

УДК (UDC) 624.21.014.2

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МОБИЛЬНЫХ МОСТОВ ДЛЯ
ПРЕОДОЛЕНИЯ ИСКУССТВЕННЫХ СООРУЖЕНИЙ
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫМИ МНОГООСНЫМИ КОЛЕСНЫМИ
ТРАНСПОРТНЫМИ СРЕДСТВАМИASSESSMENT OF THE POSSIBILITY OF USING MOBILE BRIDGES TO OVERCOME
MAN-MADE STRUCTURES BY SPECIALIZED MULTI-AXLE WHEELED VEHICLESТропин С.Л.^{1,2}, Мисинев А.Н.¹, Гнездилов С.Г.²
Tropin S.L.^{1,2}, Misinev A.N.¹, Gnezdilov S.G.²¹ – ООО ОКБ «Спецтяжпроект» (Москва, Россия)² – Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана (Москва, Россия)¹ – OKB Spetstyazhproekt Ltd. (Moscow, Russian Federation)² – Bauman Moscow State Technical University (Moscow, Russian Federation)

Аннотация. В статье приведены общие сведения о двухопорных мобильных мостах, предназначенных для бесконтактного переезда специализированных многоосных колесных транспортных средств с тяжеловесными грузами поверх искусственных сооружений. Также даны рекомендации по обоснованию возможности их использования для решения конкретных задач. В указанных рекомендациях содержатся полученные методами строительной механики выражения, на основе которых можно определить не только требуемый (минимальный) строительный подъем мобильного моста, необходимый для обеспечения нормального проезда транспортного средства, но и оценить напряженное состояние мобильного моста, а также определить характер деформирования мобильного моста в процессе передвижения по нему транспортного средства. Представленные рекомендации позволяют в первом приближении оценить пригодность доступных решений мобильного моста для проезда специализированных многоосных транспортных средств поверх искусственных сооружений в зависимости от требуемых пролета мобильного моста и нагрузки от транспортного средства на мобильный мост. В статье приведен также пример решения конкретной задачи на основе указанных рекомендаций, в соответствии с которым при пролете мобильного моста 23,4 м и рабочей нагрузке от одной оси транспортного средства равной 33,5 т требуемый строительный подъем моста равен 400 мм, а наибольшие эквивалентные напряжения будут составлять порядка 380 МПа.

Ключевые слова: мобильный мост, тяжеловесный груз, крупногабаритный груз, специализированное многоосное транспортное средство.

Дата принятия к публикации: 28.06.2021
Дата публикации: 25.09.2021

Abstract. The article provides general information about double-support mobile bridges designed for contactless movement of heavily loaded specialized multi-axle wheeled vehicles on top of man-made structures. Also, recommendations are given on substantiating the possibility of their use for solving specific problems. These recommendations contain expressions obtained by the methods of structural mechanics, on the basis of which it is possible to determine not only the required (minimum) camber of the mobile bridge, which is necessary to ensure the normal passage of the vehicle, but also to assess the stress state of the mobile bridge, as well as to determine the nature of the deformation of the mobile bridge when vehicle moves along it. The presented recommendations allow, at a first approximation, to assess the suitability of the available solutions of a mobile bridge for the passage of specialized multi-axle vehicles over man-made structures, depending on the required span of the mobile bridge and the load from the vehicle on the mobile bridge. The article also provides an example of solving a specific problem on the basis of these recommendations, in accordance with which, when a mobile bridge is spanned 23.4 m and a working load from one axis of the vehicle is equal to 33.5 tons, the required camber is 400 mm, and the highest equivalent stresses will be about 380 MPa.

Keywords: mobile bridge, portable bridge, heavy cargo, oversized cargo, self-propelled modular transporter.

Date of acceptance for publication: 28.06.2021
Date of publication: 25.09.2021

Сведения об авторах:

Тропин Сергей Львович – кандидат технических наук, доцент, генеральный директор ООО ОКБ «Спецтяжпроект», заведующий кафедрой «Подъемно-транспортные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана, e-mail: tropin@bmstu.ru.

Мисинев Александр Николаевич – кандидат технических наук, технический директор ООО ОКБ «Спецтяжпроект», e-mail: misinev.alexandr@okb-om.ru.

Гнездилов Сергей Геннадьевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Подъемно-транспортные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана, e-mail: gnezdilov@bmstu.ru.

ORCID: 0000-0002-3215-3840

Authors' information:

Sergey L. Tropin – PhD (Eng), Associate Professor, General Director of OKB Spetstyazhproekt Ltd., Head of Department of Hoisting and Conveying Systems, Bauman Moscow State Technical University, e-mail: tropin@bmstu.ru.

