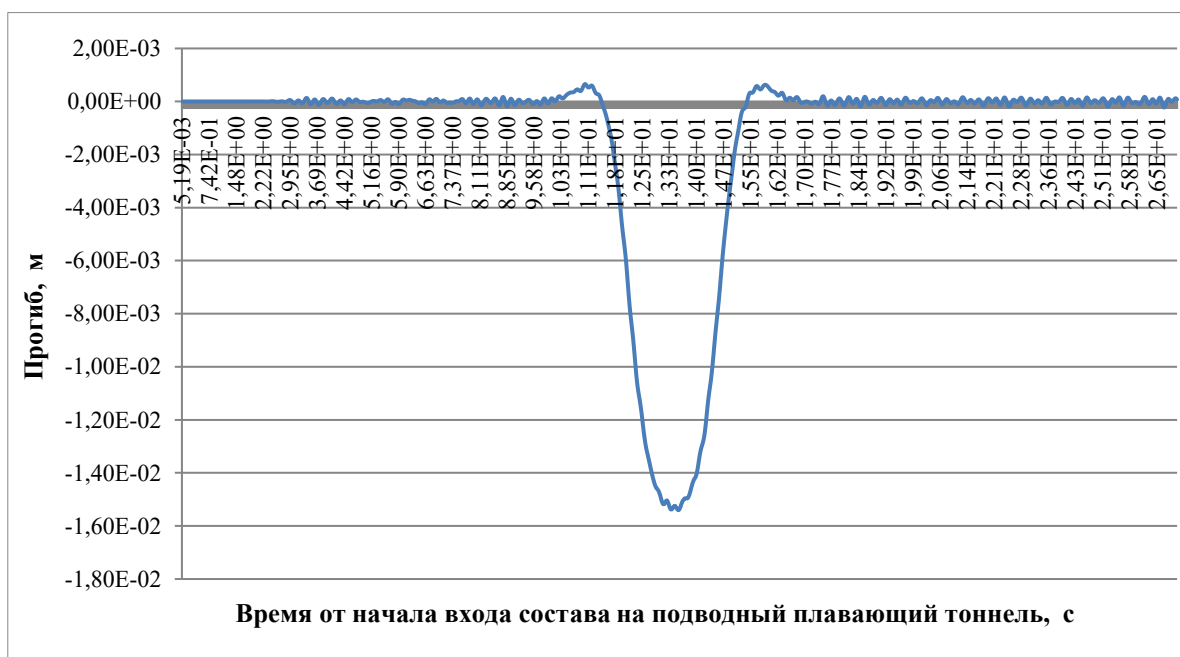


Рисунок 17. Деформации балки жесткости при сумме постоянных нагрузок 33 кН/м (разработано авторами)

Figure 17. Deformations of a stiffening beam under a sum of constant loads of 33 kN/m (developed by the authors)

Диаграмма на рисунке 17 демонстрирует весьма незначительные прогибы конструкции под действием высокоскоростного поезда. Это позволяет применять следствие гипотезы малых деформаций, а именно принцип суперпозиции нагрузок.

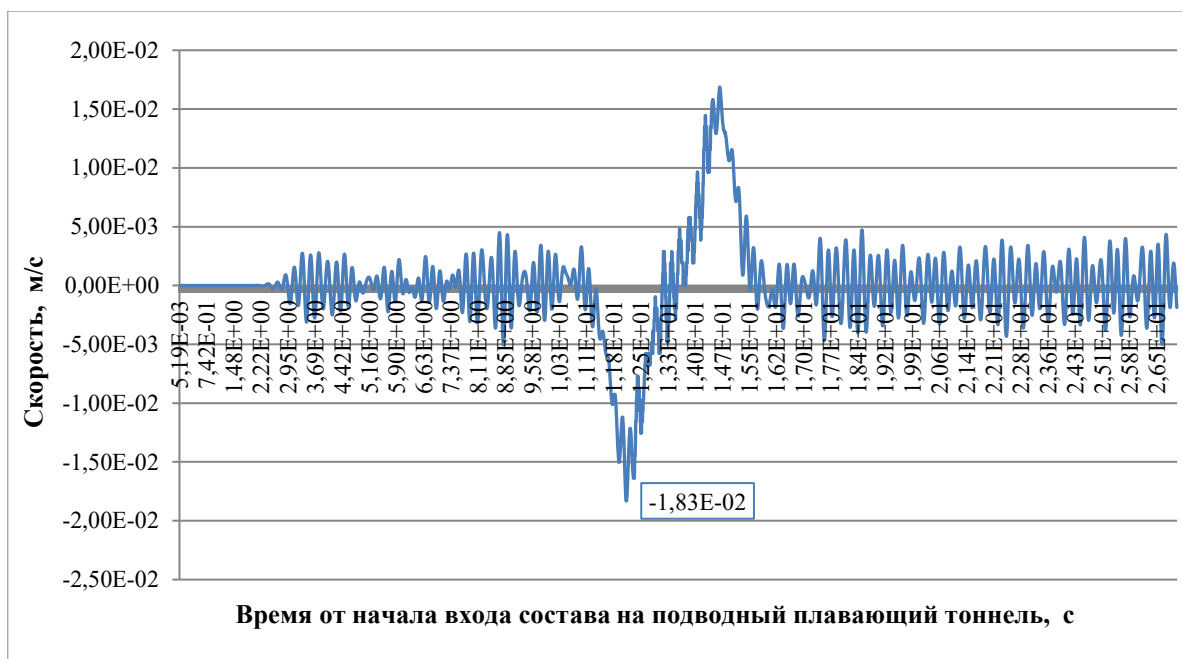


Рисунок 18. Вертикальная скорость перемещения с учетом вязкости воды (разработано авторами)

Figure 18. Vertical displacement velocity considering water viscosity (developed by the authors)

Таблица 6 / Table 6

Параметры внутренних усилий в конструкции от высокоскоростного поезда при разном демпфировании с

Parameters of internal forces in the structure from a high-speed train at different damping with

Наименование <i>Name</i>	$c = 0$	$c = 63$	Разность <i>Difference</i>	Разность, % <i>Difference, %</i>
Минимальное усилие в тросе №41, кН <i>Minimum force in cable № 41, kN</i>	45,48	45,48	0	0
Изгибающий момент узел №41, кН·м <i>Bending moment of node № 41, kN·m</i>	7 070	7 065	5	0,07
Максимальный изгибающий момент, кН·м <i>Maximum bending moment, kN·m</i>	21 810	21 810	0	0
Максимальная скорость деформирования, м/с <i>Maximum deformation speed, m/s</i>	0,0184	0,0183	0,0001	0,5

