

ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС

УДК 624.876.001.24

А. А. ПОДДУБНЫЙ, кандидат физико-математических наук, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель; *В. А. ДАДАЛКО*, доктор экономических наук, действительный член (академик) Академии военных наук РФ, Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, Российская Федерация, г. Москва; *Е. В. ПЕЧЕНЕВ*, магистр технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель.

РАСЧЕТ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ НАПЛАВНОГО БЫСТРОВЗВОДИМОГО МОСТА ГРУЗОПОДЪЕМНОСТЬЮ 500 И 1000 КГ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА

Производится расчет несущей способности элементов пролетных строений наплавного моста с помощью программного комплекса Autodesk Inventor. Рассматриваются и сопоставляются расчетные (смоделированные) данные с результатами натуральных испытаний. Анализируется возможность проведения предварительных испытаний 3D-моделей под заданную нагрузку, а также проектирование новых конструкций быстровозводимых мостов. Проводится мониторинг современного высокоточного оружия для возможного поражения быстровозводимых мостов и экономический анализ его эффективности.

Введение. В настоящее время быстровозводимые сборно-разборные мосты востребованы в различных условиях для реализации многих задач. Быстровозводимые мосты обладают рядом преимуществ, что позволяет применять их всевозможным ведомствам и структурам.

Для повышения скорости развития конструкций быстровозводимых мостов, как на жестких, так и на плавучих опорах, необходимо минимизировать время на проектную и расчетную составляющие и визуализировать полученный результат.

Одной из основных задач при проектировании новых конструкций пролетных строений быстровозводимых мостов является определение несущей способности их основных элементов. При проектировании элементов конструкций быстровозводимых мостов должны выполняться требования концепции данных конструкций: возможность перемещения и строительства (монтажа) пролетных строений без применения тяжелой дорожно-строительной и грузоподъемной техники, низкая материалоемкость с высокой прочностью и долговечностью конструкции, возможность сооружения мостового перехода в труднодоступных участках местности. В зависимости от поставленных задач определяется грузоподъемность пролетных строений и опор.

На сегодня разработаны, введены в эксплуатацию и эффективно применяются несколько типов пролетных строений с плавучими опорами (рисунок 1).

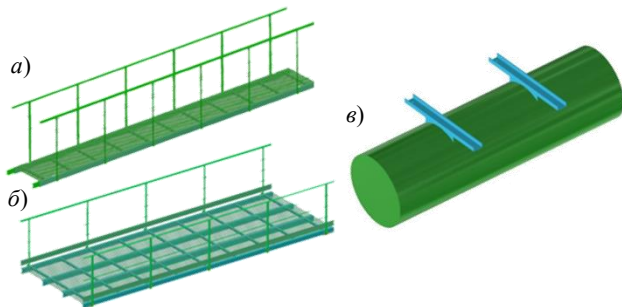


Рисунок 1 – Варианты пролетных строений и наплавной опоры быстровозводимых мостов:
а – пролетное строение СРММП-1; б – пролетное строение СРММП-2; в – наплавная опора МНПМ-1,0

Для расчета несущей способности данных конструкций необходимо определить расчетные параметры основных элементов и произвести расчеты с моделированием заданных нагрузок.

Расчет несущих элементов конструкций моста под нагрузку 500 килограмм.

Приступая к определению расчетных параметров основных элементов конструкций пролетных строений под нагрузку 500 кг, необходимо определить параметры и основные элементы, которыми будут являться: расчетная ширина пролетного строения не менее 1,8 м, длина пролетного строения 6 м, грузоподъемность до 500 кг, высота моста не менее 0,5 м от уровня высоких вод, строительная высота назначается в зависимости от сечения конструктивных элементов.

Основными элементами данного пролетного строения являются главные балки, поперечные связи, настил проезжей части.