Alexander N. Misinev – PhD (Eng), Technical Director of OKB Spetstyazhproekt Ltd., e-mail: misinev.alexandr@okb-om.ru.

Sergey G. Gnezdilov – PhD (Eng), Associate Professor, Associate Professor of Department of Hoisting and Conveying Systems, Bauman Moscow State Technical University, e-mail: gnezdilov@bmstu.ru.

ORCID: 0000-0002-3215-3840

1. Введение

Провоз тяжеловесных грузов специализированными многоосными колесными транспортными средствами (далее – транспортное средство) по искусственным сооружениям невозможен при превышении ими допустимых нормативных нагрузок, установленных для данных сооружений. В этих случаях применяют двухопорные мобильные мосты (далее – мобильный мост) (англ. *fly over bridge*, нем. *Brückenüberfahrssystem*), которые устанавливают без прямого контакта поверх существующих сооружений [1] с опиранием на места, расположенные за пределами искусственного сооружения и имеющие достаточную несущую способность. В отличие от широко применяемых в военной сфере решений [2–5] мобильные мосты для тяжеловесных грузов обладают значительно более высокой несущей способностью. На рис. 1 показана принципиальная схема применения мобильных мостов для преодоления искусственных сооружений.

2. Двухопорное решение мобильного моста и постановка задач

Для провоза тяжеловесных грузов поверх искусственных сооружений возможны оригинальные подходы [6]. В публикации ограничимся рассмотрением компактных двухопорных решений мобильных мостов, располагающихся под колесами транспортного средства (рис. 2). Мобильные мосты по-

строены по модульному принципу, а их решения с требуемыми характеристиками, как конструктор, собираются из готовых компонентов. Мобильный мост включает несколько параллельно идущих путей, основу каждого из которых составляет пролетное строение, которое условно можно подразделить на два типа: «плита» и «балка» (рис. 2). Для заезда на собранное пролетное строение по концам пути устанавливают наклонные пандусы. Пролетное строение, в свою очередь, собирается из различных секций, длины которых выбираются с учетом возможности минимизации длины пролета мобильного моста. Модульный принцип построения мобильного моста позволяет оптимизировать его длину, минимизировать затраты на мобилизацию и сборку, обеспечить требуемый строительный подъем пролетного строения.

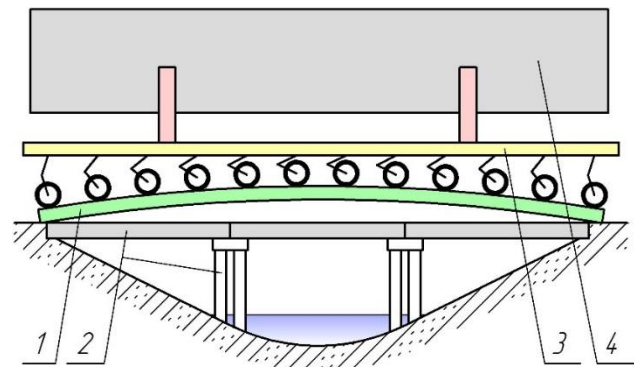


Рис. 1. Схема передвижения поверх существующего моста:

- 1 – мобильный мост,
- 2 – искусственное сооружение,
- 3 – транспортное средство,
- 4 – тяжеловесный груз

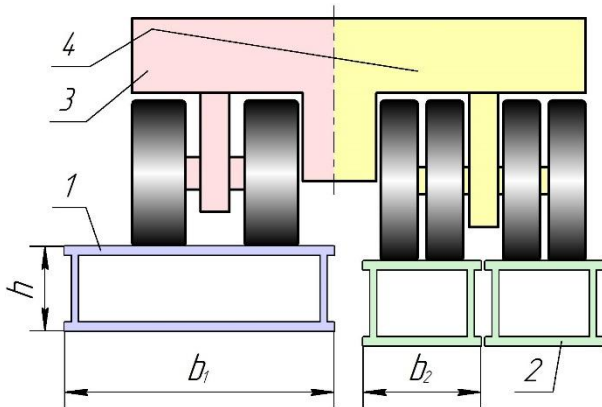


Рис. 2. Схема поперечного сечения транспортных средств с разными видами гидравлических подвесок на пролетных строениях различных типов: 1 – тип «плита», 2 – тип «балка», 3 – двухколесная подвеска, 4 – четырехколесная подвеска

Количество путей мобильного моста принимается в зависимости от исполнений используемых транспортных средств: их ширины, размеров, количества и расположения колес на осях. С учетом широко применяемых (в транспортных средствах) разновидностей гидравлических подвесок реализованы следующие известные технические решения пролетных строений (рис. 2):

- одна подвеска опирается на одно пролетное строение – решения компаний *Greiner GmbH*, *CC Bäuml GmbH*, *Rolitrans*;
- одна подвеска опирается на пару пролетных строений – решение компании *Viktor Baumann GmbH & Co. KG*.

