

УДК 624.6

О. А. Тарабукина, Ю. Я. Тюкалов

ПРИМЕНЕНИЕ ПЛАСТИКОВЫХ ТРУБ ДЛЯ АРОЧНЫХ МОСТОВ

В статье рассматривается возможность применения пластиковых труб для арочных грунтозасыпных мостов малых пролётов по технологии «Bridge-in-a-Backpack», представляющая собой быстровозводимый бетонно-композитный мост. Конструкция такого моста состоит из композитных арок, заполняемых бетоном на месте строительства. В качестве альтернативного варианта арочных композитных элементов предлагаются напорные трубы для наружной системы водоснабжения из непластифицированного поливинилхлорида, которые выступают в качестве несъёмной опалубки и защитного слоя бетона. НПВХ, по сравнению с композитными материалами, более дешёвый и распространённый материал. В работе приводится расчёт труб на прочность при действии собственного веса арочного элемента. Полученные результаты говорят о возможности применения труб из НПВХ для арочных мостов малого пролёта. Материал статьи может быть полезен специалистам в области дорожно-мостового строительства.

Ключевые слова: арочный мост, бетонно-композитный мост, пластиковая труба.

В настоящий момент отрасль дорожно-мостового строительства находится в неудовлетворительном состоянии, многие сооружения практически выработали свой ресурс и продолжают эксплуатироваться за счёт заложенного в них запаса прочности. Для улучшения положения необходимо разрабатывать и использовать новые, современные материалы и технологии мостостроения.

Одной из них является технология «Bridge-in-a-Backpack», представляющая собой быстровозводимый бетонно-композитный мост, конструкция которого состоит из композитных арок, заполняемых бетоном на месте строительства (рисунок 1). Эта технология разработана американской компанией Advanced Infrastructure Technologies Inc. и Центра Продвинутой Конструкций и Композитов

университета штата Мэн [1]. Технология «мост в рюкзаке» рассматривается в ряде работ [5, 6, 7, 8, 9].