Пролетные строения, собранные в единый мост, планируется к постройке на структурно-неустойчивых грунтах. Ввиду этого применена методика определения динамических догрузений стержня при внезапном изменении структуры упругого основания. Разработанная математическая модель процесса позволяет последовательно решить следующие задачи:

- определить статический прогиб и изгибающий момент в балке, опирающейся на упругое основание Пастернака в соответствии с граничными условиями, нагруженной равномерно распределенной нагрузкой заданной интенсивности. Прогиб используется в дальнейшем как начальное условие динамического процесса (колебаний), возникающего после внезапного образования дефекта основания. Изгибающий момент используется для сравнения статических внутренних усилий в балке с динамическими в ходе колебаний;

- определить частоты и формы собственных изгибных колебаний балки, опирающейся на упругое основание Винклера;

- исследовать вынужденные изгибаемые колебания нагруженной балки на основании Винклера путем разложения нагрузки и статического прогиба, полученного еще на основании Пастернака, по формам собственных колебаний балки на основании Винклера.

Таким образом, расчет вынужденных колебаний строится методом модульного разложения исходного состояния и нагрузки по методам нового состояния.

Для анализа перемещений и напряжений в балке при взаимодействии ее с упругим основанием во всех задачах используется метод начальных параметров в сочетании с векторно-матричным представлением состояния произвольных сечений балки.

Таким образом, была рассмотрена структурная перестройка системы «балка – основание», заключающаяся во внезапном преобразовании основания Пастернака в основание Винклера, то есть во внезапной утрате основанием свойства сдвиговой жесткости, и это привело к радикальному преобразованию напряженно-деформированного состояния балки:

- изменилось положение опасного сечения (для всех значений жесткостей опасным становится середина сечения $\xi = 0,5$);

- абсолютные значения изгибающих моментов значительно увеличиваются – при этом большей жесткости системы «балка – основание» соответствует большее относительное приращение динамического изгибающего момента к статическому значению.

Расчет главных балок на прочность

Исходные данные временных и постоянных нагрузок (рисунок 2):

$P = 9,8$ кН – расчетная нагрузка;

$P_0 = P / 2 = 4,9$ кН – давление на одну ось;

$m = 2$ – количество осей квадроцикла;

$a = 1,7$ м – расстояние между осями колес.

Параметры элементов пролетного строения:

$q = 1,09$ кН/м (собственный вес балки $120 \times 80 \times 5$ мм – $0,144$ кН/м; собственный вес балки $100 \times 60 \times 4$ мм – $0,09$ кН/м; пешеходный настил: просечно-вытяжного лист настила ПВЛ 406 – $0,308$ кН/м, из уголков поперечных и продольных связей сечением $40 \times 40 \times 4$ мм – $0,061$ кН/м; снеговая нагрузка – $0,25$ кН/м); $R = 210$ МПа (расчетное сопротивление стали балки при изгибе); $W_x = 30,51$ см³ (момент сопротивления балки $100 \times 60 \times 4$ мм, ГОСТ 30245–2003).

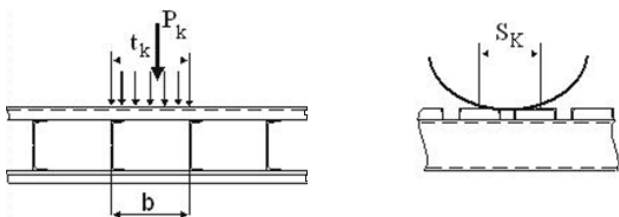


Рисунок 2 – Расчетная схема поперечного металлического настила из швеллеров

Изгибающий момент, кН·м, в одном прогоне

$$M_{пр} = [M_{кр} K_n (1 + \mu) + M_{п}] \frac{1}{n},$$

где $M_{кр}$ – изгибающий момент от расчетной подвижной колесной нагрузки, кНм; $M_{п}$ – изгибающий момент от постоянной нагрузки, кНм; K_n – коэффициент неравномерности в работе прогонов, $K_n = 1,1$; n – количество прогонов в поперечном сечении моста; $1 + \mu$ – динамический коэффициент, принимаемый для металлических прогонов равным $1,15$.