В первом случае (рис. 2) ширина b пролетного строения составляет 1600 мм, во втором – около 700 мм.

Под действием рабочей нагрузки имеющая относительно невысокую изгибную жесткость (при большом пролете) конструкция мобильного моста существенно деформируется. Для компенсации таких деформаций и обеспечения равномерности перемещения под нагрузкой всех точек конструкции мобильного моста каждая секция в отдельности и формируемое на их основе пролетное строение должны иметь строительный подъем. При монтаже мобильного моста его строительный подъем формируют посредством установки в соединениях секций требуемого числа распорных вкладышей (с уве-

личением толщины вкладышей растет строительный подъем). Величина строительного подъема устанавливается с учетом пропускаемой нагрузки и должна обеспечивать, с одной стороны, геометрическую проходимость автопоезда (транспортного средства) по мобильному мосту, а с другой, минимальный заданный остаточный строительный подъем под нагрузкой.

В рамках настоящего исследования для мобильного моста методами строительной механики далее получим основные зависимости, позволяющие оценить пригодность его конкретных исполнений для решения практических задач.

3. Оценка возможности применения мобильного моста для пропуска транспортного средства над искусственным сооружением

Выбор решения мобильного моста включает оценку возможности его применения для пропуска транспортного средства над искусственным сооружением. Рассмотрим порядок определения требуемого строительного подъема $h_{\text{ММ}}$ мобильного моста, наибольших напряжений σ в его элементах, а также характер деформирования мобильного моста при передвижении по нему транспортного средства.

Для упрощения решения указанной задачи примем ряд следующих допущений:

- геометрия мобильного моста имеет такой вид, а строительный подъем такую величину, при которых в результате заезда транспортного средства на середину мобильного моста происходит его (мобильного моста) полное распрямление;
- длина перемещающегося по мобильному мосту транспортного средства больше либо равна его пролету;
- сосредоточенные силы от осей транспортного средства заменены распределенной нагрузкой;
- масса одного метра длины мобильного моста (в продольном направлении) постоянна;
- момент сопротивления поперечного сечения пролетной части мобильного моста одинаков по всей длине;

- сила трения, образующаяся между опорами мобильного моста и основанием, пренебрежимо мала;

- заезд транспортного средства на мобильный мост производится медленно и плавно, факторы, ведущие к асимметрии системы, несущественны;

- оси транспортного средства нагружены одинаково;

- рассматривается самоходное решение транспортного средства.

Из условия полного распрямления мобильного моста под действием номинальной нагрузки его требуемый (минимальный) строительный подъем h_{MM} составит

$$h_{MM} = (q_{TC} + q_{MM}) \frac{5 \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot J_X}, \quad (1)$$

где q_{TC} – распределенная нагрузка на мобильный мост от транспортного средства (определяется как $q_{TC} = F_{OC}/L_{OO}$, где F_{OC} – рабочая нагрузка от одной оси транспортного средства; L_{OO} – межосевое расстояние транспортного средства); q_{MM} – распределенный вес пролетной части мобильного моста; L – пролет мобильного моста; $E \cdot J_X$ – изгибная жесткость пролетной части мобильного моста.

В элементах мобильного моста под нагрузкой уровень напряжений должен находиться в пределах допускаемых значений. От действия изгибающего момента наибольшие напряжения в элементах пролетной части мобильного моста составят

$$\sigma = (q_{TC} + q_{MM}) L^2 / (8 \cdot W) \leq [\sigma], \quad (2)$$

где W – момент сопротивления сечения пролетной части мобильного моста; $[\sigma]$ – допускаемое напряжение в элементах пролетной части мобильного моста.

Величину создаваемого строительного подъема ограничивают технические возможности перемещающегося по нему транспортного средства: при больших значениях строительного подъема ход отдельных осей (их гидравлических подвесок) транспортного средства может выйти за допускаемые пределы и, как следствие, привести к их повреждению либо неконтролируемому повышению нагрузки на других осях. Так, например,

ход гидравлических подвесок транспортного средства *Cometto MSPE Evo2* составляет ± 300 мм, а у *MSPE 40T* – ± 350 мм [7]. По указанной причине ограничивают высоту поперечного сечения мобильных мостов, которая, для примера, в решении компании *Greiner GmbH* равна 500 мм (параметр h на рис. 2) [8].