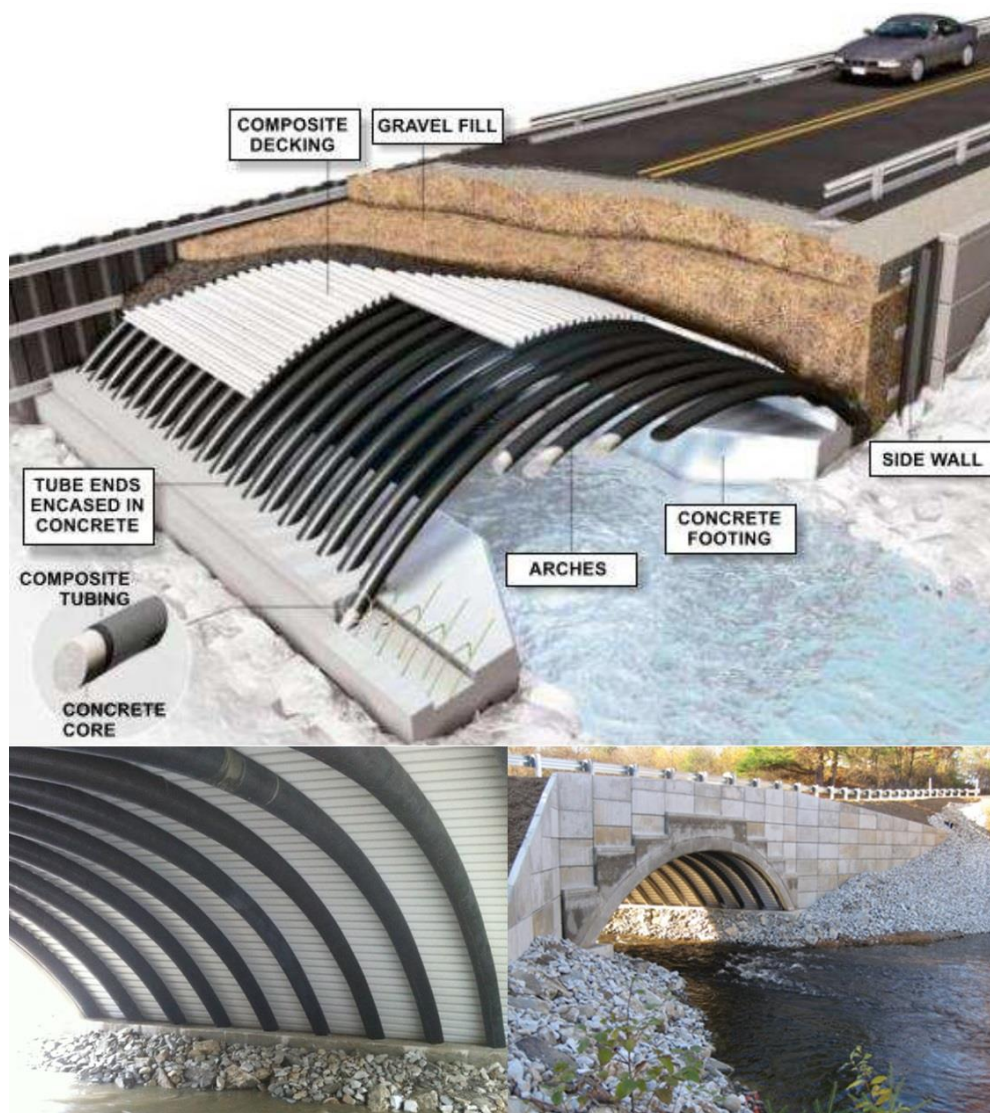


Рис. 1. Технология «Bridge-in-a-Backpack» [1]

Преимущества технологии строительства бетонно-композитного моста [1]:

- малые сроки строительства (6–12 дней);
- низкая стоимость по сравнению с железобетонным (на 7,6%) и металлическим (на 137,8%) мостом (рисунок 2) [2];
- минимальные эксплуатационные затраты, связанные с отсутствием металла и, как следствие, коррозии;

- длительный срок эксплуатации моста (более чем 100 лет);
- малый вес арочных элементов (не требуется применение специальной техники при монтаже).

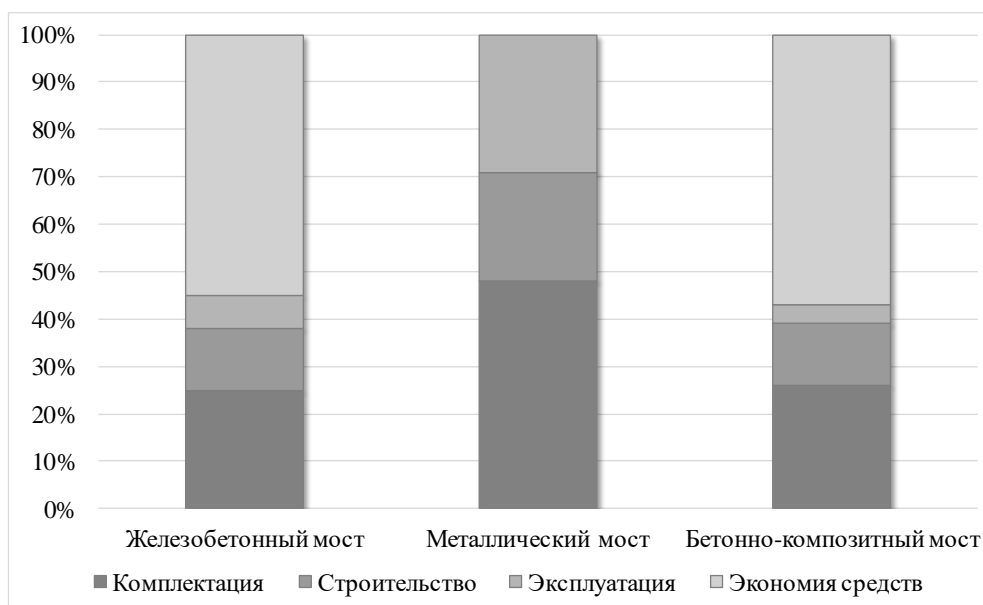


Рис. 2. Сравнение строительства и эксплуатации мостов за жизненный цикл (20 лет) [2]

Основной недостаток бетонно-композитных мостов – высокая стоимость композитных материалов. Кроме того, как отмечают авторы статьи [4]: «Арочные элементы мостового сооружения из полимерного композиционного материала (ПКМ) сложны в изготовлении и при их производстве могут возникнуть дефекты: зоны недопротитки смолой при изготовлении арок, зоны повышенной пористости, расслоения и другие нарушения сплошности материала».