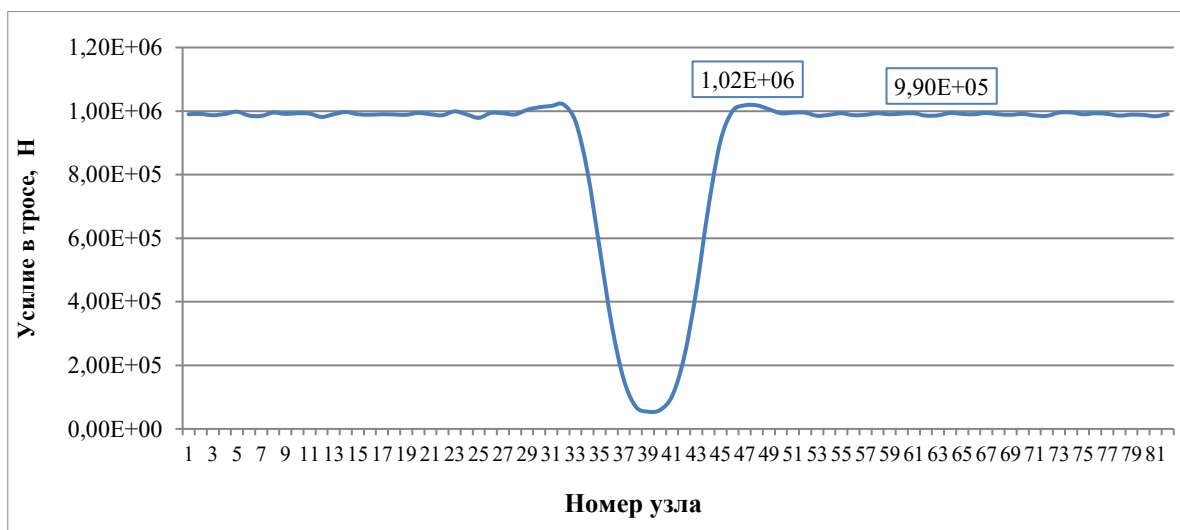
Разработано авторами / Developed by the authors

Отношение достаточной суммарной постоянной нагрузки для повсеместного растяжения анкерных тросов к распределенной нагрузке от

веса поезда в данном случае составляет $\frac{33 \frac{\text{кН}}{\text{м}}}{29,7 \frac{\text{кН}}{\text{м}}} = 1,11$.

Эту величину можно рассматривать как динамический коэффициент к временной нагрузке от веса поезда для рассмотрения вопроса о назначении суммарной статической нагрузки по весу поезда для недопущения отрицательных усилий в тросах.

На рисунке 19 можем наблюдать, что в центральной части ППТ перед составом и до состава присутствует небольшая «волна», которая дополнительно растягивает тросы. Динамический коэффициент «волны» для расчета тросов на прочность при высокоскоростном движении поезда равен $\frac{1\,020\text{ кН}}{990\text{ кН}} = 1,030$.



*Рисунок 19. Эюра усилий в тросах в момент $t = 12,88$ с.
Состав из 10 вагонов между узлами 35 и 43 (разработано авторами)*

*Figure 19. Stresses epure in cables at the moment $t = 12,88$ s.
Composition of 10 wagons between nodes 35 and 43 (developed by the authors)*

5. Особенности динамики сооружения при движении сверхскоростного поезда со скоростью 1 000 км/ч

5. Peculiarities of structure dynamics when a superfast train moves at a speed of 1 000 km/h

Рассмотрим случай движения по сооружению гипотетического сверхскоростного поезда со скоростью движения 287 м/с (1 000 км/ч). Очевидно, что такая скорость потребует специального подвижного состава (как минимум с принципиально новой подвеской) и пути.

Но можно предположить, что массо-габаритные характеристики поезда будут близки к поездам типа Сапсан. Например, для поезда Маглев Трансрапид07 длина вагона такая же и равна 24,8 м при погонной нагрузке ~21 кН/м [14].

С помощью ряда численных экспериментов было определено критическое значение суммарной постоянной нагрузки 44 кН/м, при которой тросы все время остаются растянутыми (рис. 20).



Рисунок 20. Диаграмма усилия в среднем тросе № 41 при сумме постоянных нагрузок 44 кН/м. Скорость поезда 1 000 км/ч (разработано авторами)

Figure 20. Stress diagram in the middle cable № 41 at a constant load sum of 44 kN/m. Train speed 1 000 km/h (developed by the authors)

Если учесть, что статическое усилие в тросе 1 350 кН, то в динамике оно увеличивается до ~1 750 кН/м, таким образом динамический коэффициент «волны» для расчета прочности тросов составит 1,23. Такой коэффициент подобен классическому коэффициенту, который отражает увеличение нагрузки при динамическом воздействии по сравнению со статическом приложением этой нагрузки, с тем отличием, что динамическое воздействие сравнивается со статическим воздействием постоянной нагрузки. В ППТ более актуален именно динамический коэффициент «волны», так как постоянные нагрузки и временные разнонаправлены и компенсируют друг друга и при этом возникают эффекты, которые не получается описать понятием «динамический коэффициент» (рис. 21).

Минимальная сумма постоянных нагрузок в размере 44 кН/м обеспечивает постоянное натяжение тросов при движении сверхскоростного поезда (278 м/с). Следовательно отношение достаточной суммарной постоянной нагрузки для повсеместного растяжения анкерных тросов к распределенной нагрузке от веса поезда в данном случае составляет $\frac{44 \frac{\text{кН}}{\text{м}}}{29,7 \frac{\text{кН}}{\text{м}}} = 1,48$. На рисунке 21 указана эпюра в момент времени, когда возникает минимальное натяжение тросов (3,3 кН). На рисунках 22–24 показаны параметры динамического напряженно-деформированного состояния сооружения.

