

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ СВАЙ

Евгений Сергеевич Михалдыкин,
Главный инженер по строительству, emihaldikin@niigrafit.org
АО «НИИГрафит», предприятие Госкорпорации «Росатом»

Развитие направления исследований применения композитных материалов в фундаментах началось приблизительно в начале 90-х годов. Одними из пионеров этого направления стали США. Откуда такой интерес к новым материалам? Дело в том, что в первую очередь исследования были ориентированы на замену традиционных материалов для морских сооружений. Существуют данные, что ежегодно износ существующих свайных фундаментов у морских сооружений и связанные с этим мероприятия обходятся США в 1 млрд. долларов [14]. Поэтому первыми опытными объектами применения полимерных свай стали именно морские сооружения – пирсы, причальные стенки и другое.

В первую очередь, необходимо определиться с понятием «Полимерные сваи», и что к ним относится. На сегодняшний день известен только один нормативный документ, распространяющийся на применение полимерных материалов в свайных фундаментах – это ASTM D7258 – 14 «Standard Specification for Polymeric Piles». В соответствии с этим документом к полимерным сваям могут быть отнесены конструкции, выполняющие одно из двух условий:

- 1) полимерные материалы в их составе необходимы для обеспечения жесткости и прочности, т.е. другими словами они оказывают значительный вклад в несущую способность сваи по материалу;
- 2) более 50% сваи по массе или объему изготовлены из полимерного материала.

В документе так же приведена классификация полимерных свай. Условно их можно разделить на следующие типы:

- I. состоящие полностью из полимерных материалов;
- II. полимерные сваи с армирующим наполнителем в виде рубленых или непрерывных волокон (*видимо, в том числе полимерных*) или минералов;
- III. полимерные сваи с армированием в виде металлических арматурных стержней, каркасов и профилей;
- IV. полимерные сваи с армированием в виде неметаллических стержней и каркасов;
- V. полимерная композитная труба с бетонным сердечником;
- VI. все прочие виды свай, выполняющие условия приведенного выше определения.

Информацию об исследованиях или опыте применения I типа свай найти не удалось. Относительно II типа свай, известно как минимум предложение компании Trimax of Long Island. Их свая представляла собой конструкцию круглого сечения из полиэтилена низкого давления (ПНД), армированного фиброй из стекловолокна [14]. Кроме того, условно к сваям, армированным минералами, можно отнести получаемые смешиванием (или прокачкой, скорее всего с предварительным промывом) щебня (гравеля) с пенообразующими смолами POLY-MOR (*poly-mor.ca*) (рисунок 1).



Рисунок 1 - Пример конструкции, полученной смешиванием пенообразующих смол PLY-MOR с гравелем.

Что касается свай III и IV типов, предложения по их применению встречаются гораздо чаще.

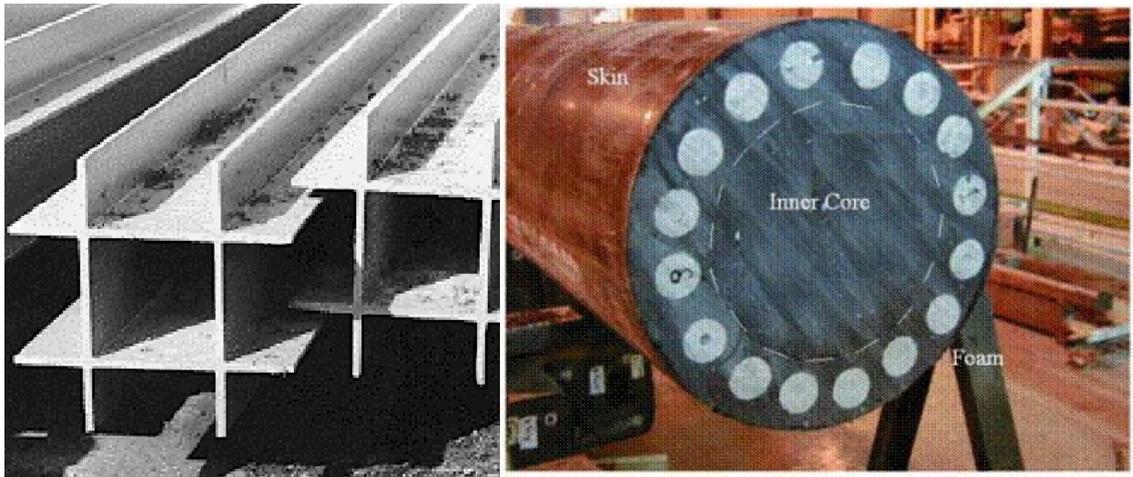
В качестве полимерной матрицы в подобных сваях применяются термопластичные смолы, чаще всего ПНД. Встречающиеся типы армирования:

