

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.014.2

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.5.729-739

Численное и экспериментальное исследование поведения защитного сооружения при ударном воздействии

Денис Александрович Тарасов

Пензенский государственный университет (ПГУ); г. Пенза, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В связи с постоянно существующими угрозами умышленного повреждения инфраструктуры критически важных объектов с применением автотранспортных средств становится актуальной и представляет практический интерес задача по разработке и исследованию защитных сооружений, направленных на предотвращение такого рода ущерба. Обосновано применение стальных канатов в качестве основных несущих элементов подобных сооружений.

Материалы и методы. Проведено с помощью предложенного численного алгоритма определение минимально допустимой площади поперечного сечения стальных канатов исходя из требований, предъявляемых к защитному сооружению по стойкости к ударному воздействию, вызванному наездом автомобиля с заданной массой и скоростью движения. В основу разработанного метода положено математическое моделирование задачи условной оптимизации. В качестве целевой функции выступала функция продольного усилия, возникающего в стальных канатах. Вместе с тем предъявлялись требования по соблюдению условий сохранения энергии и неразрывности деформаций, а также ограничения прочности. Выполнен поверочный расчет проектируемого защитного сооружения в коммерческом программном комплексе, реализованном на общепризнанном методе конечных элементов. Представлена методика осуществления натурного эксперимента. Проведен полномасштабный натурный эксперимент с целью определения истинного распределения деформаций по конструктивным элементам объекта испытания при ударном воздействии.

Результаты. Представлены результаты экспериментального исследования. Выполнен сравнительный анализ данных, полученных в процессе численного и компьютерного моделирования, а также в ходе проведения натурного испытания. Установлено незначительное расхождение в значениях контролируемых параметров, полученных разными методами.

Выводы. Предложенный численный алгоритм по поиску минимально допустимой площади поперечного сечения стальных канатов, исходя из требования заданной прочности, подтвердил свою надежность, а принятые конструктивные решения разработанного защитного сооружения свою обоснованность. Результаты исследования могут найти применение при проектировании подобных инженерных сооружений, предназначенных для физической защиты особо важных объектов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: защитное сооружение, противотаранное устройство, стальной канат, гибкая нить, удар, экспериментальное исследование, динамическая нагрузка, напряжения, деформации

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Тарасов Д.А. Численное и экспериментальное исследование поведения защитного сооружения при ударном воздействии // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 5. С. 729–739. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.5.729-739

Автор, ответственный за переписку: Денис Александрович Тарасов, tda82@list.ru.

Numerical and experimental study of the behavior of a protective structure under impact

Denis A. Tarasov

Penza State University (PSU); Penza, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. In connection with the constantly existing threats of deliberate damage to the infrastructure of critical facilities using vehicles, the task of development and research of protective structures aimed at preventing this kind of damage becomes relevant and of practical interest. The application of steel ropes as the main load-bearing elements of such structures is substantiated.

Materials and methods. The proposed numerical algorithm was used to determine the minimum permissible cross-sectional area of steel ropes based on the requirements for a protective structure in terms of resistance to impact caused by the collision of a car with a given mass and speed. The developed method is based on mathematical modelling of the conditional optimization problem. The objective function was the function of the longitudinal force arising in the steel ropes. At the same time, requirements were made to comply with the conditions of energy conservation and continuity of deformations, as well as strength limitations. A verification calculation of the designed protective structure was carried out in a commercial software package implemented on the generally recognized finite element method. The methodology of the full-scale experiment is presented. A full-scale experiment was carried out in order to determine the true distribution of deformations over the structural elements of the test object under impact.

Results. The results of the experimental study are presented. A comparative analysis of the data obtained in the process of numerical and computer simulation, as well as in the course of a full-scale test, was carried out. A slight discrepancy in the values of the controlled parameters obtained by different methods was found.

Conclusions. The proposed numerical algorithm for searching the minimum permissible cross-sectional area of steel ropes, based on the requirement of a given strength, confirmed its reliability, and the adopted design solutions of the developed protective structure proved their validity. The results of the research can be used in the design of such engineering structures designed for the physical protection of critical facilities.

KEYWORDS: protective structure, anti-ram device, steel rope, flexible thread, impact, experimental study, dynamic load, stresses, deformations

FOR CITATION: Tarasov D.A. Numerical and experimental study of the behavior of a protective structure under impact. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(5):729-739. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.5.729-739 (rus.).

Corresponding author: Denis A. Tarasov, tda82@list.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время существуют разного рода угрозы, связанные с несанкционированными действиями умышленного характера посторонних лиц с целью проникновения на охраняемую территорию особо важных объектов с использованием автотранспортных средств [1–3]. Под особо важными объектами понимаются объекты, повреждение или нарушение функционирования которых приводит к последствиям в масштабах всей страны [4, 5]. Безопасность внешнего периметра подобной инфраструктуры должна обеспечиваться путем создания элементов физической защиты, гарантированно останавливающих автомобиль при попытке прорыва вглубь территории охраняемого объекта [6–8].

Следовательно, исключительное значение приобретают вопросы, относящиеся к проектированию и устройству специальных инженерных сооружений, обладающих защитными свойствами при ударном воздействии, возникающем при наезде автотранспортного средства [9–12]. Вместе с тем в условиях возрастающих требований, предъявляемых к безопасности особо важных объектов, становится все более актуальным решение задачи по повышению надежности и эффективности применяемых проектных решений, особенно на начальном этапе разработки проекта при назначении конструктивных схем защитных сооружений [13–15].