В качестве альтернативного варианта арочных композитных элементов можно использовать напорные трубы для наружной системы водоснабжения из непластифицированного поливинилхлорида (НПВХ) диаметром от 110 до 500 мм [10]. Модуль упругости таких труб 3000 МПа, предел текучести при растяжении 50–56 МПа, предел прочности при разрыве 30–50 МПа [3, 10].

Пластиковая труба выступает в качестве несъемной опалубки и защитного слоя бетона. Высокая коррозионная устойчивость трубы позволит уменьшить эксплуатационные расходы. Дефекты, характерные для ПКМ, в пластиковых

трубах отсутствуют. НПВХ, по сравнению с композитными материалами, более дешёвый и распространённый материал.

Срок службы пластиковой трубы и железобетона составляет 50 лет. Таким образом, долговечность арочного моста из пластиковых труб, заполненных бетоном, может составить 100 лет.

Для оценки способности трубы из НПВХ выдерживать нагрузку от собственного веса и веса бетона на время его твердения, проведём расчёт прочности трубы из условия

$$\sigma_{max} = \sigma_{сж} \pm \sigma_{изг} = \frac{N}{A} \pm \frac{M}{W} = \frac{N}{\frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2) \cdot 1000} \pm \frac{M \cdot D}{2 \cdot I_{пвх} \cdot 1000} \leq [\sigma],$$

где $\sigma_{сж}$ – напряжение сжатия, МПа;

$\sigma_{изг}$ – напряжение изгиба, МПа;

N – продольная сжимающая сила, кН;

A – площадь поперечного сечения трубы, м²;

M – изгибающий момент, кН·м;

W – момент сопротивления сечения, м³;

D – внешний диаметр трубы, м;

d – внутренний диаметр трубы, м;

$I_{пвх}$ – осевой момент инерции сечения, м⁴, определяемый по формуле

$$I_{пвх} = \frac{\pi \cdot D^4}{64} \cdot (1 - \alpha^4) = \frac{\pi \cdot D^4}{64} \cdot \left(1 - \left(\frac{d}{D}\right)^4\right),$$

где α – соотношение внутреннего и наружного диаметров труб друг к другу;

$[\sigma]$ – предельно допустимое напряжение в трубе из НПВХ [3, 10].

Расчёт производится с помощью ПК ЛИРА-САПР методом конечных элементов для труб из сортамента [10]. Арка по длине разделяется на конечные элементы, длина которых не превышает 0,3 м. Задаётся нагрузка от собственного веса железобетона и учитывается собственный вес поливинилхлоридной трубы

плотностью $R_0 = 1410 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ [10]. Анализируются максимальные усилия в трёх точках (рисунок 3). Характеристики рассчитанных арок приведены в таблице 1. Результаты расчёта представлены в таблице 2.

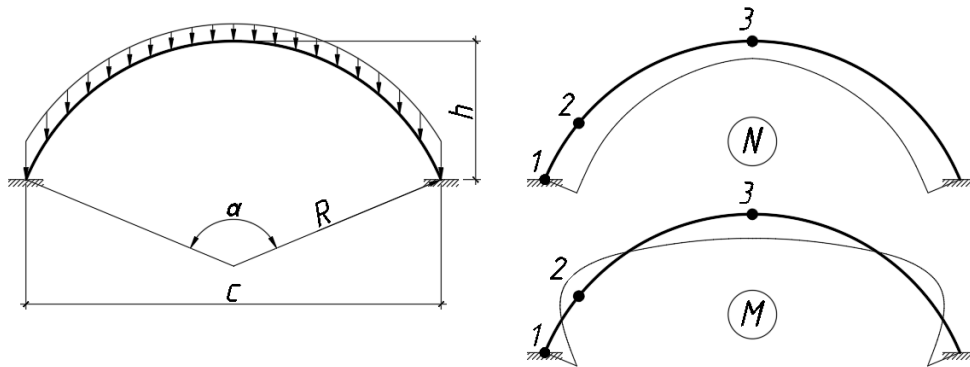


Рис. 3. Расчётная схема арки и эпюры внутренних усилий

Таблица 1

Параметры арки

| Параметры арки | Пролёт c , м | | | |
|---|----------------|--------|--------|--------|
| | 6 | 8 | 12 | 18 |
| Длина дуги l , м | 7,64 | 10,73 | 15,29 | 22,93 |
| Радиус дуги R , м | 3,25 | 4,17 | 6,50 | 9,75 |
| Высота подъёма h , м | 2 | 3 | 4 | 6 |
| Центральный угол α , ° | 134,76 | 147,48 | 134,76 | 134,76 |
| Отношение h/c | 1/3 | 1/2,67 | 1/3 | 1/3 |
| Количество конечных элементов | 30 | 42 | 60 | 90 |
| Максимально допустимые вертикальные перемещения, мм | 40 | 53,3 | 80 | 120 |