Изгибающий момент в пролетном строении от давления оси квадроцикла при центральном положении нагрузки определяется по формуле

$$M_{вр} = 0,5 P_0 (l - a) = 0,5 \cdot 4,9 (6,0 - 1,7) = 10,54 \text{ кН}.$$

Изгибающий момент, кН·м, от постоянной нагрузки определяется по формуле

$$M_{п} = \frac{q l^2}{8} = \frac{1,09 \cdot 6,0^2}{8} = 4,91 \text{ кН} \cdot \text{м},$$

где q – равномерно распределенная вертикальная нагрузка от собственной массы пролетного строения по спецификации и снега, кН/м; l – расчетный пролет прогонов, м.

$$M_{пр} = (10,84 \cdot 1,1 \cdot 1,15 + 4,91) \cdot \frac{1}{4} = 4,66 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Определение максимального нормального напряжения:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{пр}}{W_{пр}} = \frac{4,66 \cdot 10^3}{30,51 \cdot 10^{-6}} = 153 \text{ МПа}.$$

Проверка условия:

$$\sigma_{\max} \leq mR, \text{ МПа}.$$

Для строительных конструкций используются соответствующие расчетные сопротивления ($R = 210$ МПа); m – коэффициент условий работы, $m = 0,9$.

$$153 \text{ МПа} \leq 0,9 \cdot 210 \text{ МПа};$$

$$153 \text{ МПа} \leq 190 \text{ МПа} \text{ – условие выполняется.}$$

Условия прочности выполняются. Запас прочности составляет 19 %.

Расчет главных балок на изгиб

Далее будет проведен расчет пролетного строения, см, по второму предельному состоянию с использованием следующей формулы:

$$f = \frac{5}{384} \frac{P l^4}{EI_{бр}} \leq f_{пр},$$

где f – упругий прогиб в середине пролета; P – динамическая нагрузка, кН/м; E – модуль упругости стали, $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа; $I_{бр}$ – момент инерции сечения одной балки относительно нейтральной оси (брутто), м⁴; n – количество балок в пролетном сечении, шт.; $f_{пр}$ – предельный вертикальный прогиб;

$$f = \frac{5}{384} \frac{1,63 \cdot 10^3 \cdot 6^4}{2,1 \cdot 10^5 \cdot 1,525 \cdot 10^{-6} \cdot 4} = 2,16 \text{ см};$$

$$f_{пр} = \frac{1}{200} l = \frac{1}{200} \cdot 600 = 3,0 \text{ см}.$$

В технической документации представлены общие положения по конструктивным особенностям, изготовлению и сборке пролетного строения. Полученные значения подтверждают использование профильной трубы сечением не ниже $100 \times 60 \times 4$ мм в качестве главных балок.

Также были проведены расчеты пролетных строений как рамных конструкций с использованием компьютерной программы Autodesk Inventor.

Расчетная схема наплавного моста и нагрузки, действующие на понтон.

Наплавные мосты в целом и их отдельные конструктивные элементы рассчитывают по первому предельному состоянию на прочность, устойчивость формы и положения с учетом:

- 1) коэффициента надежности f – для постоянных нагрузок;
- 2) коэффициента надежности f и динамического $1+\mu$ – для временной подвижной вертикальной нагрузки. Остойчивость, под которой понимается способность плавсредства удерживать равновесие на воде и не опрокидываться под воздействием внешних нагрузок. В расчетах остойчивости, плавучести (осадки, крена, дифферента, излома профиля пути), а также гидродинамической устойчивости рекомендуется учитывать только нормативные нагрузки без коэффициентов перегрузки и динамики.

Нормативные постоянные нагрузки от собственного веса конструкций наплавного моста принимают по рабочим чертежами и спецификациям для элементов индивидуального проектирования. Постоянные нагрузки считают равномерно распределенными по длине моста.

Интенсивность ветровой поперечной нагрузки на конструкции моста, находящиеся над водой, принимают равной 0,35 кПа, что соответствует скорости ветра 16–18 м/с. Расчетную ветровую поверхность подсчитывают по фактической площади конструкций в проекции на вертикальную плоскость, перпендикулярную направлению ветра с коэффициентом сплошности, равным 1,0.