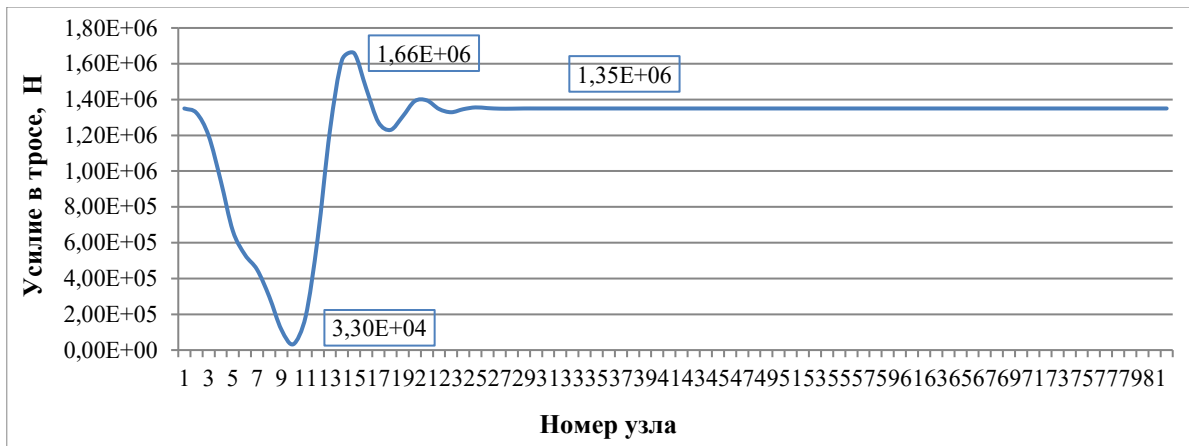


Рисунок 21. Эпюра усилий в тросах в момент $t = 1,36$ с. Состав из 10 вагонов, находится между узлами 4 и 13 (разработано авторами)

Figure 21. Stresses epure in the cables at the moment $t = 1,36$ s. The train of 10 wagons is located between nodes 4 and 13 (developed by the authors)



Рисунок 22. Деформации середины балки жесткости при учете вязкости воды (разработано авторами)

Figure 22. Deformations of the centre of the stiffener beam when water viscosity is taken into account (developed by the authors)

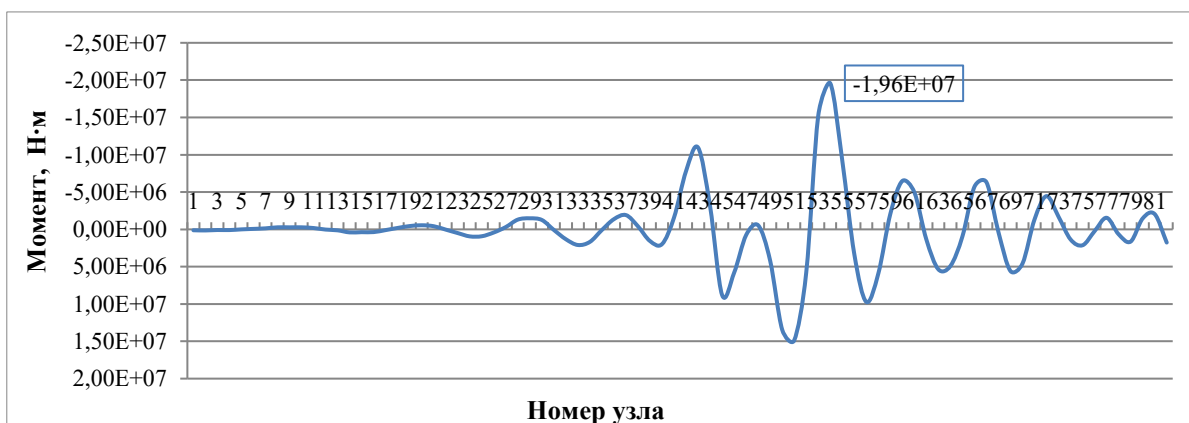


Рисунок 23. Эпюра изгибающего момента балки жесткости при сумме постоянных нагрузок 44 кН/м в момент времени 5,60 с. Поезд между узлами 43–52 (разработано авторами)

Figure 23. Bending moment epure of the stiffener beam under the sum of constant loads 44 kN/m at time 5,60 s. Train between nodes 43–52 (developed by the authors)



Рисунок 24. Вертикальная скорость перемещения узла № 41 с учетом вязкости воды (разработано авторами)

Figure 24. Vertical displacement velocity of node № 41 considering water viscosity. (developed by the authors)

В таблице 7 приведено сопоставление параметров динамики сооружения с учетом сопротивления воды и без него. Как видно, учет сопротивления слабо влияет на поведение сооружения даже при сверхвысоких скоростях движения.

Таблица 7 / Table 7

Параметры внутренних усилий в конструкции от сверхскоростного поезда при разном сопротивлении среды с

Parameters of internal forces in the structure from an ultrafast train at different medium resistance c

Наименование <i>Name</i>	c = 0	c = 86	Разность <i>Difference</i>	Разность, % <i>Difference, %</i>
Минимальное усилие в тросе №41, кН <i>Minimum force in cable № 41, kN</i>	119,82	120,54	0,721	0,59
Изгибающий момент узел №41, кН·м <i>Bending moment of node № 41, kN·m</i>	12 290	12 290	0	0
Максимальный изгибающий момент, кН·м <i>Maximum bending moment, kN·m</i>	29 090	29 080	10	0,03
Максимальная скорость деформации, м/с <i>Maximum strain rate, m/s</i>	0,0624	0,0624	0	0

Разработано авторами / Developed by the authors

6. Динамика взаимодействия поезда и сооружения при переменной вертикальной жесткости закреплений

6. Dynamics of train/structure interaction under variable vertical stiffness of anchorages

Исследуем проблему взаимодействия при различных скоростях поездов и переменной жесткости анкерных тросов. Рассматривается

сооружение длиной 2 460 м, такая длина достаточна, чтобы выделить краевые и регулярные (в средней части) зоны. При этом используем результаты оптимизации напряженно-деформированного состояния от постоянных нагрузок, рассмотренные в [14], которые позволяют снизить значительные краевые эффекты. В соответствии с выводами [14] применим коэффициенты жесткости на краевых участках сооружения. Заметим, что для обеспечения значительной жесткости вблизи порталов на сравнительно небольшой глубине могут вместо тросов применяться и другие конструкции с большой жесткостью.

В таблице 8 приведено сравнение основных характеристик при разных скоростях движения, а также для наглядности показаны графики перемещений и вертикальных скоростей на рисунках 25, 26. Скорость 27,8 м/с соответствует обычной скорости тяжелого грузового поезда, 50 м/с — скоростному поезду, 100 м/с — высокоскоростному поезду, 150 м/с и более — сверхскоростному поезду. Можно заметить, что при скорости 230 м/с возникает максимальные прогиб, момент в балке и натяжение тросов, а при скорости 250 м/с максимальная скорость деформации. Скорость движения, при которой возникают экстремальные значения параметров движения несколько выше, чем полученная критическая скорость для одиночной силы 218 м/с, однако скорость 230 м/с незначительно отличается от критической для одиночной силы (на 5,5 %). Различие объясняется разными граничными условиями (бесконечная балка и жестко закрепленная большой длины), а также самой нагрузкой (поезд, а не сосредоточенная сила).