Таблица 2

Результаты расчёта

| D , мм | t , мм | d , мм | Собств. вес ж/б., кН/м | Точка | N , кН | M , кН · м | σ_{max} , МПа | Перемещ. по X , мм | Перемещ. по Z , мм |
|----------|----------|----------|------------------------|-------|----------|--------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|----------|----------|----------|------------------------|-------|----------|--------------|----------------------|----------------------|----------------------|

Технические науки

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|-------------------|------|-------|-------|---|---------|--------|---------------|---------|---------|
| Пролёт 6 м | | | | | | | | | |
| 110 | 2,7 | 107,3 | 0,222 | 1 | -1,041 | 0,080 | 8,729 | – | – |
| | | | | 2 | -0,829 | -0,038 | 4,872 | -7,150 | 3,661 |
| | | | | 3 | -0,591 | 0,032 | 3,871 | – | -16,835 |
| 160 | 4,0 | 156,0 | 0,469 | 1 | -2,198 | 0,163 | 6,423 | – | – |
| | | | | 2 | -1,749 | -0,082 | 3,879 | -3,213 | 1,071 |
| | | | | 3 | -1,244 | 0,072 | 3,112 | – | -9,562 |
| 225 | 5,5 | 219,5 | 0,928 | 1 | -4,338 | 0,297 | 5,077 | – | – |
| | | | | 2 | -3,445 | -0,167 | 3,379 | -1,561 | -0,044 |
| | | | | 3 | -2,440 | 0,157 | 2,760 | – | -6,608 |
| 315 | 7,7 | 307,3 | 1,818 | 1 | -8,468 | 0,486 | 3,931 | – | – |
| | | | | 2 | -6,698 | -0,345 | 2,973 | -0,702 | -0,608 |
| | | | | 3 | -4,708 | 0,359 | 2,492 | – | -4,997 |
| 400 | 9,8 | 390,2 | 2,932 | 1 | -13,597 | 0,596 | 3,240 | – | – |
| | | | | 2 | -10,705 | -0,593 | 2,759 | -0,365 | -0,822 |
| | | | | 3 | -7,449 | 0,680 | 2,371 | – | -4,326 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 500 | 12,3 | 487,7 | 4,580 | 1 | -21,105 | 0,509 | 2,649 | – | – |
| | | | | 2 | -16,504 | -1,006 | 2,594 | -0,171 | -0,935 |
| | | | | 3 | -11,313 | 1,289 | 2,293 | – | -3,889 |
| Пролёт 8 м | | | | | | | | | |
| 110 | 2,7 | 107,3 | 0,222 | 1 | -1,389 | 0,196 | 18,866 | – | – |
| | | | | 2 | -1,090 | -0,087 | 9,402 | -36,065 | 17,520 |
| | | | | 3 | -0,722 | 0,075 | 7,632 | – | -68,565 |
| 160 | 4,0 | 156,0 | 0,469 | 1 | -2,936 | 0,408 | 13,492 | – | – |
| | | | | 2 | -2,302 | -0,184 | 7,070 | -16,541 | 7,043 |
| | | | | 3 | -1,524 | 0,162 | 5,718 | – | -34,729 |
| 225 | 5,5 | 219,5 | 0,928 | 1 | -5,803 | 0,786 | 10,480 | – | – |
| | | | | 2 | -4,546 | -0,369 | 5,869 | -8,364 | 2,600 |
| | | | | 3 | -3,003 | 0,331 | 4,704 | – | -20,734 |
| 315 | 7,7 | 307,3 | 1,818 | 1 | -11,356 | 1,463 | 8,076 | – | – |
| | | | | 2 | -8,881 | -0,737 | 4,908 | -4,087 | 0,302 |