Под действием собственного веса мобильного моста его строительный подъем несколько уменьшается, а по мере наезда на него транспортного средства величина прогиба будет постепенно возрастать. Действительная высота h_{max} , на которой будет находиться первая ось транспортного средства по мере его продвижения по мобильному мосту, существенно меньше исходного строительного подъема [9] и может быть определена по формуле

$$h_{max} = \frac{q_{TC}}{24EJ_X} \left(\frac{-3a^5}{L} + 8a^4 - 6La^3 + L^3a \right), \quad (3)$$

где a – расстояние (по горизонтали), на которое первая ось транспортного средства продвинулась на мобильный мост.

4. Определение основных параметров решения мобильного моста

Определим основные параметры (по выражениям (1)–(3)) для решения мобильного моста, имеющего следующие характеристики:

- пролет $L=23,4$ м;
- рабочая нагрузка от одной оси транспортного средства $F_{OC} = 33,5$ тс (или 328,6 кН) при межосевом расстоянии $L_{OO} = 1,51$ м;
- момент инерции $J_X = 0,0115$ м⁴ и момент сопротивления $W = 0,0426$ м³ поперечного сечения мобильного моста;
- распределенный вес мобильного моста $q_{MM} = 1,86$ тс/м (или 18,2 кН/м);
- модуль упругости материала моста $E = 2 \cdot 10^5$ МПа.

Согласно (1) и (2) требуемый строительный подъем h_{MM} мобильного моста составит 400 мм, а наибольшие эквивалентные напряжения будут равны 379 МПа. При этом в соответствии с (3) высота h_{max} , на которую предстоит въехать первой оси транспортного средства при его перемещении по мобиль-

ному мосту, в зависимости от a будет меняться так, как показано на рис. 3.

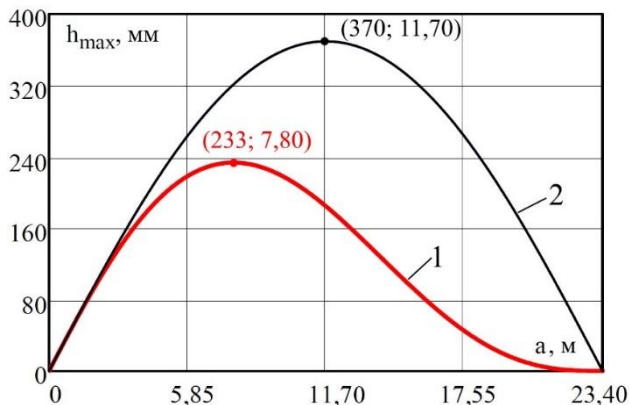


Рис. 3. К оценке влияния частичного заезда транспортного средства (на мобильный мост) на деформацию мобильного моста: 1 – зависимость h_{MM} от a , 2 – кривизна мобильного моста до заезда на него транспортного средства

На рис. 4 дополнительно показано семейство кривых, характеризующих зависимость строительного подъема h_{MM} от нагрузки F_{OC} , полученных в соответствии с выражением (1) для приведенных в примере значений L_{OO} , q_{MM} , E и J_X .

5. Заключение

Анализ представленных на рис. 3 данных показывает, что максимальная высота, на которую предстоит въехать первой оси транспортного средства, равна 233 мм, что меньше хода подвески, несмотря на то, что

первоначальный строительный подъем (после сборки) мобильного моста составлял 370 мм и превышал ход подвески.

Предлагаемые рекомендации позволяют предварительно оценить параметры мобильного моста и возможность его использования для преодоления транспортным средством искусственного сооружения. Окончательное решение о возможности использования мобильного моста следует принимать, опираясь на результаты конечно-элементного анализа, который помимо общих напряжений в поясах пролетных строений позволяет также определить напряжения на участках со сложной геометрией – в соединениях секций пролетного строения, а также согласно требованиям нормативной документации [1, 10].