Таблица 8 / Table 8

**Параметры динамического поведения
ПФТ при разных скоростях движения поездов**
**Parameters of dynamic behaviour
of submerged floating tunnels at different train speeds**

Скорость состава, м/с <i>Composition speed, m/s</i>	Максимальный прогиб, м <i>Maximum deflection, m</i>	Максимальный момент, Н·м <i>Maximum torque, N·m</i>	Максимальное натяжение троса, Н <i>Maximum cable tension, N</i>
27,8	0,076	$0,24 \cdot 10^8$	$3,89 \cdot 10^6$
50	0,077	$0,25 \cdot 10^8$	$3,90 \cdot 10^6$
100	0,081	$0,26 \cdot 10^8$	$3,90 \cdot 10^6$
150	0,094	$0,28 \cdot 10^8$	$3,98 \cdot 10^6$
210	0,188	$1,51 \cdot 10^8$	$7,17 \cdot 10^6$
220	0,210	$2,13 \cdot 10^8$	$9,26 \cdot 10^6$
230	0,224	$2,26 \cdot 10^8$	$10,1 \cdot 10^6$
250	0,219	$1,74 \cdot 10^8$	$6,57 \cdot 10^6$
278	0,199	$1,52 \cdot 10^8$	$6,59 \cdot 10^6$
300	0,191	$1,34 \cdot 10^8$	$6,13 \cdot 10^6$

Разработано авторами / Developed by the authors

Из таблицы 7 следует, что для традиционной скорости и высокоскоростного движения может использоваться один и тот же ППТ. Сверхскоростное движение, очевидно, потребует иной конструкции ППТ, помимо конструкции пути.



Рисунок 25. Прогибы середины балки жесткости при различных скоростях движения сверхскоростного поезда (разработано авторами)

Figure 25. Deflections of the middle of the stiffening beam at different speeds of a high-speed train (developed by the authors)

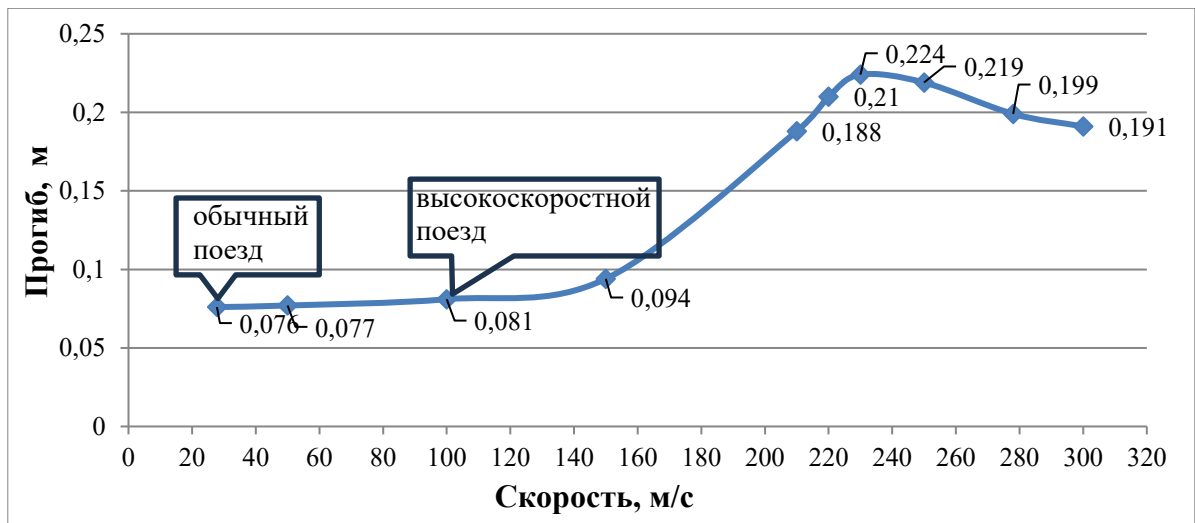


Рисунок 26. Максимальные прогибы среднего узла № 41 в зависимости от скорости движения сверхскоростного поезда (разработано авторами)

Figure 26. Maximum deflections of the middle node № 41 as a function of superfast train speed (developed by the authors)

На рисунках 27–29 приведены огибающие эпюры моментов в балке жесткости при постоянной жесткости тросов. Для сравнения на рисунках 30–32 показаны такие же эпюры, но при жесткости закреплений в зоне краевых эффектов, оптимизированных по [14]. Сравнивая

рисунки 30–32 с соответствующими им рисунками 27–29 можем наблюдать значительное снижение (в несколько раз) краевых эффектов вблизи порталов. Это свидетельствует о значительном положительном эффекте переменной жесткости закреплений балки не только для постоянных нагрузок, что отмечено в [14], но и для временных нагрузок.

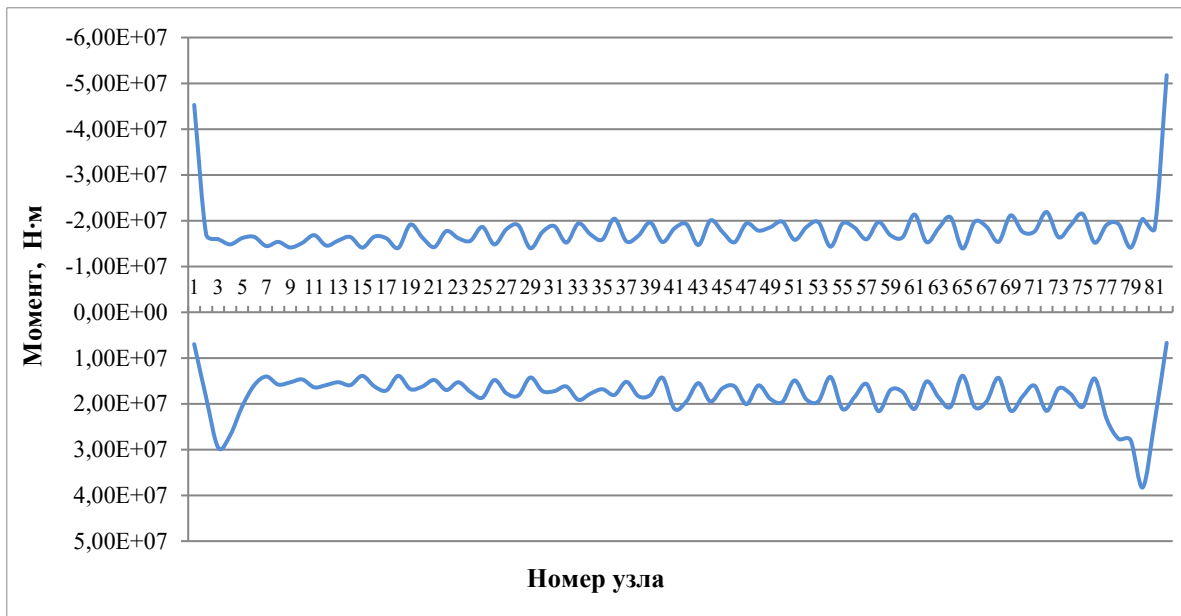


Рисунок 27. Огибающая эпюра моментов от грузового поезда. Отчетливо видны краевые эффекты до оптимизации (разработано авторами)