Из основных теоретических положений механики известно, что любой конструктивный элемент той или иной механической системы при внешнем силовом воздействии наилучшим образом работает на растяжение и значительно хуже сопротивляется изгибу. При этом следует отметить, что с увеличением длины изгибаемый элемент все больше и больше уступает в сопоставлении с элементом, испытывающим растяжение. Данный факт обусловлен тем, что при одинаковом поперечном сечении и нагрузке напряжения, возникающие в максимально нагруженном сечении изгибаемого элемента, в разы больше, чем в материале элемента, подверженного осевому растяжению. Иначе при постоянных значениях нагрузки и максимально-допустимых напряжений в материале элемент, работающий на растяжение, более экономически обоснован, чем элемент, воспринимающий изгибающие моменты, поскольку для сопротивления силовому воздействию без разрушения

требуется меньшая площадь поперечного сечения. В связи с этим в качестве основных силовых элементов, обеспечивающих общую прочность защитных сооружений при ударном воздействии, предлагается использовать стальные канаты. Главной особенностью указанных элементов является то, что они способны работать исключительно на растяжение и не могут воспринимать изгибающие моменты ввиду наличия малой изгибной жесткости [16–18].

На сегодняшний день оценка прочности стальных канатов при действии статических нагрузок ведется с использованием известных методик, для которых расчетной моделью является гибкая нить [19–22]. Наряду с этим при динамическом воздействии широко применяются коммерческие системы компьютерного моделирования, реализующие метод прямого интегрирования уравнений движения по времени, что дает возможность определять усилия и напряжения в элементах геометрически нелинейных конструкций, а также перемещение, скорость и ускорение узлов в любой момент времени [23]. При этом динамическая нагрузка в подобных программных комплексах должна задаваться на узлы как функция силы от времени, таким образом, проектировщик уже на начальном этапе разработки должен знать общий закон изменения во времени силового воздействия. Однако проблема заключается в том, что на этапе проектирования не известна величина продолжительности удара, иначе говоря, значение того промежутка времени, в течение которого происходит падение скорости до нуля и прорывающийся автомобиль останавливается. Из этого следует, что неизвестно ускорение, а значит и действующая на защитное сооружение сила, равная по модулю силе инерции ударяющего автотранспортного средства.

Из вышеперечисленного сформулируем цель исследования следующим образом — оценить прочность и жесткость защитного сооружения с основными несущими элементами, выполненными из стальных канатов при ударном воздействии, вызванном наездом автомобиля с заданной массой и скоростью движения.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. По результатам численного моделирования разработать, а затем изготовить и смонтировать объект исследования.

2. Разработать методику проведения натурного эксперимента.

3. Провести экспериментальное исследование по разработанной методике с дальнейшим сравнительным анализом результатов, полученных в ходе численного моделирования.

Объектом исследования является защитное сооружение, представляющее собой противотаранное устройство, конструктивно выполненное в виде шлагбаума.

Предметом исследования выступают усилия и деформации, возникающие в сечениях элементов защитного сооружения, характеризующие его поведение при ударном воздействии.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Требование, предъявляемое к проектируемому защитному сооружению, заключается в создании непреодолимого физического препятствия при несанкционированном проезде автотранспортного средства массой $m = 10$ тонн, движущегося со скоростью $v = 60$ км/ч с гарантированным обеспечением его принудительной остановки.

Для определения площади поперечного сечения основных несущих элементов защитного сооружения, выполненных из стальных канатов, рассмотрим расчетную модель гибкой нити (рис. 1).

Гибкая нить, выполненная из материала с модулем упругости E и допускаемыми напряжениями $[\sigma]$, имеет линию начального очертания со стрелой провеса f_0 в середине пролета l , описанную функцией $y_0(x)$. Закреплена на упругоподатливых опорах с жесткостью u , расположенных под углом β . В результате действия приложенной на расстоянии a от опоры A силы P , характеризующейся импульсом ударяющего тела, в гибкой нити возникает продольное усилие $T(A, H, P, x)$ и она приобретает линию конечного очертания, описанную функцией $y(H, P, x)$. В свою очередь продольное усилие состоит из двух составляющих: распора H и балочной поперечной силы $Q_B(P, x)$. Отметим, что в параметры всех функций включены: площадь поперечного сечения

A , распор H и действующая сила инерции P , поскольку данные величины не известны на момент постановки задачи.

Расчет требуемой площади поперечного сечения рассматриваемого элемента, исходя из ограничения по допускаемым напряжениям, ведется в соответствии с алгоритмом, представленным в виде блок-схемы (рис. 2).

Представленный алгоритм является последовательностью действий:

1. Ввод исходных данных.
2. Разбиение нити по длине.
3. Задание начальных параметров.
4. Определение функции балочной поперечной силы.
5. Определение функции балочного изгибающего момента.
6. Определение функции линии начального очертания.
7. Расчет начальной длины нити.
8. Расчет конечной длины нити.
9. Расчет упругого удлинения.
10. Определение функции линии конечного очертания.
11. Определение функции прогиба.
12. Определение функции продольного усилия.
13. Проверка условий прочности, сохранения энергии и неразрывности деформаций.
14. Приращение параметров.
15. Расчет времени действия инерционной нагрузки.
16. Вывод результатов.

Данная методика более детально представлена в работах [24, 25].

