

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» / Russian Journal of Transport Engineering <https://t-s.today>

2020, №3, Том 7 / 2020, N 3, Vol. 7 <https://t-s.today/issue-3-2020.html>

URL: <https://t-s.today/PDF/11SATS320.pdf>

DOI: 10.15862/11SATS320 (<http://dx.doi.org/10.15862/11SATS320>)

Особенности применения контактного элемента в построении численной модели силового взаимодействия арматурного стержня со средой анкерения

Белуцкий И.Ю., Гринёв П.Е., Иовенко В.В.

ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», Хабаровск, Россия

Автор, ответственный за переписку: Гринёв Павел Евгеньевич, e-mail: 011988@pnu.edu.ru

Аннотация. Опыт применения неметаллических композиционных материалов достаточно большой в зарубежных странах. Он систематизирован и собран в единую базу. В России активно к этому вопросу стали возвращаться только в последнее десятилетие, ввиду того, что необходимые вычислительные ресурсы стали более актуальными и доступными для проектных организаций, независимых исследователей и аспирантов высших учебных заведений. Неметаллическая композитная арматура вместе с преимуществами имеет перечень недостатков, которые не позволяют ее широко использовать в конструкциях, среди которых относительно низкий модуль упругости, а также неспособность изгибаться в процессе монтажа. С целью совершенствования расчёта конструкций армированных предварительно напряжённой арматурой, а так же прогнозирования возможной потери усилия предварительного напряжения, рассмотрено создание конечно элементной модели, которая бы давала возможность оценивать разрушающие касательные напряжения в окрестности арматуры. В статье представлен процесс создания элемента связи в рамках данной модели, для имитации напряжённо деформируемого состояния контактного слоя между арматурой и бетоном. Расчёт ведётся в линейной постановке. Посредством программного

продукта ЛИРА САПР создаётся модель элемента пролётного строения таврового сечения, армированного пучком композитной арматуры. Прикладывается усилие к торцам стержня, эквивалентное усилию обжатия при отпуске предварительно напрягаемой арматуры. Авторами предложен вариант подбора жёсткости шва по контакту стержня с анкерующей средой. Жёсткость предполагается постоянной по всей длине контактного слоя. Выполнена вариация модуля упругости контактного слоя. Контактный слой условно выделен, как отдельный материал. Рассмотрена модель для трех типов материалов. Получены картины касательных напряжений в окрестности контактного элемента. Получены картины перемещений торцов арматурных стержней. Проведен натурный эксперимент по созданию пролётного элемента с предварительным натяжением арматуры. Осуществлён отпуск арматуры. По факту отпуска зафиксировано втягивание. Измерены результаты втягивания торцов стержня, значения которых сопоставимы с численным перемещением.

Ключевые слова: арматура; контактный слой; касательные напряжения; сцепление; перемещение; силовое взаимодействие; адгезия; контактный шов

Contact element use peculiarities in the numerical model construction of the reinforcing bar force interaction with an anchoring field

Igor Yu. Belutsky, Pavel E. Grinev, Vladimir V. Iovenko

Pacific National University, Khabarovsk, Russia

Corresponding author: Pavel E. Grinev, e-mail: 011988@pnu.edu.ru

Abstract. The application experience of non-metallic composite materials is quite wide in foreign countries, as well as systematized and assembled into a single database. In Russia, since the necessary computing resources have become more relevant and accessible for design organizations, independent researchers, and graduate students of higher educational institutions, this question resurfaced only in the last decade. As well as benefits, non-metallic composite reinforcement has its disadvantages, which prevent it from wide usage in structures, including a relatively low elastic module, as well as the inability to bend during installation. To improve the reinforced structures with stressed reinforcement calculation and possible prestressing force loss prediction, the finite element model production has been discussed. This model would allow us to evaluate the damaging shear stresses in the reinforcement region. The bracing formation process in the scope of this model was presented in this article, with the purpose of simulation the contact layer stress-strain state between reinforcement and concrete. The calculation is performed in a linear setting. Model development of a T-section decking component reinforced with a composite reinforcement beam

produced via LIRA SAPR software. Exert a force on shank ends that is equivalent to the clamping force when the prestressed reinforcement is released. The authors proposed a selection option of the junction stiffness by stem contact with the anchoring field. The stiffness is assumed to be constant along the entire length of the contact layer. Elastic coefficient variation of the contact layer was performed here. The contact layer is highlighted conditionally as a separate material. A model for three types of materials was discussed. The shear stresses patterns in the contact element region were obtained. The patterns of abutting end reinforcement bars motion are obtained. To create a span element with a pre-tensioned reinforcement, a full-scale experiment was performed, as well as reinforcement abatement. Upon abatement, the retraction was recorded. The retraction results of the shank ends were measured, the values of which are comparable to the numerical motion.