Figure 27. Envelope epure of moments from a goods train. The edge effects before optimization are clearly visible (developed by the authors)

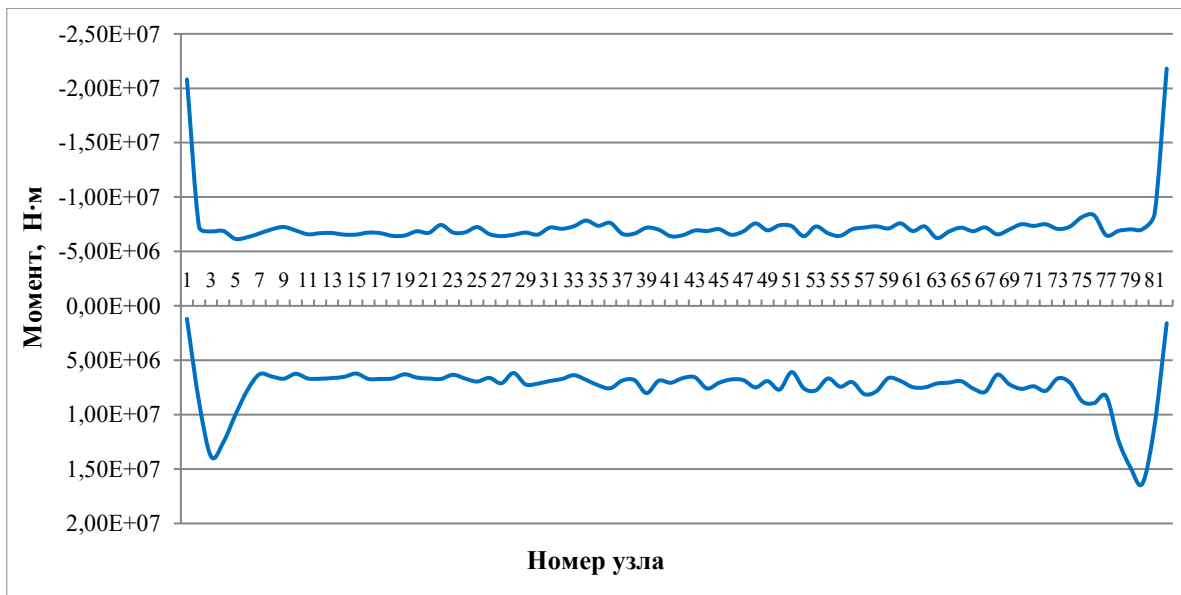


Рисунок 28. Огибающая эпюра моментов в балке от высокоскоростного состава при скорости 100 м/с (разработано авторами)

Figure 28. Envelope epure of moments in the beam from a high-speed train at a velocity of 100 m/s (developed by the authors)

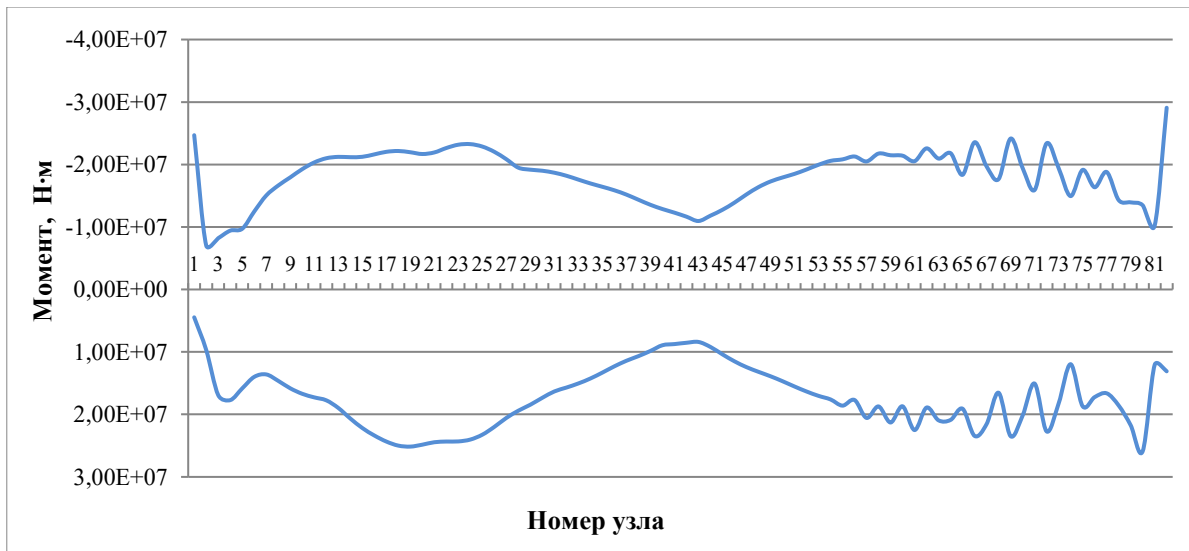


Рисунок 29. Огибающая эпюра моментов от сверхскоростного поезда (разработано авторами)

Figure 29. Envelope epure of moments of the moments from an ultrafast train (developed by the authors)

Из сравнения рисунков 31 и 32 видно, что хотя изгибающие моменты при переходе от скорости 360 км/ч (100 м/с) к скорости 1 000 км/ч (278 м/с) возрастают в 2 раза, это не является принципиальным препятствием применения рассматриваемого вида сооружения для сверхскоростного движения.