В результате численного моделирования поведения гибкой нити с заданными физическими и геометрическими параметрами, а именно при ударной нагрузке, действующей в середине пролета $l = 8,22$ м, первоначальной стреле провеса $f_0 = 0$ м, жесткости упругоподатливых опор $u = 22\,400$ кН/м, расположенных под углом $\beta = 0$ град., модуле упругости материала $E = 147\,050$ МПа и допускаемых напряжениях $[\sigma] = 1360$ МПа, получены значения сосредоточенной

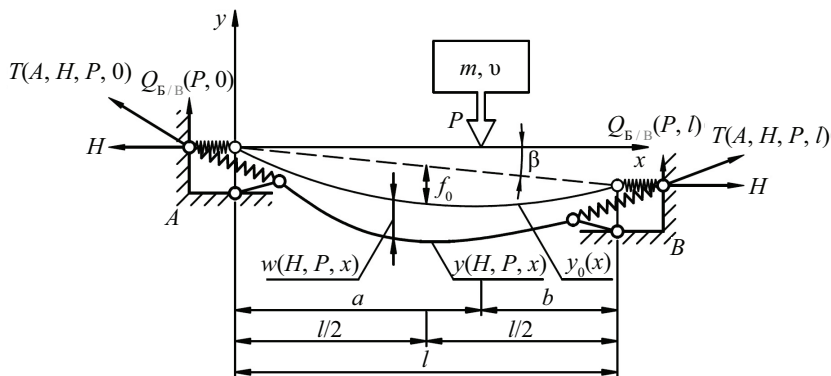


Рис. 1. Расчетная модель гибкой нити

Fig. 1. Calculation model of a flexible thread

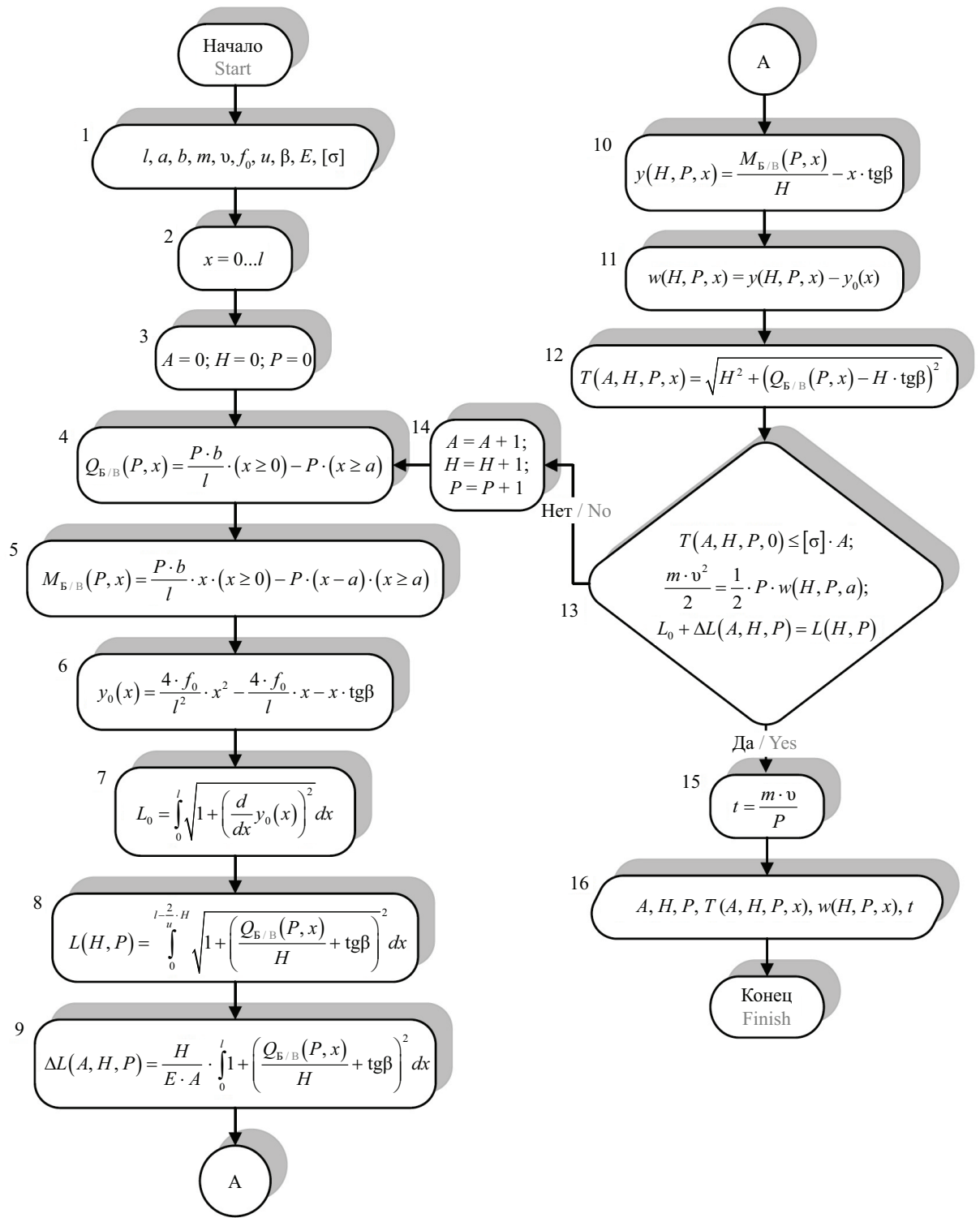


Рис. 2. Алгоритм определения площади поперечного сечения гибкой нити
Fig. 2. Algorithm for determining the cross-sectional area of a flexible thread

нагрузки $P = 816$ кН, являющейся эквивалентом силы инерции ударяющего автомобиля, времени соударения $t = 0,1135$ с, площади поперечного сечения стальных канатов $A = 0,0018878$ м², а также максимальные значения прогиба в середине пролета $w(H, P, l/2) = 1,095$ м и продольного усилия в приопорных сечениях $T(A, H, P, 0) = T(A, H, P, l) = 2567,4$ кН.