- стальными арматурными стержнями;
- стальными арматурными стержнями и спиралью;
- стальным прокатом (обычно двутавровым);
- стальная труба, заполненная полимером.

Исследования полимерных свай 3 и 4 типов проводились, в частности, в рамках программы SPAR (Construction Productivity Advancement Research). В рамках этой программы участвовали различные производители и предлагали свои варианты конструкции полимерных свай, которые испытывались и исследовались. Изначально программа создавалась с целью найти применение строительным материалам, изготовленным из вторсырья. Позже была поставлена новая цель – помочь производителям эффективных решений в продвижении их продукции. Краткое описание предложений приведено в таблице 1, а иллюстрация некоторых из них приведена на рисунке 2 (источник [14]).

Таблица 1 - Производители и их конструкции, участвовавшие в программе SPAR.

№	Производитель	Описание конструкции свай
1	Creative Pultrusions, Inc.	Стеклопластиковые профили с сечением «решетка». Также испытывались варианты, где решетка была внутри ПНД.
2	Hardcore Dupont Composites, LLC	Трубобетонные сваи с оболочкой из стеклопластика (либо пустотелые стеклопластиковые трубы)
3	Lancaster Composite, Inc.	Трубобетонные сваи с оболочкой из стеклопластика, изготовленной методом намотки
4	Seaward International, Inc.	Свая, изготовленная из ПНД армированного стеклопластиковой арматурой
5	Shakespeare Company	Пустотелая стеклопластиковая труба, изготовленная методом намотки
6	Specialty Plastics, Inc	Пустотелая стеклопластиковая труба, изготовленная методом намотки
7	Trimax of Long Island, Inc.	Свая, изготовленная из ПНД армированного фиброй из стекловолокна



1)
2)
1) Свая конструкции Creative Pultrusions, Inc.;
2) Свая конструкции Seaward International, Inc.

Рисунок 2 - Иллюстрация некоторых свай, предложенных в рамках программы SPAR.

В рамках этой программы кроме испытаний так же возводились опытные сооружения с использованием данных свай. На пирсе, расположенном на улице Тифани (Tiffany Street Pier), были установлены два типа свай (1 и 7 по таблице 1, рисунок 3). Кроме того, на этом же самом пирсе были установлены металлические трубы с полимерным наполнением из ПНД [13].



Рисунок 3 - Полимерная свая конструкции Creative Pultrusions, установленная в рамках программы SPAR на пирсе на улице Тифани.

Так же в рамках этой программы опытные сваи (1, 4 и 7 из таблицы 1) для пирсов устанавливались в Порт Ньюарк (рисунок 4).



Рисунок 4 - Сваи, готовые к установке в порту Ньюарк.

Еще один известный опыт применения полимерной сваи IV типа – свая производства Plastic Pilings из переработанного пластика, армированная стальными стержнями, была установлена на пирсе Bravo, Сан-Диего в 1995 году. Это практически все упоминания о применении подобных конструкций [15]. В целом, полимерные сваи I-IV типов на сегодняшний день имеет малое распространение и опыт применения. Информации по ним очень мало. В сети интернет можно найти сваи III-IV типа китайского производства на торговой площадке Alibaba (superfender.en.alibaba.com), но информации по их применению и описания конструкции нет (возможно, это связано с отсутствием публикаций на английском языке).

Несколько иная ситуация со сваями V типа – трубобетонным сваям с бетонным сердечником.

Первыми работами по исследованию эффекта трубобетона можно назвать опыты, проводимые Парижской школой мостов и дорог в 1915 году. Первая монография по расчету трубобетона была написана профессором А.А. Гвоздевым и вышла в свет в 1932 году. Более подробно о трубобетонных конструкциях из стали и ПКМ можно прочесть в цикле статей [21-25].