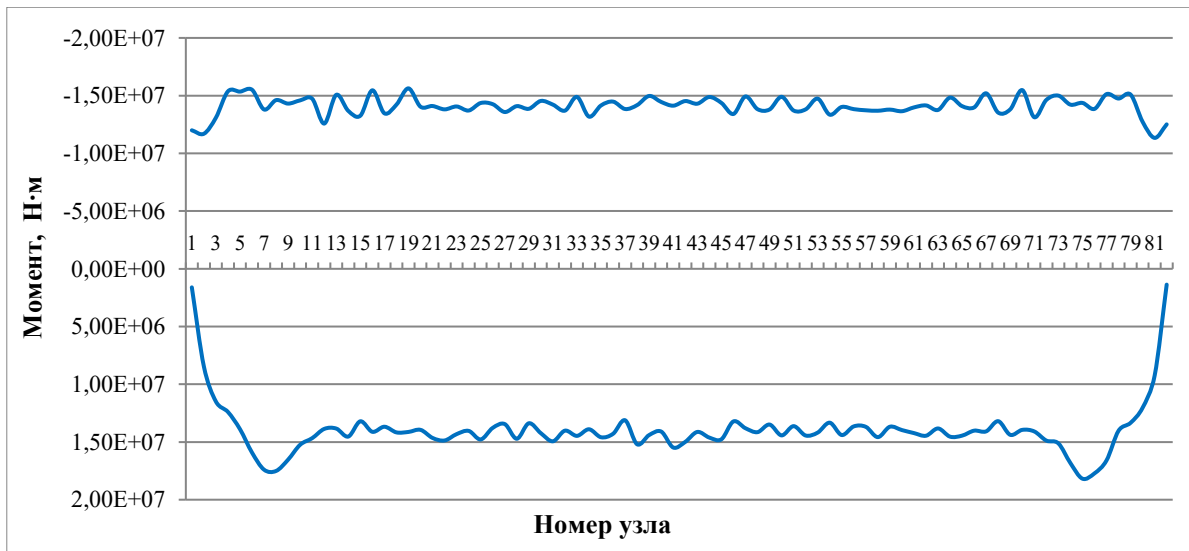


Рисунок 30. Огибающая эпюра моментов от грузового поезда при переменной жесткости тросов при оптимизации краевых эффектов, которые практически ликвидированы. Скорость поезда 27,8 м/с (разработано авторами)

Figure 30. Envelope epure of moments of the goods train at variable cable stiffness when optimising the edge effects, which are almost eliminated. The train speed is 27,8 m/s (developed by the authors)

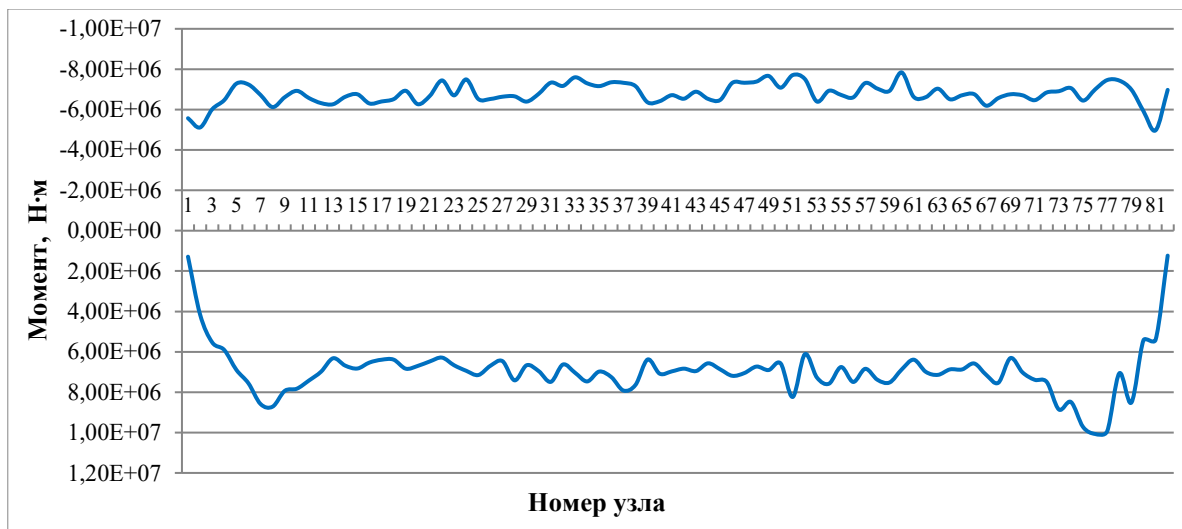


Рисунок 31. Огибающая эпюра моментов от высокоскоростного поезда при переменной жесткости тросов. Скорость поезда 100 м/с (разработано авторами)

Figure 31. Envelope epure of moments of a high-speed train with variable cable stiffness. The train speed is 100 m/s (developed by the authors)

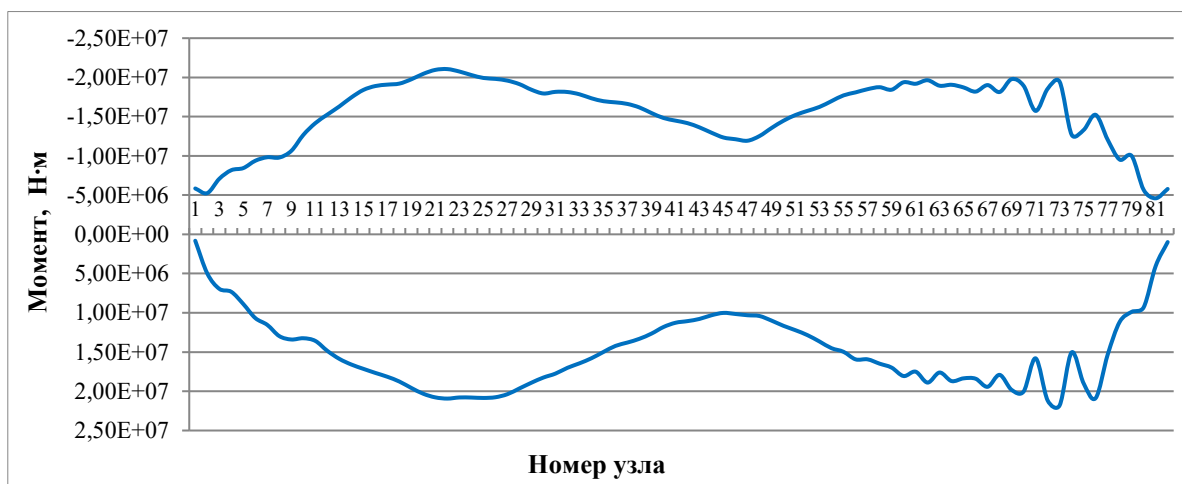


Рисунок 32. Огибающая эпюра моментов от сверхскоростного поезда при переменной жесткости тросов. Скорость поезда 278 м/с (разработано авторами)

Figure 32. Envelope epure of moments from an ultrafast train with variable cable stiffness. The train speed is 278 m/s (developed by the authors)

Заключение

Conclusion

1. Установлена асимптотическая устойчивость решения уравнений колебаний балки жесткости ППТ, обоснован выбор шага численного интегрирования уравнений колебаний. Обнаружена хорошая сходимость решения задачи о критической скорости движения силы по известному решению с полученным авторами, что указывает на достоверность результатов численных экспериментов.