Для дальнейшего определения геометрических характеристик опорных конструкций, расположенных ниже основных несущих элементов, выполненных из стальных канатов, а также с целью проверки адекватности результатов, полученных численным методом, проведем компьютерное моделирование поведения защитного сооружения

при динамическом воздействии в коммерческом программном комплексе ЛИРА версии 10.10 релиз 2.4, реализованном на общепризнанном методе конечных элементов.

В качестве параметров динамического воздействия во времени примем значения, найденные на предыдущем этапе численного моделирования (рис. 3).

За критерии оценки адекватности результатов, полученных численным методом и с помощью программного комплекса ЛИРА, примем перемещение стальных канатов в середине пролета защитного сооружения, а также продольное усилие в сечениях, расположенных над опорами.

В ходе расчета в системе компьютерного моделирования ЛИРА получены максимальные значения нормальной растягивающей силы, возникающей в стальных канатах, равной $N = 2144$ кН, и горизонтального перемещения, равного $u = 1,034$ м.

В качестве примера на рис. 4 показано деформированное состояние защитного сооружения, соответствующее максимальным перемещениям в момент времени $t = 0,1134$ с от начала действия динамической нагрузки.

Согласно задачам исследования по результатам проведенного моделирования запроектировано и изготовлено защитное сооружение, конструктивно представляющее собой противотаранный шлагбаум¹. Монтаж объекта исследования выполнен на по-

лигоне испытательной лаборатории для проведения испытаний технических средств обеспечения транспортной безопасности Пензенского государственного университета. Общий вид противотаранного шлагбаума до экспериментального исследования представлен на рис. 5.

Данное техническое решение условно можно представить в виде совокупности двух групп конструктивных элементов: основных (несущих) и вспомогательных. Основные элементы обеспечивают требуемую прочность и жесткость противотаранного шлагбаума при действии силовых факторов, возникающих вследствие таранного удара автотранспортным средством. Вспомогательные элементы предназначены для сопряжения и обеспечения требуемой функциональности несущих элементов.

К основным элементам относятся стальные канаты, штыри из высокопрочной стали, расположенные на концах стрелы противотаранного шлагбаума и наряду с этим две металлические опоры. Все перечисленное совместно с фундаментом образует замкнутую силовую систему во время действия кратковременной динамической нагрузки.

В качестве вспомогательных элементов выступают металлическая рама с установленной стрелой, выполненной из стальной трубы и уравновешенной противовесом, электропривод, а также пластиковый защитный кожух, закрывающий раму с противовесом.

Стальные канаты намотаны по замкнутому контуру вокруг металлических штырей, расположенных на концах стрелы, тем самым труба, из кото-

¹ Противотаранное устройство ЗАО «ЦесИС НИКИРЭТ». URL: <https://cesis.ru/produkcija/ptu/shlagbaumnogo-tipa/protivotarannoe-ustrojstvo-ptu/>