Исследования трубобетонных конструкций с оболочкой из полимерных композитных материалов начались (ПКМ) в 80-х годах 20 века и активно ведутся до сих пор [2-12]. Существует большая исследовательская база по испытаниям трубобетонных конструкций с оболочкой из ПКМ на осевое сжатие. Разные исследователи выводили собственные аналитические модели расчета прочности (таблица 2, источник: [15]). Ведутся и исследования изгибаемых трубобетонных конструкций с оболочкой из ПКМ [1, 16]. В целом, поведение конструкции под нагрузкой в значительной мере зависит от технологии изготовления оболочки и особенностях внутренней поверхности оболочки, что отмечают все исследователи. Чаще всего исследуются конструкции, изготовленные методом намотки без дополнительных модификаций внутренней поверхности.

Таблица 2 - Аналитические модели трубобетонных конструкций с оболочкой из ПКМ различных исследователей.

Автор	Тип конструкции	Предел прочности f_{cc}	Предельная осевая деформация ε_{cc}
Fardis and Khalili (1981)	GFRP – encased concrete	$f_{co} \left[1 + 2.05 \left(\frac{f_1}{f_{co}} \right) \right]$	$0.002 \left[1 + 0.5 \left(\frac{E_f \cdot t_f}{D \cdot f_{co}} \right) \right]$
Karbahari and Eckel (1993)	FRP – encased concrete	$f_{co} \left[1 + 2.1 \left(\frac{f_1}{f_{co}} \right)^{0.87} \right]$	$0.002 \left[1 + 0.5 \left(\frac{2t_f \cdot f_f}{D \cdot f_{co}} \right) \right]$
Mirmiran and Shahawy (1997)*	GFRP – encased concrete	$f_{co} + 4.269 f_l^{0.587}$	-
Miyauchi, et al. (1997)**	GFRP – wrapped concrete	$f_{co} \left[1 + 3.5 \left(\frac{f_1}{f_{co}} \right) \right]$	$0.002 \left[1 + 10.6 \left(\frac{2t_f \cdot f_f}{D \cdot f_{co}} \right)^{0.373} \right]$
Samaan, et al. (1998)*	GFRP – encased concrete	$f_{co} + 6 f_l^{0.7}$	$\frac{f_{cc} - 0.872 f_{co} - 0.371 f_l - 6.258}{245.61 f_{co}^{0.2} + 1.3456 \left(\frac{E_f \cdot t_f}{D} \right)}$
Saafi, et al. (1999)	CFRP and CFRP – encased concrete	$f_{co} \left[1 + 2.2 \left(\frac{f_1}{f_{co}} \right)^{0.84} \right]$	$\varepsilon_{co} \left[1 + (537 \varepsilon_f + 2.6) \left(\frac{f_{cc}}{f_{co}} - 1 \right) \right]$
Toutanji (1999)	CFRP and GFRP – wrapped concrete	$f_{co} \left[1 + 3.5 \left(\frac{f_1}{f_{co}} \right)^{0.85} \right]$	$\varepsilon_{co} \left[1 + (310.57 \varepsilon_f + 1.9) \left(\frac{f_{cc}}{f_{co}} - 1 \right) \right]$
Spoelstra and Monti (1999)	CFRP and GFRP – wrapped and encased concrete	$f_{co} \left[0.2 + 3 \left(\frac{f_1}{f_{co}} \right)^{0.5} \right]$	$\varepsilon_{co} \left[2 + 1.25 \left(\frac{E_c}{f_{co}} \right) \varepsilon_f \sqrt{\frac{f_l}{f_{co}}} \right]$
Примечание	<p>* значения в МПа **Уравнение для ε_{cc} верно при $f_{co} = 30$ МПа CFRP – трубобетон с углепластиковой оболочкой GFRP – трубобетон со стеклопластиковой оболочкой Encased concrete – конструкция, получаемая заполнением бетоном оболочки; Wrapped concrete – конструкция, получаемая оборачиванием предварительно изготовленной бетонной конструкции. f_{co} – прочность при одноосном сжатии не стесненного бетона ε_{co} – предельная деформация не стесненного бетона E_f – радиальный модуль упругости оболочки f_f – радиальный предел прочности оболочки f_l – боковое давление на бетон t_f – толщина оболочки D – диаметр бетонного сердечника</p>		