2. Определенные скорости перемещений балки жесткости ППТ при движении поездов с различными скоростями незначительны. Они позволяют определить параметры демпфирования колебаний балки жесткости в вязкой инерционной среде. Учет сопротивления воды колебаниям балки тоннеля уточняет скорости колебаний в пределах 4 %. При обеспечении постоянного растяжения тросов влияние сопротивления среды на напряженно-деформированное состояние сооружения незначительно.

3. Во всех рассмотренных режимах движения поездов при колебании тоннеля обтекание воды турбулентное. Сопротивление среды необходимо учитывать по закону Ньютона. Установлены значения коэффициента демпфирования c для уравнения колебаний балки жесткости.

4. Суммарной постоянной нагрузки равной весу поезда недостаточно для повсеместного растяжения анкерных тросов из-за динамического эффекта. Определены коэффициенты к нагрузке от веса поезда для обеспечения повсеместного растяжения анкерных тросов от суммарной нагрузки.

5. Отчетливо наблюдаются краевые эффекты при постоянной вертикальной жесткости анкерных тросов. Переменная жесткость анкерных закреплений балки жесткости ППТ оказывает значительный положительный эффект снижения краевых эффектов при действии не только постоянной, но и временной нагрузки от поездов.

6. Дополнительное динамическое растяжение анкерных тросов, особенно сильное перед сверхскоростным поездом, обнаруживает динамический коэффициент 1,32.

7. Наибольшее отношение достаточной суммарной постоянной нагрузки для повсеместного растяжения анкерных тросов к распределенной нагрузке от веса поезда при прохождении сверхскоростного поезда составляет 1,48.

8. Для движения высокоскоростных поездов и обычных поездов может использоваться ППТ с одинаковыми параметрами конструкции. Для сверхскоростного поезда при скорости движения более 150 м/с потребуются иные параметры ППТ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Поляков, В.Ю. Современные подходы к исследованию и разработке подводных плавающих сооружений / В.Ю. Поляков, И.В. Хорев, И.М. Демидов // Транспортные сооружения. — 2022. — Т. 9. — № 3. URL: <https://t-s.today/08SATS322.html>. DOI: [10.15862/08SATS322](https://doi.org/10.15862/08SATS322). EDN: [VGRYKP](https://www.edn.net/VGRYKP). (Дата обращения: 12.02.2025).

2. **Gyu-Jin, K.** Three-dimensional equivalent static analysis for design of submerged floating tunnel / K. Gyu-Jin, K. Hyo-Gyoung, J. Chungkuk, K. HeonYong, C. WooChul // *Marine Structures*. — 2021. — No. 80. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0951833921001349>. DOI: [10.1016/j.marstruc.2021.103080](https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2021.103080). EDN: [KMBDTO](https://www.edn.net/KMBDTO). (Дата обращения: 12.02.2025).
3. **Maeda, N.** Study on structural characteristics of support systems for submerged floating tunnel / N. Maeda, M. Morikawa, K. Ishikawa, Y. Kakuta // *Proceedings of the 3rd Symposium on Strait Crossings*. — Ålesund, Norway. — 1994. — pp. 579–674.
4. **Martinelli, L.** Modeling of Qiandao Lake submerged floating tunnel subject to multi-support seismic input / L. Martinelli, G. Barbella, A. Feriani // *Procedia Engineering*. — 2010. — Vol. 4. — pp. 311–318. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705810005321>. DOI: [10.1016/j.proeng.2010.08.035](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2010.08.035). (Дата обращения: 12.02.2025).
5. **Mazzolani, F.** Structural analyses of the Submerged Floating Tunnel prototype in Qiandao Lake (PR of China) / F. Mazzolani, R. Landolfo, B. Faggiano, M. Esposito [и др.] // *International Journal Advances in Structural Engineering*. — 2008. — Vol. 11(4). — pp. 439–454. URL: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1260/136943308785836862>. DOI: [10.1260/136943308785836862](https://doi.org/10.1260/136943308785836862). (Дата обращения: 12.02.2025).
6. **Skopra, L.** Innovative norwegian fjord crossing. How to cross the Høgsjord, alternative methods / L. Skopra // *Proceedings of the 2nd Congress AIOM (Marine and Offshore Engineering Association)*. — Naples, Italy. — 1989.
7. **Bruschi, R.** Submerged Buoyant anchored Tunnels: Technical Solution for the Fixed Link across the Strait of Messina Italy / R. Bruschi, V. Giardinieri, R. Marazza, T. Merletti // *Proceedings of the 2nd Symposium on Strait Crossings*. — Balkema, Rotterdam, Netherland. — 1990. — pp. 605–612.
8. **Курбацкий, Е.Н.** Применение обобщённых функций и интегрального преобразования Фурье при моделировании воздействия подвижной нагрузки на балку, лежащую на упругом основании / Е.Н. Курбацкий, И.И. Зернов, Е.С. Бадьина // *Транспортные сооружения*. — 2023. — Т. 10. — № 3. URL: <https://t-s.today/05SATS323.html>. DOI: [10.15862/05SATS323](https://doi.org/10.15862/05SATS323). (Дата обращения: 12.02.2025).
9. **Поляков, В.Ю.** Численное моделирование взаимодействия подвижного состава с мостовыми конструкциями при высокоскоростном движении / В.Ю. Поляков // *Строительная механика и расчет сооружений*. — 2016. — № 2. — С. 54–60. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26700903>. EDN: [WMHRUB](https://www.edn.net/WMHRUB). (Дата обращения: 12.02.2025).
10. **Пономарев, С.Д.** Основы современных методов расчета на прочность в машиностроении / С.Д. Пономарев, В.Л. Бидерман, К.К. Лихачев [и др.]. В 3-х т. — Т. 3. — М.: Машгиз, 1952. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01005582603>. (Дата обращения: 12.02.2025).
11. **Poliakov, V.** Running Safety of a High-Speed Train within a Bridge Zone / V. Poliakov, N. Zhang, V. Saurin, D.N. Thanh // *International Journal of Structural Stability and Dynamics*. — 2020. — Vol. 20. — No. 11. URL: <https://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/S0219455420501163>. DOI: [10.1142/S0219455420501163](https://doi.org/10.1142/S0219455420501163). EDN: [JFTTGO](https://www.edn.net/JFTTGO). (Дата обращения: 12.02.2025).
12. **Schlichting, H.** Boundary-Layer Theory / H. Schlichting. — McGraw-Hill Book Company, 1968. URL: <https://archive.org/details/boundarylayerthe0004schl/page/n5/mode/2up>. (Дата обращения: 12.02.2025).
13. **Демидов, И.М.** Оптимизация конструкции подводного плавающего сооружения / И.М. Демидов, В.Ю. Поляков // *Мир транспорта*. — 2023. — Т. 21. — № 5(108). — С. 34–45. URL: <https://mirtr.elpub.ru/jour/article/view/2560>. DOI: [10.30932/1992-3252-2023-21-5-4](https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-5-4). EDN: [HVNQMS](https://www.edn.net/HVNQMS). (Дата обращения: 12.02.2025).
14. **Ren, S.** Dynamic Simulation of the Maglev Vehicle/Guideway System / S. Ren, A. Romeijn, K. Klap // *Journal of Bridge Engineering*. — 2010. — Vol. 15. — No. 3. — P. 269–278. URL: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29BE.1943-5592.0000071>. DOI: [10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000071](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000071). EDN: [OCFWDD](https://www.edn.net/OCFWDD). (Дата обращения: 12.02.2025).