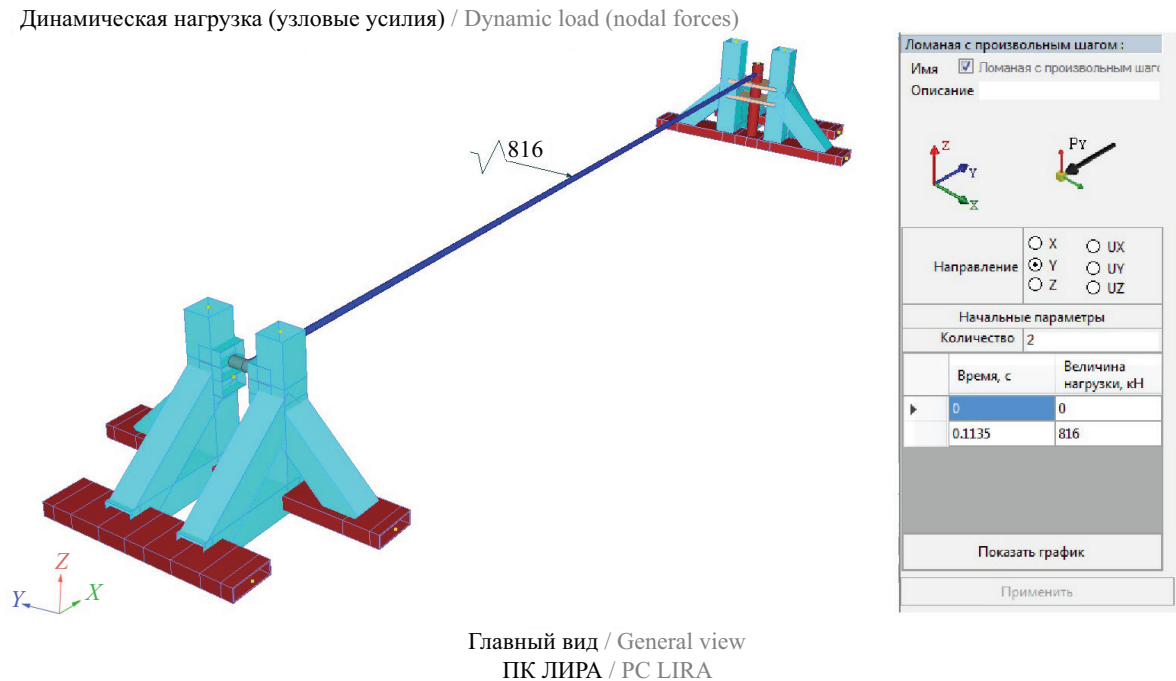


Рис. 3. Расчетная модель защитного сооружения

Fig. 3. Design model of the protective structure

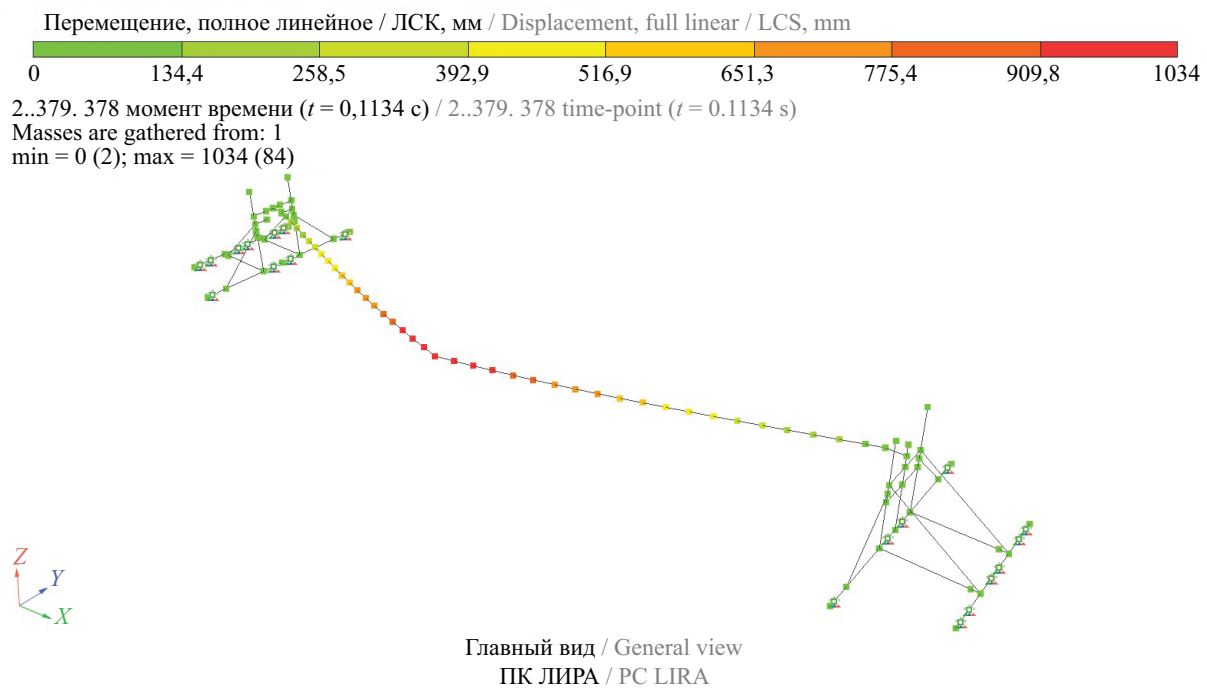


Рис. 4. Деформированное состояние защитного сооружения

Fig. 4. Design model of the protective structure

рой изготовлена стрела барьера, является кожухом для указанных элементов.

В свою очередь металлические штыри на концах стрелы защитного сооружения предназначены для организации пассивного зацепа во время таранного удара автотранспортным средством.

Металлические опоры противотаранного шлагбаума представляют собой пространственные конструкции, сваренные из толстостенных стальных прямоугольных профилей. Основания опор имеют жесткое сопряжение с блоками фундаментных болтов, расположенными в теле фундамента.

Натурное испытание проводится путем наезда на объект исследования грузовым автомобилем

ЗИЛ-130, догруженным железобетонными блоками до требуемой массы $m = 10$ т и разогнанным до скорости $v = 60$ км/ч (рис. 6).

Разгон испытательного автомобиля осуществляется по горизонтальной дороге с твердым покрытием. Прямолинейное движение автотранспортного средства в направлении удара обеспечивается монорельсом, непосредственно по которому перемещается ползун, соединенный с помощью стальной цепи с передней подвеской разгоняемого автомобиля (рис. 6). В свою очередь ползун посредством тягового троса, огибающего систему полиспастов, приводится в движение колесным трактором К-700. Контроль скорости, на которой происходит взаимодействие,



Рис. 5. Общий вид противотаранного шлагбаума до испытания

Fig. 5. General view of the anti-ram barrier before the test



Рис. 6. Общий вид автомобиля ЗиЛ-130 до испытания

Fig. 6. General view of the ZiL-130 car before the test

осуществляется с помощью датчика угла поворота (энкодера), установленного на заднем колесе ударяющего автотранспортного средства (рис. 6).

На расстоянии 4 м от объекта исследования ползун автоматически отделяется от стальной цепи, соединенной с передней подвеской, и испытательный автомобиль продолжает свое дальнейшее движение по инерции.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Фактические климатические условия на момент натурного эксперимента характеризовались температурой окружающего воздуха $+25^{\circ}\text{C}$ и скоростью ветра $0\text{--}1\text{ м/с}$.

В ходе экспериментального исследования стрела противотаранного шлагбаума находилась в горизонтальном положении, тем самым фиксировалось замкнутое состояние силовой системы «канаты – штыри – опоры – фундамент».

На основании данных, полученных с датчика угла поворота, скорость ударяющего автотранспортного средства к моменту контакта с объектом исследования составляла $59,4\text{ км/ч}$. Удар пришелся под прямым углом в середину стрелы защитного сооружения.

Во время таранного удара испытательным автомобилем первой начала деформироваться стрела, при этом совершая кинематические перемещения до тех пор, пока штыри, расположенные на ее концах, не вошли в контакт с опорами барьера.