Наиболее массово применяются конструкции производства Lancaster Composites, Inc. Их сваи устанавливались на базе подводных лодок ВМС США – пирс Браво, Сан-Диего (рисунок 5); пирс 10 ВМС США, Сан-Диего; Порт-Хэдлок ВМС США, штат Вашингтон (рисунок 6); канал Эри, штат Нью-Йорк; Озеро Понтчартрен, Новый Орлеан и т.д. (www.lancastercomposite.com).

Так же на североамериканском рынке присутствует продукция производителей Pearson Pilings (www.pearsonpilings.com) и Harbour Technologies (www.harbortech.us).

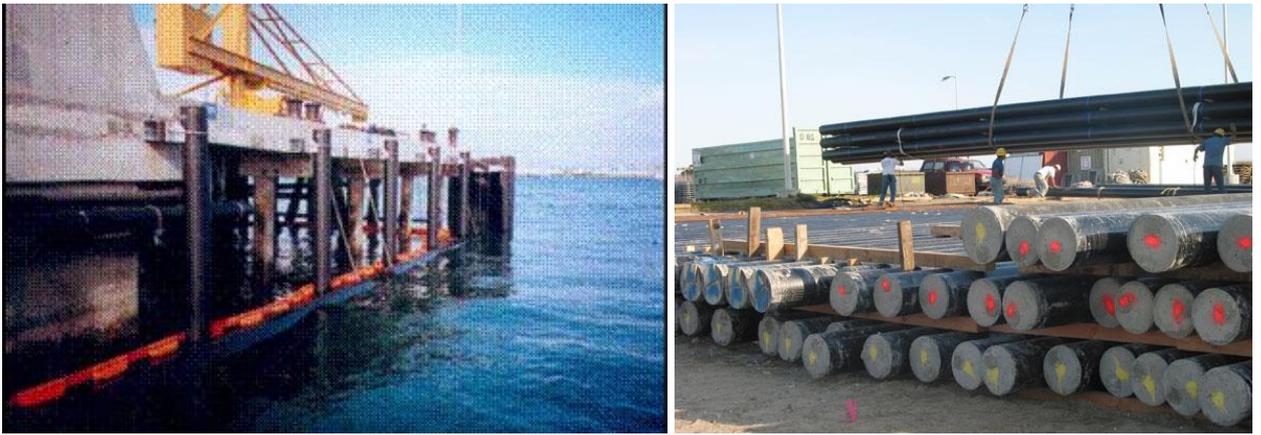


Рисунок 5 - Полимерные сваи производства Lancaster Composites, Inc. – пирс Браво, база ВМС США в Сан-Диего.

