

УДК 624.96:531.661

DOI: 10.46548/21vek-2021-1055-0014

АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ МОБИЛЬНОГО ЗАГРАЖДЕНИЯ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЦЕПИ

© 2021

Тарасов Денис Александрович, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Автоматизированные системы безопасности»

Большаков Герман Сергеевич, кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Технологии и оборудование машиностроения»

Пензенский государственный университет

(440026, Россия, Пенза, ул. Красная, 40, e-mails: den517375@ya.ru, geraman83@mail.ru)

Волков Владимир Васильевич, кандидат технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Автоматизация и управление»

Аксенова Елена Александровна, старший преподаватель кафедры «Автоматизация и управление»

Пензенский государственный технологический университет

(440039, Россия, Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, д. 1а/11, e-mails: volkovv@penzgtu.ru, nsn@penzgtu.ru)

Аннотация. Объектом исследования выступало мобильное ограждение, образованное железобетонными блоками соединенными между собой и предназначенное для создания физического препятствия для автотранспортного средства. Предметом исследования настоящей работы являлись внутренние усилия в элементах связей мобильного ограждения, возникающие в результате действия кратковременной динамической нагрузки, а также деформации ограждения, характеризующиеся углом поворота ударяемого блока вокруг его продольной оси. Исследование проведено с помощью коммерческой системы компьютерного моделирования *SolidWorks* «Анализ движения». Расчет связанных дифференциальных и алгебраических уравнений, определяющих движение модели механической цепи при наезде автотранспортного средства, производился с помощью интегратора переменного порядка и шага *WSTIFF*. Проведен анализ по влиянию коэффициента трения скольжения на характер изменения реакций, возникающих в элементах связей между отдельными блоками, а также на поведение конструкции. Выявлена значительная обусловленность возникающих внутренних усилий в элементах связей, а также углов поворота блоков вокруг продольной оси ограждения от указанного параметра. Полученные данные дают возможность принимать эффективные технические решения по снижению коэффициента трения скольжения в паре «мобильное ограждение – основание для его установки» при разработке и применении подобных устройств.

Ключевые слова: цепь, изгибно-жесткая нить, мобильное ограждение, удар, коэффициент трения.

ANALYSIS OF THE DYNAMIC BEHAVIOR OF A MOBILE BARRIER BASED ON A MECHANICAL CHAIN MODEL

© 2021

Tarasov Denis Aleksandrovich, candidate of technical sciences,
associate professor of the Department "Automated Security Systems»

Bolshakov German Sergeevich, candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the Department of "Technologies and Equipment of Mechanical Engineering»

Penza State University

(40 Krasnaya str., Penza, 440026, Russia, e-mails: den517375@ya.ru, geraman83@mail.ru)

Volkov Vladimir Vasilievich, candidate of technical sciences, professor,
head of the Department "Automation and Control"

Aksenova Elena Aleksandrovna, senior lecturer of the Department "Automation and Control"

Penza State Technological University

(440039, Russia, Penza, Baidukova proezd / ul. Gagarina, 1a/11, e-mails: volkovv@penzgtu.ru, nsn@penzgtu.ru)

Abstract. The object of the study was a mobile barrier formed by reinforced concrete blocks connect-ed to each other and designed to create a physical obstacle for a vehicle. The subject of this study was the internal forces in the elements of the links of a mobile barrier, resulting from the action of a short-term dynamic load, as well as deformation of the barrier, characterized by the angle of rotation of the striking block around its longitudinal axis. The study was carried out using a commercial computer modeling system *SolidWorks* "Motion Analysis". The calculation of coupled differential and algebraic equations defining the movement of the model of a mechanical chain when a vehicle collides was carried out using an integrator of variable order and step *WSTIFF*. An analysis is carried out on the influence of the sliding friction coefficient on the nature of the change in the reactions arising in the elements of connections between individual blocks, as well as on the behavior of the structure. Revealed a significant conditionality of the arising internal forces in the elements of the links, as well as the angles of rotation of the blocks around the longitudinal axis of the fence from the specified parameter. The data obtained make it possible to make effective technical solutions to reduce the coefficient of sliding friction in the pair "mobile barrier - the basis for its installation" in the development and use of such devices.