Наплавной мост проектируется в определенной последовательности и с учетом следующих данных:

- 1) исходные экономические и гидрометрические данные мостового перехода;
- 2) схема моста, применяемые конструкции и плавучие средства;
- 3) поперечное сечение, нагрузки и коэффициенты;
- 4) внутренне усилия и опорные реакции от различных сочетаний нагрузок;
- 5) остойчивость и плавучесть опор;
- 6) общая прочность плавучих опор и пролетных строений;
- 7) местная прочность и устойчивость конструкций, узлов, деталей, соединений;
- 8) поперечные и продольные закрепления наплавных мостов;
- 9) гидродинамическая устойчивость мостов при больших скоростях течения воды;
- 10) способы наводки-разводки мостов.

Остойчивость, плавучесть и прочность конструкций проверяют на всех стадиях эксплуатации моста при совместном действии постоянных и временных нагрузок, давления воды и ветра при их реальных невыгодных сочетаниях.

Плавучесть для разработанной конструкции можно определить, зная его геометрические и физические показатели. Под геометрическими параметрами подразумевается сечение основных элементов и пустот внутри понтона, а физическим параметрам относится удельный вес металла конструкции.

Общая грузоподъемность понтона МНПМ-1,0, т, определяется как выталкивающая сила и может быть вычислена по формуле

$$F_{\text{понт}} = \rho V_{\text{понт}} - G_{\text{понт}},$$

где ρ – плотность воды пресного водоема ($\rho = 1,0$), т/м³;
 $V_{\text{понт}}$ – объем водоизмещения понтона ($V_{\text{понт}} = 0,894$), м³,

$$V_{\text{понт}} = LBt_{\text{груз}}\delta,$$

L – полная длина понтона, принята 2,5 м; B – максимальная ширина понтона, принята 0,7 м; $t_{\text{груз}}$ – наибольшая грузовая осадка ($t_{\text{груз}} = 0,63$), м; δ – коэффициент полноты водоизмещения, для цилиндрической формы понтона принят равным 0,73; $G_{\text{понт}}$ – масса понтона ($G_{\text{понт}} = 0,268$), т;

Тогда

$$V_{\text{понт}} = 2,5 \cdot 0,72 \cdot 0,63 \cdot 0,73 = 0,828 \text{ м}^3;$$

$$F_{\text{понт}} = 1,0 \cdot 0,828 - 0,268 = 0,56 \text{ т.}$$

Учитывая, что на понтон опираются два пролетных строения полной длиной 8,4 м и массой 250 кг, то величину расчетной осадки, см, можно вычислить по следующей формуле:

$$t_{\text{расч}} = \frac{G_{\text{понт}} + G_{\text{пс}}}{LB\delta},$$

тогда

$$t_{\text{расч}} = \frac{268 + 250}{25 \cdot 7,2 \cdot 0,73} \cdot 10 = 39,4 \text{ см.}$$

Таким образом, расчетная осадка порожнего участка наплавного моста в составе одного понтона и двух пролетных строений составляет 39,4 см.

Расчетная грузоподъемность цилиндрического понтона под пешеходную нагрузку без учета полумассы опираемых пролетных строений составляет 310 кг при ограничивающей грузовой осадке, не превышающей 0,63 м (рисунок 3).

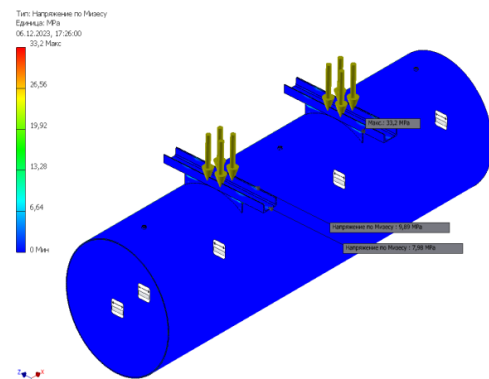


Рисунок 3 – Результаты расчета элементов под нагрузкой методом конечных элементов

Анализ современного высокоточного оружия для возможного поражения быстровозводимых мостовых переходов.