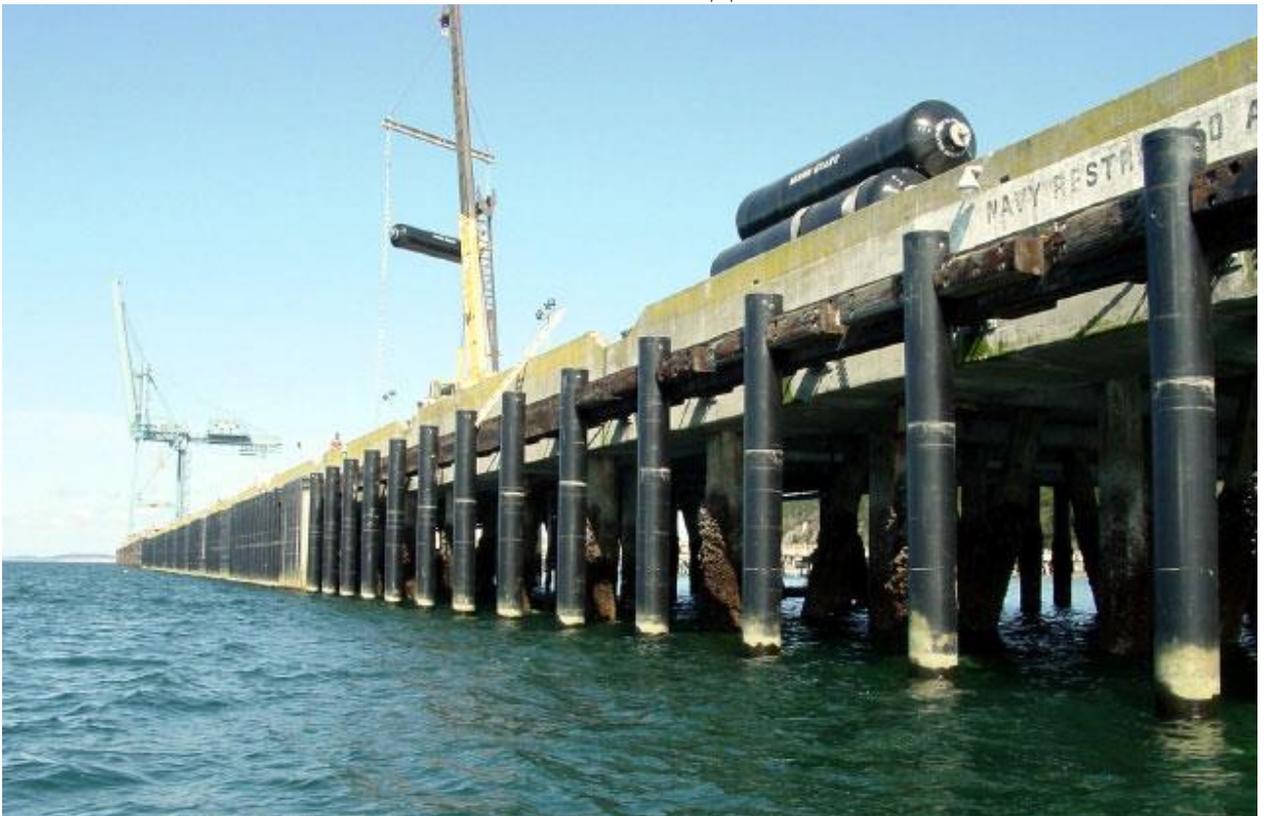


Рисунок 6 - Полимерные сваи производства Lancaster Composites, Inc. – Порт-Хэдлок ВМС США, штат Вашингтон.

В настоящее время АО «НИИГрафит» ведет работу по исследованию трубобетонных конструкций с оболочкой из ПКМ. В 2017 году было открыто движение по первому в России мосту с несущими трубобетонными арочными элементами с оболочкой из углепластика (рисунок 7). Этот мост является вторым в России автомобильным мостом, где полимерные композиционные материалы использовались при изготовлении несущих элементов. Подробнее о самом сооружении можно прочесть в статьях [17, 18], а о результатах испытаний арочных конструкций в статьях [19, 20]. Так же нами были проведены испытания балочных трубобетонных элементов на 4-х точечный изгиб. После анализа результатов испытаний мы разработали Стандарт организации СТО 00200851-012-2016 «Конструкции трубобетонные с оболочкой из полимерных композиционных материалов. Проектирование и расчет изгибаемых конструкций». СТО прошло экспертизу профильного технического комитета и имеет свидетельство о регистрации в Минстрое № 465-037.