После полного совершения стрелой кинематических перемещений по выбору зазоров между штырями и опорами произошло разрушение указанного элемента. В это же время в работу по восприятию кратковременной динамической нагрузки вступили стальные канаты, расположенные внутри стрелы противотаранного шлагбаума. Таким образом, стальные канаты через штыри посредством опор передали ударную нагрузку на фундамент.

Общий вид объекта исследования после контакта с автотранспортным средством, которым производился таранный удар, представлен на рис. 7.

Одним из важнейших критериев, характеризующих поведение любой механической системы при внешнем воздействии, являются возникающие при этом деформации. Анализ деформированного состояния, представленного на рис. 7, показал, что максимальный прогиб основных несущих элементов, а именно стальных канатов, расположенных внутри стрелы защитного сооружения, составил значение порядка $1,05\text{ м}$ при цене деления шкалы измерения, равной $0,2\text{ м}$.

Для оценки адекватности результатов, полученных численным методом по предложенному в данном исследовании алгоритму, сведем значения ранее принятых критериев в таблицу.

Анализ приведенных данных в таблице показывает, что полученные результаты с помощью предложенного численного алгоритма имеют хорошую согласованность с данными, зафиксированными в ходе проведения натурного эксперимента, а также



Рис. 7. Общий вид противотаранного шлагбаума и автомобиля ЗиЛ-130 после испытания
Fig. 7. General view of the anti-ram barrier and the ZiL-130 car after the test

Критерии оценки адекватности результатов
Criteria for assessing the adequacy of the results

Метод Method	Критерий оценки Evaluation criteria				
	Максимальный прогиб, м Maximum deflection, m		Максимальное продольное усилие, кН Maximum longitudinal force, kN		
МКЭ FEM	1,034		Δ = 5,57, %	2144	Δ = 16,49, %
Предложенный алгоритм The proposed algorithm	Δ = 4,11, %	1,095		2567,4	
Натурный эксперимент Full-scale experiment		1,05		—	

найденным другим методом расчета как по величине максимального прогиба, так и величине продольного усилия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенное конструктивное решение защитного сооружения, представляющее собой противотаранный шлагбаум с основными несущими элементами, выполненными из нескольких витков стального каната, в ходе натурного испытания подтвердило расчетные характеристики по остановке автомобиля с заданной массой и скоростью движения. Наряду с этим проведенный полномасштабный эксперимент позволил определить истинное

распределение деформаций по элементам объекта исследования, возникающих вследствие ударного воздействия, вызванного наездом останавливаемого автотранспортного средства. Выявленное незначительное расхождение в результатах моделирования и данных, полученных экспериментальным путем, свидетельствует о том, что предложенный численный алгоритм по поиску минимально допустимой площади поперечного сечения стальных канатов, исходя из требования заданной прочности, имеет достаточную надежность.