Keywords: chain, flexural-rigid thread, mobile barrier, impact, coefficient of friction.

Введение. За последнее время появился большой интерес к вопросам связанным с созданием теоретических основ для разработки [1 – 3], а также с практическим применением систем и средств физической защиты объектов как промышленного, так и гражданского назначения [4 – 7]. Это объясняется непрекращающимся ростом террористических угроз в стране и мире. Как правило, первым рубежом безопасности является внешний периметр, проходящий по границе территории охраняемого объекта [8]. Однако многие объекты инфраструктуры требуют временного ограничения своей территории, например, для проведения массового мероприятия с большим количеством скопления людей. Сегодня одной из наиболее потенциально опасных угроз является таранный удар автотранспортным средством [9, 10]. Для противодействия такой угрозе и реализации мобильных свойств заграждения одним из наиболее простых и надежных решений является преграда образованная железобетонными блоками, соединенными между собой.

Техническое решение, представленное на рисунке 1, предназначено для создания физического препятствия транспортному средству, прорывающемуся на территорию охраняемого объекта посредством таранного удара, и обеспечения его принудительной остановки для предотвращения распространения последствий, планируемого террористического акта. Такую конструкцию следует рассматривать как единую механическую цепь, состоящую из отдельных объемных железобетонных блоков, соединенных между собой элементами, образующими между ними связи. Вместе с тем неправильно принятые предпосылки при расчете или конструктивные решения на стадии разработки такого устройства могут повлечь за собой разрыв механической цепи прорывающимся транспортным средством со всеми вытекающими трагическими последствиями.

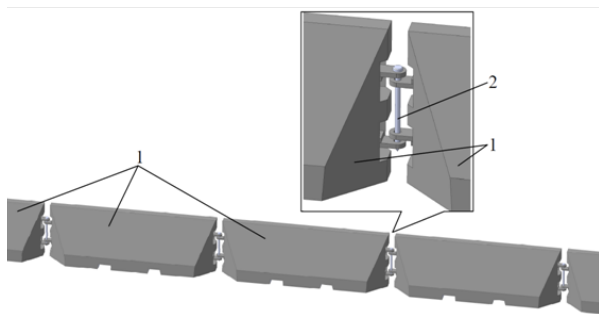


Рисунок 1 – общий вид мобильного заграждения:
1 – железобетонный блок; 2 – элемент связи

Целью данного исследования являлось повышение несущей способности мобильного заграждения, а именно, стойкости к таранному удару транспортным средством, а также оценка влияния одного из параметров, определяющих работу конструкции и распределение усилий в ее элементах при внешнем воздействии поперечной кратковременной динамической нагрузки.

Материалы и методы исследования. Моделиро-

вание работы мобильного заграждения при действии внешних силовых факторов проводилось в системе компьютерного моделирования *SolidWorks* «Анализ движения». Трехмерная твердотельная модель представляла собой изделие, состоящее из 5 секций, и основание на котором оно установлено. Взаимодействие между секциями в цепи заграждения моделировалось с помощью сопряжений «концентричность». Для моделирования контакта железобетонных блоков и основания использовалась односторонняя связь, в параметрах которой определялся коэффициент трения покоя и скольжения, а также жесткость. Односторонняя связь в виде 3D контакта позволяла сохранить возможность перемещения блоков в вертикальной плоскости с отрывом от основания и тем самым исследовать возможность опрокидывания цепи в целом. Поперечное кратковременное динамическое воздействие от транспортного средства моделировалось заданием начальной скорости движения центрального блока равной 5 м/с. Изменение скорости от 0 до 5 м/с происходило за 0,2 секунды. Данный параметр определен на основе результатов полученных в ходе натурных испытаний [18]. Кроме того в качестве нагрузок задавалась сила тяжести препятствующая опрокидыванию и вызывающая трение блоков об основание.