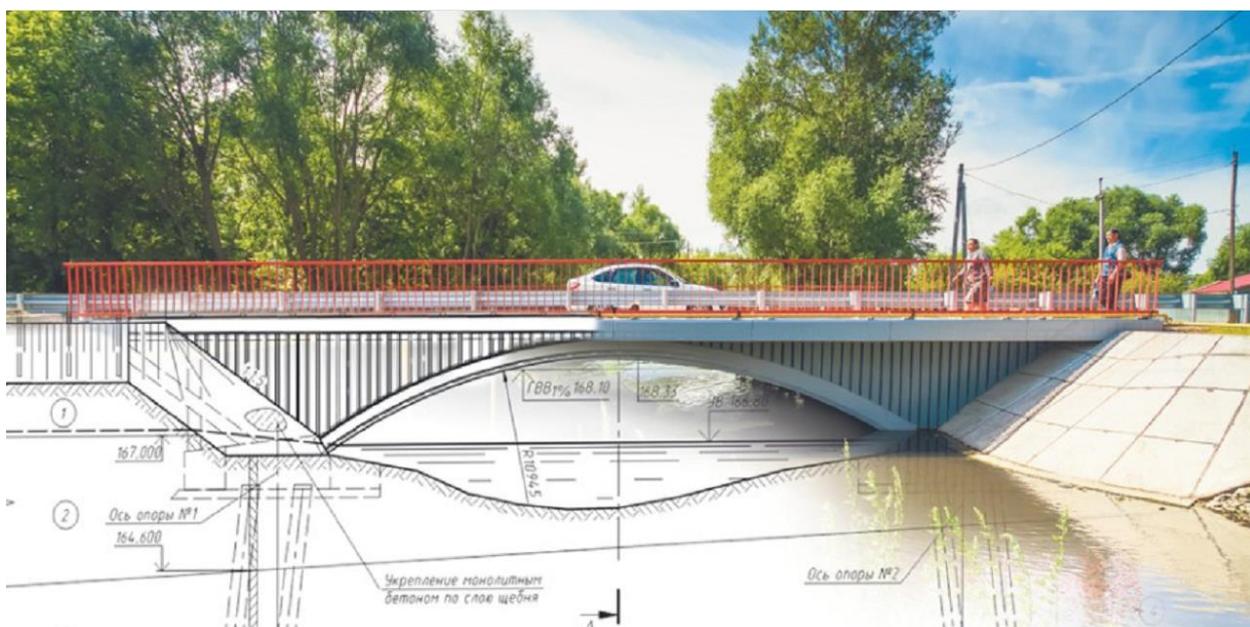


Рисунок 7 - Первый в России мост с несущими трубобетонными арочными элементами с оболочкой из углепластика, совместный проект АО «НИИГрафит» и ФГУП «ВИАМ».

Список литературы.

- 1) Abouzied, R. Masmoudi. Flexural behavior of new partially concrete-filled filament-wound rectangular FRP tube beams / A. Abouzied, R. Masmoudi. – CSCE 2014.
- 2) Amir Mirmiran, Mohsen Shahawy and Hazem El Echary. Acoustic emission monitoring of hybrid frp-concrete columns // Journal of engineering mechanics, august 1999. – С. 899-905.
- 3) Amir Mirmiran, Yutian Shao and Mohsen Shahavy. Analysis and field tests on the performance of composite tubes under pile driving impact // Composite structure, February 2002. – С. 127 – 135.
- 4) Amir Z. Fam. Field Applications of Concrete-Filled FRP Tubes for Marine Piles//ACI Special Publications, November 2003/ A. Fam, R. Greene,S. Rizkalla. – С. 161 – 180.
- 5) Amir Z. Fam. Concrete-filled fibre-reinforced polymer tubes for axial and flexural structural members [Текст]: dis. ... doctor of philosophy. AZYH Fam – 2000.
- 6) Amir Z. Fam, and Rizkalla, Sami H., “Behavior of Axially Loaded Concrete-Filled Circular Fiber Reinforced Polymer Tubes”, ACI Structural Journal, Vol.98, NO.3, May-June 2001(a), pp. 280-289
- 7) Amir Z. Fam and Rizkalla, Sami H., “Confinement Model for Axially Loaded Concrete Confined by FRP Tubes,” ACI Structural Journal, Vol.98, NO.4, July-August 2001(b), pp. 251-461.
- 8) Amir Z. Fam. “Concrete-Filled Fiber Reinforced Polymer Tubes For Axial and Flexural Structural Members,” Ph.D. Thesis, 2000, The University of Manitoba, pp. 261.
- 9) Amir Z. Fam and Rizkalla, Sami H., “Flexural Behavior of Concrete-Filled Fiber-Reinforced Polymer Circular Tubes,” Journal of Composites for Construction, ASCE, Vol. 6, Issue 2, May 2002, pp.123-132.
- 10) Application of Fiber Reinforced Polymer Composites to the Highway Infrastructure / Transportation research board executive committee 2003 (Membership as of August 2003).
- 11) Behavior of Fiber-Reinforced Polymer Composite Piles Under Vertical Loads. Research, Development, and Technology Turner-Fairbank Highway Research Center, August 2006.
- 12) Design, Construction and Testing of the Neal Bridge in Pittsfield, Maine. University of Maine, Final Report, October 2009.