Keywords: reinforcement; contact layer; shear stresses; binding; motion; force interaction; adhesion; contact seam

Данная статья доступна по лицензии Creative Commons “Attribution” («Атрибуция») 4.0 Всемирная

This article is available under the Creative Commons “Attribution” 4.0 Global License



В экспериментальных работах НИИЖБ¹ отмечается, что для каждого типа бетона необходимы индивидуальные данные о параметрах сцепления. Для этого проводят серию испытаний на выдергивание арматурного стержня из тела бетонной призмы, фиксируя ключевые значения напряжений и смещений торцов. В работе¹ Астровой предложен внушительный набор теоретических зависимостей, предложенных различными авторами, характеризующих сцепление и зависимость интенсивности касательных напряжений по контакту арматуры с бетоном. Однако каждый автор, рассматривая полученную зависимость напряжений по длине стержня предлагает зависимость, отвечающую только какому-то конкретному этапу напряженного состояния. В связи с этим встаёт необходимость создания более универсальной модели, которая бы могла отражать необходимые конструктивные особенности с учётом среды анкерения. В статье, за основу модели силового взаимодействия арматурного стержня со средой анкерения положена модель составного стержня в смысле А.Р. Ржаницына², которая сохраняет справедливость основных зависимостей теории составных стержней. Авторами статьи при использовании конечного элемента [1] учитывается характер сцепления, а как следствие специфика напряженно-деформируемого состояния контактного слоя арматуры и анкерующей среды. При исследовании сцепления прибегают к испытаниям выдергивания либо вдавливания торцов арматуры в тело среды анкерения. При этом фиксируется величина смещений $g(0)$ и $g(1)$ на всех этапах нагружения, где $g(0)$ – это смещение загруженного сечения стержня; $g(1)$ – тоже для незагруженного. На рисунке 1 приведены графики зависимостей смещения арматуры различного типа от приложенного к ней усилия.

Случай центрального армирования одним стержнем заслуживает внимания ввиду того, что к нему точно или приближённо сводятся все виды армирования призматических элементов системой продольных стержней³ и применим в испытаниях на выдергивание, и изгиб [6; 9–16].

На рисунке 1 представлены зависимости, полученные в ходе исследований сцепления арматуры с бетоном. Римскими цифрами обозначены стадии напряженно-деформированного состояния контактного слоя бетона. Измеряется величина смещений $g(0)$ и $g(1)$ на всех этапах нагружения, затем по этим данным строятся графики напряжение-деформация образцов ($g(0)$ – сечение загруженного сечения стержня; $g(1)$ –

¹ Гвоздев А.А. Трещиностойкость и деформативность обычных и предварительно напряженных железобетонных конструкций / А.А. Гвоздев // – М.: Стройиздат. – 1965. 280 с.

² Ржаницын А.Р. Составные стержни и пластинки / А.Р. Ржаницын // – М.: Стройиздат. – 1986. 316 с.

³ Холмянский М.М. Бетон и железобетон. Деформативность и прочность. / М.М. Холмянский // – М.: Стройиздат. – 1997. 576 с.

то же, на незагруженном торце призмы). Для сравнения здесь же нанесены графики удлинений стержня длиной l , но не имеющего сцепления с бетоном $s^{CB}_{(0)}$. Независимо от вида арматуры, марки бетона и других факторов графики $s_{(0)}$, $g_{(0)}$ и $s_{(0)}$, $g_{(l)}$ имеют однотипный характер.