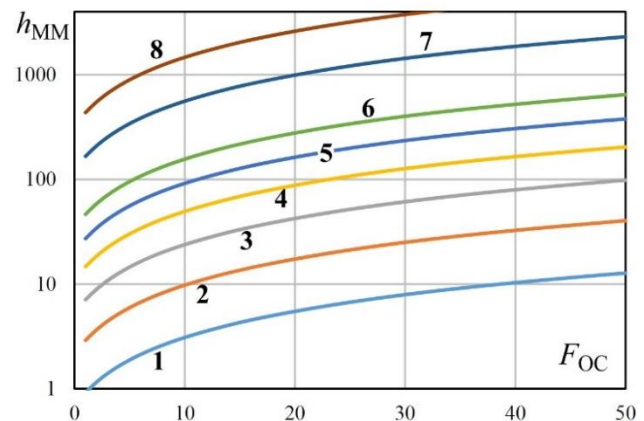


Рис. 4. Зависимость строительного подъема h_{MM} от нагрузки F_{OC} для разных значений пролета L : 1 – 9 м, 2 – 12 м, 3 – 15 м, 4 – 18 м, 5 – 21 м, 6 – 24 м, 7 – 33 м, 8 – 42 м

Список литературы

- СП 35.13330.2011. Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03–84*. Москва. 2011.
- Azrul A.M., Norazman M.N., Muhamad A.Y. Review on rapid portable bridge system: state-of-the-art and technology developments // *Defence S&T Technical Bulletin*. 2017. Vol. 10. No. 3. Pp. 246–257.
- Osman A.M.A. Design Optimization of Composite Deployable Bridge Systems Using Hybrid Meta-Heuristic Methods for Rapid

References

- SP 35.13330.2011. Mosty i truby. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.05.03–84*. Moscow. 2011. (In Russian)
- Azrul A.M., Norazman M.N., Muhamad A.Y. Review on rapid portable bridge system: state-of-the-art and technology developments. *Defence S&T Technical Bulletin*, 2017, Vol. 10, No. 3, pp. 246–257.
- Osman A.M.A. Design Optimization of Composite Deployable Bridge Systems Using Hybrid Meta-Heuristic Methods for Rapid

Post-disaster Mobility. Diss. Doctor of Philosophy (Civil Engineering). Montreal. 2016. 169 p.

4. Томилов С.Н. Влияние монтажных соединений секций разборного моста на его напряженно-деформированное состояние // Интернет-журнал «Транспортные сооружения». 2020. № 2. С. 1–14.

5. Кручинкин А. В. Сборно-разборные временные мосты. М.: Транспорт, 1987. 191 с.

6. Hutchinson H. Sometimes You Have to Plan How to Cross Your Bridges Before You Come to them // Mechanical Engineering. 2006. Vol. 128. No. 4. Pp. 40–42.

DOI: <https://doi.org/10.1115/1.2006-APR-4>

7. MSPE – самоходные модули с электронным управлением // Cometto.com: электронный каталог. 2021. URL: <https://cutt.ly/CbMHP7I> (дата обращения: 18.05.2021).

8. Greiner Überfahrssystem // P Adams: электронный чертеж. 2007. URL: <https://cutt.ly/mbBIRhe> (дата обращения: 18.05.2021).

9. Фесик С.П. Справочник по сопротивлению материалов. Киев: Будівельник, 1982. 281 с.

10. ГОСТ 33169–2014. Краны грузоподъемные. Металлические конструкции. Подтверждение несущей способности. М., 2015. 51 с. (Межгосударственный стандарт).

‡ Post-disaster Mobility. Diss. Doctor of Philosophy (Civil Engineering). Montreal. 2016. 169 p.

‡ 4. Tomilov S.N. Vliyaniye montazhnykh soyedineniy sektsiy razbornogo mosta na yego napryazhenno-deformirovannoye sostoyaniye. *Internet-zhurnal «Transportnyye sooruzheniya»*, 2020, No. 2, pp. 1–14. (In Russian)

‡ 5. Kruchinkin A. V. *Sborno-razbornyye vremennyye mosty* [Collapsible temporary bridges]. Moscow, Transport, 1987. 191 p. (In Russian)

‡ 6. Hutchinson H. Sometimes You Have to Plan How to Cross Your Bridges Before You Come to them. *Mechanical Engineering*, 2006, Vol. 128, No. 04, pp. 40–42. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.2006-APR-4>

‡ 7. MSPE – samokhodnyye moduli s elektronnyim upravleniyem. Cometto.com: Digital catalogue. 2021. URL: <https://cutt.ly/CbMHP7I> (accessed 18 May 2021) (In Russian)

‡ 8. Greiner Überfahrssystem. P Adams: electronic drawing. 2007. URL: <https://cutt.ly/mbBIRhe> (accessed 18 May 2021).

‡ 9. Fesik S.P. *Spravochnik po soprotivleniyu materialov* [Handbook of the resistance of materials]. Kiev: Budivel'nik, 1982. 281 p. (In Russian)

‡ 10. GOST 33169–2014. Krany gruzopodemnyye. Metallicheskiye konstruktsii. Podtverzhdeniye nesushchey sposobnosti. Moscow, 2015. 51 p. (Interstate standard) (In Russian)