Результаты исследования. На этапе рабочего проектирования средств физической защиты разработчику необходимо принимать оптимальные конструктивные решения и обосновывать их эффективность [11 – 13]. Данная задача осложняется тем, что каждый раз при организации охраны периметра нового объекта возникают иные условия эксплуатации мобильного заграждения, не похожие на предыдущие. Так в зависимости от вида основания, на которое устанавливается изделие, а также времени года и наличия атмосферных осадков меняется один из основных параметров определяющих работу конструкции при внешнем воздействии – коэффициент трения скольжения. В связи с этим исследовался характер изменения реакций, возникающих в элементах связей между отдельными блоками, а также поведение конструкции от указанного параметра.

Количественная оценка влияния коэффициента трения скольжения на поведение конструкции под действием поперечной кратковременной динамической нагрузки выполнена по углу поворота ударяемого блока вокруг его продольной оси. На рисунке 2 представлены зависимости угла поворота ударяемого блока вокруг продольной оси от времени, вычисленные при коэффициентах трения скольжения, имеющих значения от 0,2 до 0,7 включительно с шагом 0,1.

Увеличение коэффициента трения приводит к росту сил сопротивления, вызванных трением скольжения, а также инерционных сил, являющихся нежелательными и способствующими опрокидыванию механической цепи, что недопустимо с точки зрения тактики применения мобильного заграждения. Из рисунка 2 видно, что рост значения коэффициента трения скольжения от 0,2 до 0,6 ведет к увеличению

угла поворота вокруг продольной оси блока, испытывающего непосредственно поперечный удар. При этом следует отметить, что опрокидывания ударяемого блока и цепи в целом не происходит, поскольку в течение времени взаимодействия мобильного заграждения с транспортным средством, по мере остановки последнего, угол поворота возвращается к своему первоначальному до соударения значению. Однако при коэффициенте трения скольжения равного 0,7 происходит резкий рост угла поворота, что свидетельствует об опрокидывании и не обеспечении изделием заявленных технических характеристик по остановке прорывающегося транспортного средства. В связи с этим дальнейшие исследования проведены для коэффициента трения скольжения со значениями от 0,2 до 0,6 включительно с шагом 0,1.

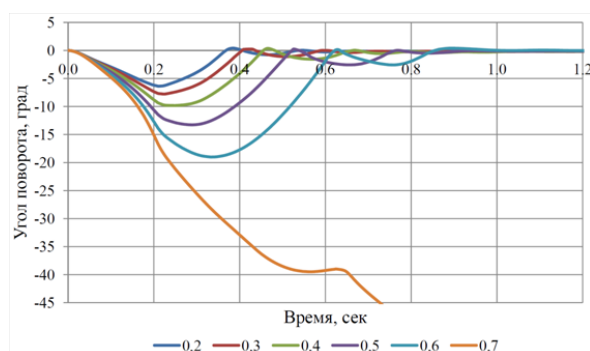


Рисунок 2 – Зависимость угла поворота по времени от коэффициента трения скольжения

Главными конструктивными элементами, определяющими общую неразрывность механической цепи при внешнем воздействии, являются элементы связей, поскольку сами железобетонные блоки имеют несомненно большую прочность.

На рисунке 3 и 4 представлены зависимости, характеризующие изменение значений по времени продольных и поперечных составляющих реакций в связях между блоками от коэффициента трения скольжения.