Результаты исследования могут найти применение при проектировании подобных инженерных сооружений, предназначенных для защиты инфраструктуры особо важных объектов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Минаев В.А., Сычев М.П., Севрюков Д.В., Дудолодов В.А. Некоторые аспекты оценки характеристик и применения противотаранных устройств // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2018. № 7-8(121-122). С. 45–51. EDN XWC DLV.
2. Tran P., Linforth S., Ngo T., Lumantarna R., Nguyen T. Design analysis of hybrid composite anti-ram bollard subjected to impulsive loadings // Composite Structures. 2018. Vol. 189. Pp. 598–613. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.01.093
3. Шнякина Е.А. Имитационная модель оценки эффективности систем физической защиты объектов // Автоматизация. Современные технологии. 2023. Т. 77. № 6. С. 263–268. DOI: 10.36652/0869-4931-2023-77-6-263-268 EDN LVJLXB.
4. Костин В.Н. Методика формирования элементов структуры организационного управления систем физической защиты на основе информационного подхода // Труды Института системного анализа Российской академии наук. 2020. Т. 70. № 1. С. 30–39. DOI: 10.14357/20790279200104 EDN DMVROZ.
5. Костин В.Н. Задачи концептуального проектирования физической защиты критически важных объектов // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2020. № 1. С. 58–67. EDN UPNQEB.
6. Демьянушко И.В., Михеев П.С., Медведев М.М. Особенности конструкций дорожных мобильных фронтальных ограждений и расчеты при проектировочном анализе // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2022. № 2 (32). EDN WUGDLP.
7. Zhang Y., Li R., Heng K., Hu F. Dynamic behaviors of optimized K12 anti-ram bollards // Symmetry. 2022. Vol. 14. Issue 8. P. 1703. DOI: 10.3390/sym14081703
8. Bruski D., Burzyński S., Witkowski W. Analysis of passenger car crash with a cable barrier installed with anti-glare screens on a horizontal convex road curve with 400 m radius // International Journal of Impact Engineering. 2023. Vol. 173. P. 104486. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2022.104486
9. Carter S.D., Rilett L.R. Evaluation of department of defense installation entry control facilities using microsimulation // Transportation Research Record. 2023. Vol. 2677. Issue 3. Pp. 128–144. DOI: 10.1177/03611981221114116
10. Salem S., Campidelli M., El-Dakhkhni W., Tait M. Resilience-based design for blast risk mitigation: Learning from natural disasters // Resilient structures and infrastructure. 2019. Pp. 177–194. DOI: 10.1007/978-981-13-7446-3_7
11. Ивченко В.И., Шмелёв А.В., Талалуев А.В., Омелюсик А.В. Методические рекомендации по топологической оптимизации силовых конструкций с применением средств численного моделирования // Механика машин, механизмов и материалов. 2022. Vol. 4 (61). Pp. 68–79. DOI: 10.46864/1995-0470-2022-4-61-68-79. EDN FIHNIA.
12. Chen X., Agrawal A., El-Tawil S., Xu X., Cao R., Wong W. Inelastic behavior of a bridge bent subjected to truck impact: Experimental and computational study // Engineering Structures. 2019. Vol. 199. Issue 6. P. 109543. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109543
13. Chen L., Wu H., Liu T. Vehicle collision with bridge piers: A state-of-the-art review // Advances in Structural Engineering. 2021. Vol. 24. Issue 2. Pp. 385–400. DOI: 10.1177/1369433220953510
14. Jalaluddin N.F.M., Said C.S. Sorotan Literatur Kajian kes penggunaan metod TRIZ dalam menyelesaikan masalah // Rumpun Jurnal Persuratan Melayu. 2021. Vol. 9. Issue 2. Pp. 48–57. URL: <https://rumpun-jurnal.com/jurnal/index.php/rumpun/article/view/145>
15. Kamel H. Review of design techniques of armored vehicles for protection against blast from improvised explosive devices // ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. American Society of Mechanical Engineers. 2019. Vol. 83501. P. V013T13A001. DOI: 10.1115/IMECE2019-10227
16. Ma J., Guo Y. Stress analysis of steel wire in strand based on optical lever principle and finite element calculation // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2020. Vol. 42. Pp. 1–10. DOI: 10.1007/s40430-019-2120-1
17. Gurevich L., Danenko V., Bogdanov A., Kulevich V. Analysis of the stress-strain state of steel closed ropes under tension and torsion // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2022. Vol. 118. Issue 1–2. Pp. 15–22. DOI: 10.1007/s00170-021-07128-w
18. Palit P., Kushwaha S., Mathur J., Chaturvadi A. Life cycle assessment of wire rope used in crane application in a steel plant // Journal of failure analysis and prevention. 2019. Vol. 19. Issue 3. Pp. 752–760. DOI: 10.1007/s11668-019-00655-5
19. Ereemeev P.G., Vedyakov I.I., Zvezdov A.I. Suspension large span roofs structures in Russia // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2021. Vol. 17. Issue 2. Pp. 34–42. DOI: 10.22337/2587-9618-2021-17-2-34-41. EDN NBSNNA.
20. Jiang Z., Liu X., Shi K., Lin Q., Zhang Z. Catenary equation-based approach for force finding of cable domes // International Journal of Steel Structures. 2019. Vol. 19. Pp. 283–292. DOI: 10.1007/s13296-018-0117-8
21. Jia L., Zhang C., Jiang Y.M., Cheng J., Xiao R. Simplified calculation methods for static behaviors of triple-tower suspension bridges and parametric study // International Journal of Steel Structures. 2018. Vol. 18. Issue 2. Pp. 685–698. DOI: 10.1007/s13296-018-0028-8
22. Song T., Wang B., Song Y. A simplified calculation method for multi-tower self-anchored suspension bridges based on frame structure theory model // International Journal of Steel Structures. 2022. Vol. 22. Issue 1. Pp. 373–388. DOI: 10.1007/s13296-022-00581-7
23. Сиянов А.И., Ярошевич Д.К. Расчет цилиндрических сетчатых покрытий с учетом уравнений

движения // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 3. С. 112–119. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-112-119. EDN JCAXAA.

24. Тарасов Д.А., Коновалов В.В., Данилов А.Л., Бобылев А.И. Определение области несущей способности гибкой нити при действии поперечного

удара // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2021. Т. 10. № 2 (54). С. 40–43. DOI: 10.46548/21vek-2021-1054-0007. EDN FKUILU.

25. Тарасов Д.А. Параметрическая оптимизация стальных канатов при действии поперечного удара // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2015. № 2 (24). С. 56–62. EDN TYVZHD.

Поступила в редакцию 27 августа 2023 г.

Принята в доработанном виде 1 марта 2024 г.

Одобрена для публикации 1 марта 2024 г.

ОБ АВТОРЕ: **Денис Александрович Тарасов** — кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированных систем безопасности; **Пензенский государственный университет (ПГУ)**; 440026, г. Пенза, ул. Красная, д. 40; SPIN-код: 7690-5877, Scopus: 57204116511, ORCID: 0000-0001-7685-0325; tda82@list.ru.