- 13) Lampo, Richard, and Thomas Nosker, Development and Testing of Plastic Lumber Materials for Construction Applications, CPAR Technical Report (TR) 97/95 (U.S. Army Construction Engineering Research Laboratories [USACERL], June 1997.
- 14) Lampo, R., T. Nosker, D. Barno, J. Busel, A. Maher, P. Dutta, and R. Odello "Development and demonstration of FRP composite fender, loadbearing, and sheet piling systems." USACERL TR-98/123, U.S. Army Corps of Engineers (CERL), 1998.
- 15) Miguel A. Pando, Carl D. Ealy, George M. Filz, J.J. Lesko, and E.J. Hoppe. A Laboratory and Field Study of Composite Piles for Bridge Substructures. Final Report. Virginia Transportation Research Council. March 2006.
- 16) H. Mohamed and R. Masmoudi, "Flexural strength and behavior of steel and FRP-reinforced concrete-filled FRP tube beams", Elsevier, Engineering Structures Journal, 32, 3789-3800 (2010).
- 17) Михалдыкин Е.С. Композиты в мостостроении: начали с малого [Текст] / Е.С. Михалдыкин // Дороги. Инновации в строительстве. – 2017. - № 61. – С. 86-92.
- 18) Михалдыкин, Е.С. Малые грунтозасыпные арочные мосты с композитобетонными несущими элементами [Текст] / Е.С. Михалдыкин // Транспортное строительство. – 2017. - № 8. – С. 8-12.
- 19) Е.С. Михалдыкин, И.Г. Овчинников, Ш.Н. Валиев, С.А. Матвеев, А.А. Евдокимов. Испытания балочных и арочных трубобетонных конструкций с оболочкой из полимерных композиционных материалов// Современные проблемы расчета железобетонных конструкций, зданий и сооружений на аварийные воздействия: сб. тр. конференции. Под редакцией А.Г. Тамразяна, Д.Г. Копаницы. – Москва (НИУ МГСУ), 2016. – С. 271-277
- 20) Ш.Н. Валиев, Е.С. Михалдыкин, А.И. Васильев. Испытания трубобетонных элементов с оболочкой из полимерных композиционных материалов как несущих конструкций малых мостовых сооружений//Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета. - 2016. - №4(47). - С. 88-98.
- 21) О проблеме расчета трубобетонных конструкций с оболочкой из разных материалов. Часть 1. Опыт применения трубобетона с металлической оболочкой / И.И. Овчинников, И.Г. Овчинников, Г.В. Чесноков, Е.С. Михалдыкин // Наукоедение: интернет-журнал. – 2015. - №4. – Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/95TVN415.pdf>
- 22) О проблеме расчета трубобетонных конструкций с оболочкой из разных материалов. Часть 2. Расчет трубобетонных конструкций с металлической оболочкой / И.Г. Овчинников, И.И. Овчинников, Г.В. Чесноков, Е.С. Михалдыкин // Наукоедение: интернет-журнал. – 2015. – №4. – Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/112TVN415.pdf>
- 23) О проблеме расчета трубобетонных конструкций с оболочкой из разных материалов. Часть 3. Опыт применения полимерных композитных материалов в мостостроении/ И.Г. Овчинников, И.И. Овчинников, Г.В. Чесноков, Е.С. Михалдыкин // Наукоедение: интернет-журнал. – 2015. – №5. – Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/27TVN515.pdf>
- 24) О проблеме расчета трубобетонных конструкций с оболочкой из разных материалов. Часть 4. Опыт применения трубобетонных свай с оболочкой из полимерных композиционных материалов / И.Г. Овчинников, И.И. Овчинников, Г.В. Чесноков, Е.С. Михалдыкин // Наукоедение: интернет-журнал. – 2015. – №6. – Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/148TVN615.pdf>
- 25) 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.Г. Овчинников, И.И. Овчинников, Г.В. Чесноков, Е.С. Михалдыкин // Наукоедение: интернет-журнал. – 2016. – №1. – Режим доступа: <http://nauko.vedenie.ru/PDF/02TVN116.pdf>