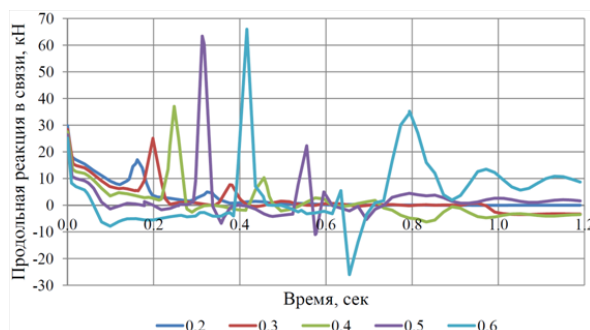


Рисунок 3 – Зависимость продольной реакции в связи по времени от коэффициента трения скольжения

Из полученных при моделировании зависимостей видно, что увеличение коэффициента трения скольжения вызывает резкий рост внутренних усилий, возникающих в элементах связей между блоками. Это обусловлено возрастающим действием внешних сил

трения и инерции на звенья мобильного заграждения. При этом следует отметить, что по своим абсолютным значениям продольные составляющие реакций в связях в разы больше чем поперечные [14, 15]. Тем самым подтверждается тот факт, что изделие, состоящее из отдельных железобетонных блоков соединенных между собой, ведет себя под внешним воздействием как цепь или изгибно-жесткая нить. Поскольку в силу особенностей работы таких элементов при действии поперечной нагрузки вектор, соответствующий внутреннему усилию, всегда направлен по касательной к его оси [16, 17].

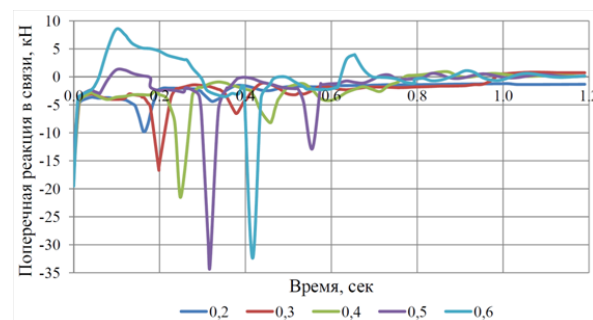


Рисунок 4 – Зависимость поперечной реакции в связи по времени от коэффициента трения скольжения

Заключение. Проведенное компьютерное моделирование поведения мобильного заграждения на основе модели механической цепи под действием поперечной кратковременной динамической нагрузки позволило выявить влияние коэффициента трения скольжения на работу и распределение внутренних усилий в элементах конструкции. Полученные данные дают возможность повышать сопротивление мобильного заграждения к ударному воздействию посредством принятия эффективных технических решений снижающих коэффициент трения скольжения в паре «мобильное заграждение – основание для его установки». Данный способ в отличие от традиционных путей решения задачи по повышению несущей способности той или иной конструкции не требует увеличения геометрических параметров сечений элементов, а также прочностных характеристик материала изделия. Результаты проведенного исследования позволят при разработке подобных устройств применять менее материалоемкие конструктивные решения и тем самым более экономически оправданные.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

- Осипенко, М.А. Задача об одностороннем контакте гибкой нерастяжимой нити и твердого тела / М.А. Осипенко // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2015. – №1(33). – С. 82-87.
- Тарасов, Д.А. Исследование влияния пластических деформаций при моделировании напряженно-деформированного состояния гибкой нити / Д.А. Тарасов, А.В. Липов, А.М. Ирышков // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2020. – № 1 (33). – С. 98–110.
- Дремова, Н.В. Математическая модель в задачах динамических систем с гибкими нитями / Н.В. Дремова, Т. Мавлянов // В сборнике: ИННОВАЦИИ, КАЧЕСТВО И СЕРВИС В ТЕХНИКЕ И ТЕХНОЛОГИЯХ [Текст]: Сборник научных трудов 4-ой Международной научно-практической конферен-

ции (4-5 июня 2014 года) / ред.-кол.: Горохов А.А. (отв. Ред.); В 3-х томах, Том 1., Юго-Зап. гос. ун-т. Курск. – 2014. – С. 197-201.

4. Тарасов, Д.А. Конструкция защитного сооружения от удара для железнодорожных переездов / Д.А. Тарасов, В.В. Коновалов, В.Ю. Зайцев // Региональная архитектура и строительство. – 2014. – № 1 (18). – С. 111-117.