REFERENCES

1. Minaev V.A., Sychev M.P., Sevryukov D.V., Dudoladov V.A. Some aspects of performance evaluation and application of anti-vehicle devices. *Questions of Defense Technology. Series 16: Technical Means of Countering Terrorism*. 2018; 7-8(121-122):45-51. EDN XWCDLV.
2. Tran P., Linforth S., Ngo T., Lumantarna R., Nguyen T. Design analysis of hybrid composite anti-ram bollard subjected to impulsive loadings. *Composite Structures*. 2018; 189:598-613. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.01.093
3. Shnyakina E.A. Simulation model for efficiency evaluation of the objects physical protection systems. *Automation. Modern Technologies*. 2023; 77(6):263-268. DOI: 10.36652/0869-4931-2023-77-6-263-268. EDN LVJLXB.
4. Kostin V.N. Formation technique of elements of the structure of organizational management of physical protection systems based on the information approach. *Proceedings of the Institute for Systems Analysis Russian Academy of Sciences (ISA RAS)*. 2020; 70(1):30-39. DOI: 10.14357/20790279200104. EDN DMVROZ.
5. Kostin V.N. Tasks of conceptual design of physical protection of critically important objects. *Tasks of Conceptual Design of Physical Protection of Critically Important Objects*. 2020; 1:58-67. EDN UPNQEB.
6. Demyanushko I.V., Mikhnev P.S., Medvedev M.M. Features of structures of road mobile frontal barriers and calculations in design analysis. *Avtomobil. Road. Infrastructure*. 2022; 2(32). EDN WUGDLP.
7. Zhang Y., Li R., Heng K., Hu F. Dynamic behaviors of optimized K12 anti-ram bollards. *Symmetry*. 2022; 14(8):1703. DOI: 10.3390/sym14081703
8. Bruski D., Burzyński S., Witkowski W. Analysis of passenger car crash with a cable barrier installed with anti-glare screens on a horizontal convex road curve with 400 m radius. *International Journal of Impact Engineering*. 2023; 173:104486. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2022.104486
9. Carter S.D., Rilett L.R. Evaluation of department of defense installation entry control facilities using microsimulation. *Transportation Research Record*. 2023; 2677(3):128-144. DOI: 10.1177/03611981221114116
10. Salem S., Campidelli M., El-Dakhkhni W., Tait M. Resilience-based design for blast risk mitigation: Learning from natural disasters. *Resilient Structures and Infrastructure*. 2019; 177-194. DOI: 10.1007/978-981-13-7446-3_7
11. Ivchenko V.I., Shmialiou A.V., Talaluev A.V., Omeliusik A.V. Methodological recommendations on topological optimization of power structures using numerical modeling tools. *Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials*. 2022; 4(61):68-79. DOI: 10.46864/1995-0470-2022-4-61-68-79 EDN FIHNIA
12. Chen X., Agrawal A., El-Tawil S., Xu X., Cao R., Wong W. Inelastic behavior of a bridge bent subjected to truck impact: Experimental and computational study. *Engineering Structures*. 2019; 199(6):109543. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109543
13. Chen L., Wu H., Liu T. Vehicle collision with bridge piers: A state-of-the-art review. *Advances in Structural Engineering*. 2021; 24(2):385-400. DOI: 10.1177/1369433220953510
14. Jalaluddin N.F.M., Said C.S. Sorotan Literatur Kajian kes penggunaan metod TRIZ dalam menyelesaikan masalah. *Rumpun Jurnal Persuratan Melayu*. 2021; 9(2):48-57. URL: <https://rumpunjurnal.com/jurnal/index.php/rumpun/article/view/145>
15. Kamel H. Review of design techniques of armored vehicles for protection against blast from Improvised Explosive Devices. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. *American Society of Mechanical Engineers*. 2019; 83501:V013T13A001. DOI: 10.1115/IMECE2019-10227
16. Ma J., Guo Y. Stress analysis of steel wire in strand based on optical lever principle and finite element calculation. *Journal of the Brazilian Society of Mechan-*

cal Sciences and Engineering. 2020; 42:1-10. DOI: 10.1007/s40430-019-2120-1

17. Gurevich L., Danenko V., Bogdanov A., Kulevich V. Analysis of the stress-strain state of steel closed ropes under tension and torsion. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022; 118(1-2):15-22. DOI: 10.1007/s00170-021-07128-w

18. Palit P., Kushwaha S., Mathur J., Chaturvedi A. Life cycle assessment of wire rope used in crane application in a steel plant. *Journal of failure Analysis and Prevention*. 2019; 19(3):752-760. DOI: 10.1007/s11668-019-00655-5

19. Eremeev P.G., Vedyakov I.I., Zvezdov A.I. Suspension large span roofs structures in Russia. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2021; 17(2):34-42. DOI: 10.22337/2587-9618-2021-17-2-34-41. EDN NBSNA.

20. Jiang Z., Liu X., Shi K., Lin Q., Zhang Z. Catenary equation-based approach for force finding of cable domes. *International Journal of Steel Structures*. 2019; 19:283-292. DOI: 10.1007/s13296-018-0117-8

21. Jia L., Zhang C., Jiang Y., Cheng J., Xiao R. Simplified calculation methods for static behaviors

of triple-tower suspension bridges and parametric study. *International Journal of Steel Structures*. 2018; 18(2):685-698. DOI: 10.1007/s13296-018-0028-8

22. Song T., Wang B., Song Y. A simplified calculation method for multi-tower self-anchored suspension bridges based on frame structure theory model. *International Journal of Steel Structures*. 2022; 22(1):373-388. DOI: 10.1007/s13296-022-00581-7

23. Siyanov A.I., Yaroshevich D.K. Calculation of cylindrical mesh coatings based on equations of motion. *Bulletin of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering*. 2023; 25(3):112-119. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-112-119. EDN JCAXAA.

24. Tarasov D.A., Konovalov V.V., Danilov A.L., Bobylev A.I. Determination of the region of carrying capacity of a flexible thread during action cross impact. *XXI Century: Results of the Past and Problems of the Present Plus*. 2021; 10(2):40-43. DOI: 10.46548/21vek-2021-1054-0007. EDN FKUILU.

25. Tarasov D.A. Parametric optimization of steel ropes under lateral impact. *XXI Century: Results of the Past and Problems of the Present Plus*. 2015; 2(24):56-62. EDN TYVZHD.

Received August 27, 2023.

Adopted in revised form on March 1, 2024.

Approved for publication on March 1, 2024.

B I O N O T E S: **Denis A. Tarasov** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automated Security Systems; **Penza State University (PSU)**; 40 Krasnaya st., Penza, 440026, Russian Federation; SPIN-code: 7690-5877, Scopus: 57204116511, ORCID: 0000-0001-7685-0325; tda82@list.ru.