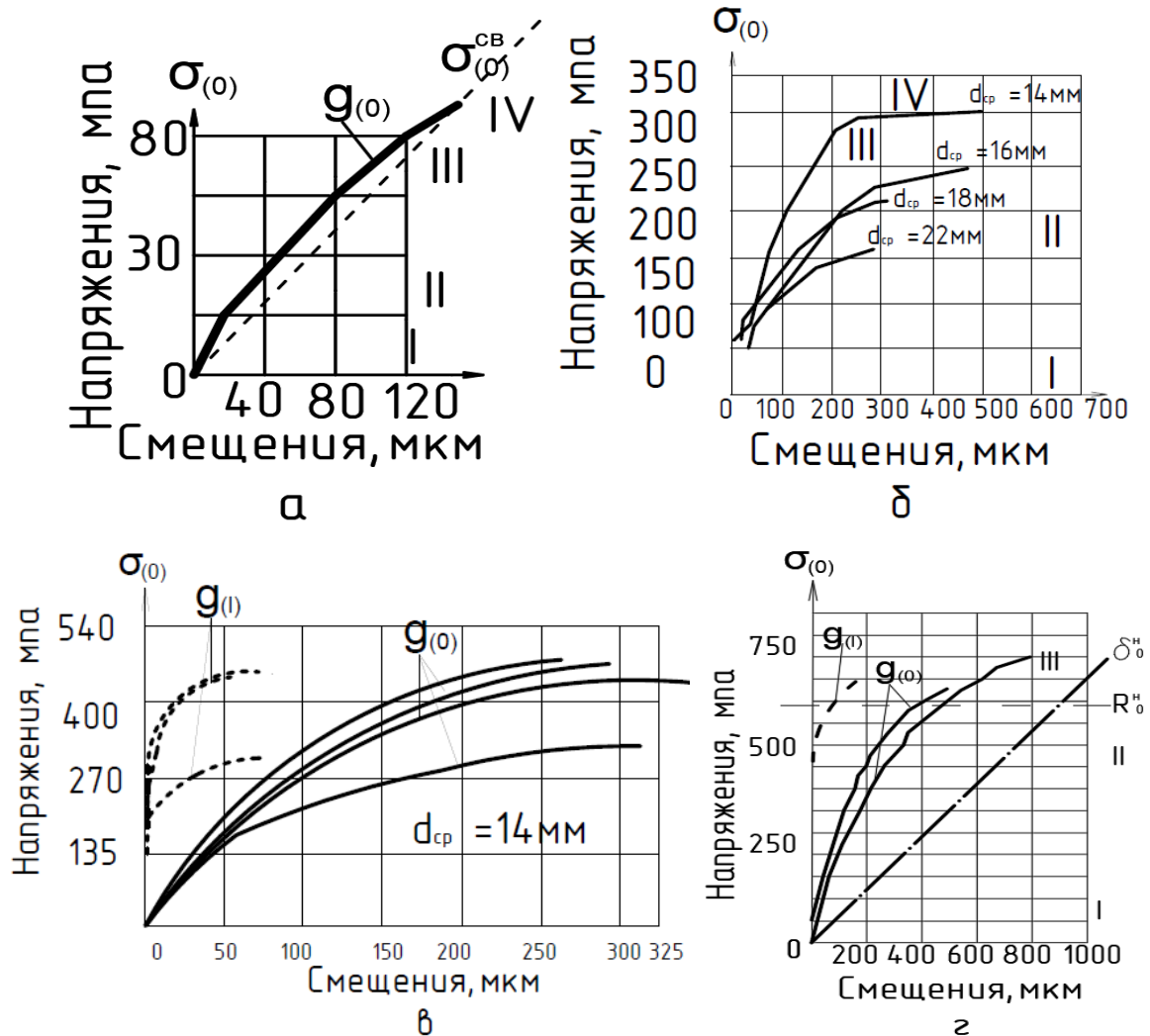


Рисунок 1. Графики смещений арматуры относительно бетона, полученные: а – Е. Амштутцем; б – Ф. Эмпергером; в – Кларком для гладкой арматуры; г – Т.И. Астровой для арматуры периодического профиля¹

Figure 1. Reinforcement motion against concrete, obtained by: а – E. Amshtutz, б – F. Emperger, в – Clark for plain bars, г – T.I. Astrova ribbed bar¹

На загруженном торце призматического бетонного элемента приложенная нагрузка, начиная с первого этапа нагружения, вызывает смещения сечения арматуры, расположенного в плоскости торцевой грани. На дальнейших этапах нагружения эти смещения возрастают и достигают значительных величин. По характеру изменения смещений в зависимости от нагрузки на графиках могут быть отмечены четыре участка, разделяемые характерными точками. Предположим, что вид графика $s_{(0)}$, $g_{(0)}$ отражает напряжённо-деформированное состояние контактного слоя

бетона, окружающего стержень. Тогда каждый участок кривой отвечает определенной стадии напряжённо-деформированного состояния контактного слоя, а точки перелома указывают своего рода переходные состояния.