5. Патент на изобретение №2621774 РФ. Противотаранный барьер / Д.А. Тарасов, П.А. Косяков, Н.А. Шалапин, О.Л. Шаповал. – 2015145382; заявл. 21.10.2015; опубл. 07.06.2017, Бюл. №16. – 11 с.

6. Патент на изобретение №2694376 РФ. Противотаранные откатные ворота / А.А. Кодоров, Д.А. Тарасов, Г.С. Большаков, И.В. Васильев, О.Л. Шаповал. – 2019102145; заявл. 24.12.2018; опубл. 12.07.2019, Бюл. №20. – 12 с.

7. Швецов, А.В. Противотаранное заградительное устройство / А.В. Швецов // Транспорт Российской Федерации. – 2016. – №2-3 (63-64). – С. 58-60.

8. Патент на полезную модель №191852 РФ. Противотаранное ограждение / Д.А. Тарасов, Г.С. Большаков, И.В. Васильев, О.Л. Шаповал. – 2019113635; заявл. 30.14.2019; опубл. 26.08.2019, Бюл. №24. – 8 с.

9. Елисеев, В.В. Моделирование и расчет противотаранного шлагбаума / В.В. Елисеев, Е.А. Оборин // Современное машиностроение. Наука и образование. – 2014. – №4. – С. 351-357.

10. Коновалов, В.В. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния гибкой нити при действии поперечного удара / В.В. Коновалов, Д.А. Тарасов, В.Ю. Зайцев, Ю.В. Родионов // В сборнике: Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Труды XXI Международной конференции. В 2-х томах. Под редакцией С.А. Никитова, Д.Е. Быкова, С.Ю. Боровика, Ю.Э. Плешивцевой. – 2019. – С. 313-317.

11. Елисеев В.В., Оборин Е.А. Деформация и пластическое разрушение балок дорожного ограждения при наезде автомобиля // Наука и техника в дорожной области. – 2014. – № 1. – С. 9-11.

12. Тарасов, Д.А. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния гибких нитей с учетом физической нелинейности / Д.А. Тарасов, Д.Ю. Семенов // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2017. – № 3 (23). – С. 175-185.

13. Tarasov, D. Mathematical modeling of deformations of flexible threads under their dynamic loading in the zone of material plasticity / D. Tarasov, V. Konovalov, V. Zaitsev, Yu. Rodionov // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. 2019. № 1278-012014.

14. Безбородов, Р.С. Исследование динамики противотаранной цепи / Р.С. Безбородов, Ю.Л. Рутман // Вестник гражданских инженеров. – 2017. – № 4 (63). – С. 119-123.

15. Демьянушко И.В., Карпов И.А. Расчет динамики наезда автомобиля на тросовое ограждение методом конечных элементов. Тез. докл. 71-ой науч.-метод. конференции МАДИ. – М.: Изд - во МАДИ, 2013. – С. 59-61.

16. Сильников, Н.М. Обзор зарубежных методик испытания и оценки противотаранных устройств / Н.М. Сильников, П.Д. Панов, А.С. Панков // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. – 2017. – № 11-12 (113-114). – С. 101-108.

17. Tarasov, D. Mathematical modeling of the stress-strain state of flexible threads with regard to plastic deformations / D. Tarasov, V. Konovalov, V. Zaitsev, Yu. Rodionov // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. 2018. № 1084-012008.

18. Протокол № 1720/U0/W/W/86-13 испытаний противотаранного устройства облегченного типа ПТУ-Л «PREPONA T1145» ДАБР.425728.002 автомобилем типа ГАЗ-3307. – п. Автополигон, Дмитровский район, Московская область: Испытательный центр НИЦИАМТ ФГУП «НАМИ», 2013. – 20 с.

Статья поступила в редакцию 07.07.2021

Статья принята к публикации 15.09.2021