Технические науки

| | | | | | | | | | |
|--------------------|------|-------|-------|---|---------|--------|---------------|----------|-----------|
| | | | | 3 | -5,843 | 0,690 | 3,938 | – | -13,320 |
| 400 | 9,8 | 390,2 | 2,932 | 1 | -18,291 | 2,207 | 6,726 | – | – |
| | | | | 2 | -14,274 | -1,219 | 4,401 | -2,394 | -0,601 |
| | | | | 3 | -9,345 | 1,196 | 3,552 | – | -10,352 |
| 500 | 12,3 | 487,7 | 4,580 | 1 | -28,519 | 3,098 | 5,651 | – | – |
| | | | | 2 | -22,186 | -1,973 | 4,021 | -1,402 | -1,121 |
| | | | | 3 | -14,419 | 2,060 | 3,281 | – | -8,565 |
| Пролёт 12 м | | | | | | | | | |
| 110 | 2,7 | 107,3 | 0,222 | 1 | -2,077 | 0,336 | 31,681 | – | – |
| | | | | 2 | -1,622 | -0,147 | 15,409 | -117,574 | 73,482 |
| | | | | 3 | -1,187 | 0,128 | 12,928 | – | -228,822 |
| 160 | 4,0 | 156,0 | 0,469 | 1 | -4,388 | 0,703 | 22,572 | – | – |
| | | | | 2 | -3,427 | -0,312 | 11,508 | -54,042 | 31,255 |
| | | | | 3 | -2,505 | 0,275 | 9,624 | – | -113,210 |
| 225 | 5,5 | 219,5 | 0,928 | 1 | -8,673 | 1,364 | 17,458 | – | – |
| | | | | 2 | -6,769 | -0,620 | 9,408 | -27,438 | 13,431 |
| | | | | 3 | -4,944 | 0,557 | 7,860 | – | -65,240 |
| 315 | 7,7 | 307,3 | 1,818 | 1 | -16,977 | 2,574 | 13,411 | – | – |
| | | | | 2 | -13,235 | -1,227 | 7,759 | -13,515 | 4,166 |
| | | | | 3 | -9,649 | 1,143 | 6,516 | – | -39,923 |
| 400 | 9,8 | 390,2 | 2,932 | 1 | -27,351 | 3,956 | 11,163 | – | – |
| | | | | 2 | -21,291 | -2,004 | 6,877 | -8,000 | 0,511 |
| | | | | 3 | -15,487 | 1,949 | 5,830 | – | -29,831 |
| 500 | 12,3 | 487,7 | 4,580 | 1 | -42,659 | 5,731 | 9,396 | – | – |
| | | | | 2 | -33,138 | -3,186 | 6,211 | -4,760 | -1,614 |
| | | | | 3 | -24,022 | 3,286 | 5,341 | – | -23,812 |
| Пролёт 18 м | | | | | | | | | |
| 110 | 2,7 | 107,3 | 0,222 | 1 | -3,112 | 0,761 | 68,299 | – | – |
| | | | | 2 | -2,447 | -0,330 | 31,999 | -598,712 | 388,361 |
| | | | | 3 | -1,781 | 0,287 | 27,076 | 0,169 | -1119,120 |
| 160 | 4,0 | 156,0 | 0,469 | 1 | -6,576 | 1,602 | 47,988 | – | – |
| | | | | 2 | -5,171 | -0,698 | 23,231 | -276,676 | 173,946 |
| | | | | 3 | -3,764 | 0,611 | 19,568 | 0,164 | -535,093 |

Технические науки

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|------------|------|-------|-------|---|---------|--------|---------------|----------|----------|
| 225 | 5,5 | 219,5 | 0,928 | 1 | -13,002 | 3,143 | 36,592 | – | – |
| | | | | 2 | -10,220 | -1,385 | 18,463 | -141,900 | 83,897 |
| | | | | 3 | -7,435 | 1,221 | 15,457 | 0,167 | -291,687 |
| 315 | 7,7 | 307,3 | 1,818 | 1 | -25,461 | 6,058 | 27,712 | – | – |
| | | | | 2 | -20,004 | -2,726 | 14,741 | -71,320 | 36,872 |
| | | | | 3 | -14,541 | 2,445 | 12,318 | 0,166 | -163,775 |
| 400 | 9,8 | 390,2 | 2,932 | 1 | -41,045 | 9,574 | 22,880 | – | – |
| | | | | 2 | -32,227 | -4,424 | 12,753 | -43,340 | 18,255 |
| | | | | 3 | -23,403 | 4,049 | 10,670 | 0,165 | -112,968 |
| 500 | 12,3 | 487,7 | 4,580 | 1 | -64,077 | 14,503 | 19,178 | – | – |
| | | | | 2 | -50,263 | -6,975 | 11,262 | -26,872 | 7,337 |
| | | | | 3 | -36,445 | 6,570 | 9,465 | 0,164 | -82,918 |