Сведения об авторах:

Поляков Владимир Юрьевич — доктор технических наук, профессор кафедры «Мосты и тоннели», ФГБОУ ВО «Российский университет транспорта», Москва, Россия, e-mail: rvy55@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6160-601X>
WoS: <https://www.webofscience.com/wos/author/rid/AAS-4866-2021>
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57201723559>

Демидов Иван Михайлович — ведущий инженер, ООО «ММС Интернэшнл», Москва, Россия,
e-mail: dmdvn@rambler.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-1305-5439>
РИИЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1163640
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57805123100>

Статья получена: 04.02.2025. Принята к публикации: 18.03.2025. Опубликовано онлайн: 30.05.2025.

REFERENCES

1. Poliakov V.Yu., Khorev I.V., Demidov I.M. Modern approaches to research and development of underwater floating constructions. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2022;9(3). DOI: <https://doi.org/10.15862/08SATS322> (In Russ., abstract in Eng.).
2. Gyu-Jin K., Hyo-Gyoung K., Chungkuk J., HeonYong K., WooChul C. Three-dimensional equivalent static analysis for design of submerged floating tunnel. *Marine Structures*. 2021;80:103080. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2021.103080> (In Eng.).
3. Maeda N., Morikawa M., Ishikawa K., Kakuta Y. Study on structural characteristics of support systems for submerged floating tunnel. In: *Proceedings of the 3rd Symposium on Strait Crossings*. Ålesund, Norway; 1994. p. 579–674. (In Eng.).
4. Martinelli L., Barbella G., Feriani A. Modeling of Qiandao Lake submerged floating tunnel subject to multi-support seismic input. *Procedia Engineering*. 2010;4:311–318. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2010.08.035> (In Eng.).
5. Mazzolani F., Landolfo R., Faggiano B., Esposito M., et al. Structural analyses of the Submerged Floating Tunnel prototype in Qiandao Lake (PR of China). *International Journal Advances in Structural Engineering*. 2008;11(4):439–454. DOI: <https://doi.org/10.1260/136943308785836862> (In Eng.).
6. Skopra L. Innovative norwegian fjord crossing. How to cross the Høgsjord, alternative methods. In: *Proceedings of the 2nd Congress AIOM (Marine and Offshore Engineering Association)*. Naples, Italy; 1989. (In Eng.).
7. Bruschi R., Giardinieri V., Marazza R., Merletti T. Submerged Buoyant anchored Tunnels: Technical Solution for the Fixed Link across the Strait of Messina Italy. In: *Proceedings of the 2nd Symposium on Strait Crossings*. Balkema, Rotterdam, Netherlands; 1990. p. 605–612. (In Eng.).
8. Kurbatskiy E.N., Zernov I.I., Badina E.S. Application of generalised functions and Fourier's integral transformation in modelling the effect of a moving load on a beam resting on an elastic foundation. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2023;10(3). DOI: <https://doi.org/10.15862/05SATS323> (In Russ., abstract in Eng.).
9. Poliakov V.Yu. [Numerical simulation of interaction between rolling stock and bridge structures at high-speed movement]. *Structural Mechanics and Analysis of Constructions*. 2016;(2):54-60. Available from: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26700903> (accessed 12th February 2025). (In Russ.).
10. Ponomarev S.D., Biderman V.L., Likhachev K.K., et al. [Fundamentals of modern methods of strength calculation in mechanical engineering]. Vol. 3. Moscow: Mashgiz; 1952. Available from: <https://search.rsl.ru/ru/record/01005582603> (accessed 12th February 2025). (In Russ.).
11. Poliakov V., Zhang N., Saurin V., Thanh D.N. Running Safety of a High-Speed Train within a Bridge Zone. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*. 2020;20(11). DOI: <https://doi.org/10.1142/S0219455420501163> (In Eng.).
12. Schlichting H. *Boundary-Layer Theory*. McGraw-Hill Book Company; 1968. Available from: <https://archive.org/details/boundarylayerthe0004schl/page/n5/mode/2up> (accessed 12th February 2025). (In Eng.).
13. Demidov I.M., Poliakov V.Yu. Optimisation of the Design of an Underwater Floating Transport Structure. *World of Transport and Transportation*. 2023;21(5):34–45. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-5-4> (In Russ., abstract in Eng.).

14. Ren S., Romeijn A., Klap K. Dynamic Simulation of the Maglev Vehicle/Guideway System. *Journal of Bridge Engineering*. 2010;15(3):269–278. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000071](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000071) (In Eng.).
-

Information about the authors:

Vladimir Yu. Poliakov — Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia, e-mail: pyy55@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6160-601X>
WoS: <https://www.webofscience.com/wos/author/rid/AAS-4866-2021>
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57201723559>

Demidov Ivan Mikhailovich — Limited Liability Company MMC International, Moscow, Russia,
e-mail: dmdvn@rambler.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-1305-5439>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1163640
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57805123100>

Submitted: 2nd February 2025. Revised: 18th March 2025. Published online: 30th May 2025.