В современных вооруженных конфликтах всё чаще применяется высокоточное оружие, которое может поражать цели на большом расстоянии и с высокой точностью. Это позволяет одним боеприпасом поразить необходимую цель в том числе транспортные коммуникации (рисунок 4). Защита от такого вооружения становится всё сложнее, и необходимость применения противовоздушных средств оправдана.



Рисунок 4 – Примеры современного высокоточного вооружения:

а – Storm Shadow; б – сменный пакет 227 мм ракет MFOM и тактическая ракета MGM-140 ATACMS PC30 M142 HIMARS

Однако экономический анализ позволяет выявить, что сопоставление стоимости высокоточных боеприпасов и объектов быстровозводимых мостов показывают большую разницу.

В таблице 1 представлена стоимость современных средств поражения (стоимость взята из открытых источников).

Таблица 1 – Стоимость современных ВТО

Наименование ВТО	Стоимость, млн дол.
ATACMS Block I	2,3
ATACMS Block IA	
ATACMS Block IA Unitary	
Storm Shadow	3,2
X-47 «Кинжал»	5
ОКР «Калибр»	0,35-0,5
BGM-109 Tomahawk	1,87
AGM-158 JASSM	1,5
AGM-158C LRASM	1

Данные таблицы 1 показывают, что стоимость высокоточного вооружения высока. С учетом того в расчет не была взята стоимость средств доставки, обслуживания, систем наведения и так далее, можно утвер-

Получено 14.02.2024

A. A. Poddubny, V. A. Dadalco, E. V. Pechanov. Calculation of the load capacity of elements of a flooded quickly recoverable bridge with a load capacity of 500 and 1000 kg using a software complex.

The load-bearing capacity of the floating bridge span elements is calculated using the Autodesk Inventor software package. The calculated (modeled) data are reviewed and compared with the results of full-scale tests. The possibility of conducting preliminary tests of 3D models for a given load, as well as the design of new designs of prefabricated bridges, is analyzed. Monitoring of modern high-precision weapons for the possible destruction of prefabricated bridges and an economic analysis of their effectiveness are carried out.

ждать, что поражение данными средствами быстровозводимых сборно-разборных мостов экономически невыгодно.

В таблице 2 представлена стоимость пролетных строений основных быстровозводимых мостов.

Таблица 2 – Стоимость элементов быстровозводимых мостов

Элемент быстровозводимого моста	Стоимость, бел. руб. (дол.)
1 м. п. СРММП-1 с опорами	469,41 (144,43)
1 м. п. СРММП-2 с опорами	613,34 (188,72)
1 наплавная опора МНПМ-1,0	2056,73 (632,84)

Вывод. Проанализировав стоимость современного высокоточного вооружения и быстровозводимых сборно-разборных мостов, можно сделать заключение, что уничтожение мостов с помощью данного вооружения экономически нецелесообразно. При разрушении секции или даже моста полностью темпы его восстановления и стоимость элементов моста (его ремонта) несопоставимы с затратами на их уничтожение.

Список литературы

1 **Поддубный, А. А.** Особенности применения сборно-разборных быстровозводимых мостов / А. А. Поддубный, И. С. Демидович // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2023. – № 1 (46). – С. 39–41.

2 **Poddubny, A. A.** Dynamic Loading of the Rod at a Sudden of Elastic Foundation Structure / A. A. Poddubny, V. A. Gordon // IOP Conference Series: Material Science and Engineering. – 2021. – Vol. 1079. – P. 1–18.

3 Added stress of a cantilever under sudden alterations in its foundation / A. A. Poddubny [et al.] // AIP Conference Proceedings. – 2023. – Vol. 2497, is. 1. – P. 1–10.

4 **Поддубный, А. А.** Концепция интеллектуальной системы поддержки принятия решений по восстановлению мостовых переходов / А. А. Поддубный, Е. В. Печанев // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2023. – № 1 (46). – С. 42–44.

5 Мосты и переправы на военно-автомобильных дорогах. В 3 ч. Ч. 2, М84 Низководные мосты из местных материалов : учеб. пособие / С. М. Бобрицкий [и др.]. – Гомель : БелГУТ. – 271 с.