Анализируя результаты расчёта, можно сделать вывод о том, что применение труб из НПВХ для арочных элементов мостов малых пролётов возможно. С точки зрения действующих напряжений в трубе σ , в качестве несъёмной опалубки подходят трубы всех пролётов, за исключением пролёта 18 м и диаметра трубы 110 мм. С другой стороны, перемещения труб некоторых пролётов превышают предельно допустимые значения. Эту проблему можно решить, используя строительный подъём при производстве труб, а также всевозможные подпорные конструкции на время твердения бетона. В дальнейшем, предполагается рассмотреть работу арок такой конструкции под нагрузкой и определить рациональные очертания арочных элементов при различных толщинах засыпки грунтом.

Список литературы

1. Carbon Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composite Tubes «Bridge-in-a-Backpack». Advanced Infrastructure Technologies. URL: <http://www.aitbridges.com> (дата обращения: 20.10.2016).
2. Бетонно-композитный арочный мост: пояснительная записка ООО «Новый проект». URL: <http://newchallenge.ru> (дата обращения: 29.01.2017).

3. Ведомственные строительные нормы по проектированию и монтажу подземных сетей канализации и водопровода из поливинилхлоридных труб: ВСН 20-95. Введ. 1995-07-01. URL: <http://vsn.ru/vsn/full/80>.

4. *Мурашов В. В., Слюсарев М. В., Евдокимов А. А.* Контроль качества оболочек арочных элементов надземных частей опор быстровозводимых мостовых сооружений из ПКМ // Труды ВИАМ. 2016. № 7 (43). С. 84–97.

5. О проблеме расчета трубобетонных конструкций с оболочкой из разных материалов. Часть 5. Опыт применения трубобетонных арок и гибридных конструкций с оболочкой из полимерных композиционных материалов / И. И. Овчинников [и др.] // Наукоедение: интернет-журнал. 2016. № 1. URL: <http://naukovedenie.ru> (дата обращения: 21.10.2016).

6. Применение заполненных бетоном трубчатых конструкций из фиброармированных пластиков в транспортном строительстве. Ч. 1. Исследование применимости фибропластиков для создания арочной мостовой конструкции / И. Г. Овчинников [и др.] // Наукоедение: интернет-журнал. 2014. № 4 (23). URL: <http://naukovedenie.ru> (дата обращения: 21.10.2016).

7. Применение заполненных бетоном трубчатых конструкций из фиброармированных пластиков в транспортном строительстве. Ч. 2. Отечественные исследования заполненных бетоном фибропластиковых арок и технология сооружения мостов с применением фибропластиковых арок / И. Г. Овчинников [и др.] // Наукоедение: интернет-журнал. 2014. № 4 (23). URL: <http://naukovedenie.ru> (дата обращения: 21.10.2016).

8. *Сарвас А. С., Кобаев А. А.* Бетонно-композитный арочный мост «мост в рюкзаке» // Транспортные системы Сибири. Развитие транспортной системы как катализатор роста экономики государства: сб. тр. науч.-практич. конф. Красноярск: СФУ, 2016. Ч. 1. С. 244–246.

9. Строительство бетонно-композитных мостов / И. А. Коротков [и др.] // Труды ВИАМ. 2015. № 1. URL: http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=763 (дата обращения: 21.10.2016).

10. Трубные системы. Трубы НПВХ: технические характеристики. URL: <http://trub-sys.ru/catalog/4> (дата обращения: 22.10.2016).

ТАРАБУКИНА Ольга Алексеевна – магистрант, Вятский государственный университет. 610000, г. Киров, ул. Московская, 36.

E-mail: tarabukinaoa@mail.ru

ТЮКАЛОВ Юрий Яковлевич – доктор технических наук, профессор кафедры строительных конструкций и машин, Вятский государственный университет. 610000, г. Киров, ул. Московская, 36.

E-mail: yutvgu@mail.ru