Таким образом, на графике $s_{(0)}$, $g_{(0)}$ могут быть отмечены следующие четыре стадии напряжённо-деформированного состояния контактного слоя бетона:

I (условно упругая) стадия напряжённого состояния характеризуется тем, что касательная к графику $s_{(0)}$, $g_{(0)}$ почти совпадает с начальным участком графика, а угол наклона касательной имеет наибольшую величину. Следовательно, смещения прямо пропорциональны нагрузке, а деформации бетона и арматуры на всей длине заделки имеют упругий характер.

II стадия напряженного состояния контактного слоя наблюдается при появлении заметных неупругих деформаций, что вызывает отклонение графика $s_{(0)}$, $g_{(0)}$ от прямой линии. Угол наклона касательной к графику уменьшается. На рисунке 4г Астровой изображён участок, касательная к которому параллельна прямой, отвечающей удлинению стержня $\delta^{cb}_{(0)}$, не имеющего сцепления с бетоном. На этом участке происходит переход к стадии III напряжённого состояния.

III стадия характеризуется значительными смещениями загруженного сечения стержня и резким уменьшением угла наклона касательной к графику $s_{(0)}$, $g_{(0)}$. Судя по характеру графика, можно предположить, что на этой стадии на незначительной части длины заделки имеют место неупругие деформации бетона под выступами, а на наиболее нагруженных участках по длине стержня возможно и частичное разрушение бетона в контактном слое. Судя по характеру графика смещений незагруженного конца стержня $s_{(0)}$, $g_{(0)}$, в начале стадии III появляется некоторое общее скольжение стержня.

Соппротивление нагрузке на данной стадии возникает, по-видимому, в основном за счёт сил трения. При этом вначале действуют силы трения покоя, а затем при повышении нагрузки постепенно развивается общее скольжение стержня относительно бетона.

Во многих случаях испытание на выдергивание заканчивается на стадии III в следствии разрыва [2–8] призмы вдоль стержня. Максимальную величину усилия, приложенного к образцу, обычно считают разрушающей нагрузкой.

Но имеются случаи, когда кривая $s_{(0)}$, $g_{(0)}$ при высоких значениях $s_{(0)}$ асимптотически приближается к линии, параллельной оси $g_{(0)}$ – рисунок 1б, а угол наклона касательной к этой кривой стремится к нулю. Этот

участок графика отвечает стадии IV напряжённого состояния. На этой стадии каждое приращение нагрузки сопровождается скольжением стержня, ввиду чего приборы регистрируют значительные смещения как на загруженном конце, так и на незагруженном.

Однако при этом еще наблюдается некоторое повышение усилия, приложенного к стержню, что свидетельствует о достаточно большом сопротивлении, возникающем в контактном слое. На этой стадии сопротивление осуществляется, по-видимому, в основном за счёт сил трения. Испытание заканчивается полным разрушением контактного слоя по всей длине заделки и вытягиванием стержня из бетона или разрывом призматического элемента [10–16].

Полагая, что характер распределения напряжений около арматуры в бетоне будет идентичный как при испытаниях на выдергивании в пределах I и II стадии работы контактного слоя, предлагается оценить перемещения торцевых сечений арматуры на основе измерения глубины ухода арматуры после её отпуска с упоров, а так же сравнением с численным испытанием.

Создание модели

Model development

Создание контактного элемента ведется при помощи программного комплекса ЛИРА Сапр. В качестве рабочего конечного элемента задействован двухузловой КЭ упругой связи с учетом предельных усилий КЭ-255, 256. Специфика работы которого предусматривает линейное перемещение по направлениям вдоль всех осей в пространстве, а также поворот вокруг них. Учитывая, что материал контактного слоя практически целиком претерпевает сдвиг, модуль упругости материала в первом приближении задавался согласно СП 35.13330.2011 также как и расчетные прочностные характеристики принимаются исходя из значений сопротивления бетона осевому растяжению и сжатию.

Таблица 1 / Table 1

**Расчётные физико-механические
характеристики анкерующей среды принятые в модели**

**The calculated physico-mechanical
characteristics of the anchoring medium adopted in the model**

Материал Material	E, МПа (MPa)	Rbt, ser, МПа (MPa)	Rb, ser, МПа (MPa)	G, МПа (MPa)	v
Бетон Concrete	32500	1.6	18.5	12000	0.2

Составлено авторами / Compiled by the authors

Согласно СП 35.13330.2011⁴ прочность бетона к моменту передачи на него полного усилия с напрягаемой арматуры и при монтаже следует назначать, как правило, не менее прочности, соответствующей классу бетона по прочности В25. Поэтому в качестве расчетных значений для моделирования приняты характеристики бетона В25.

Методика построения

Designing methods

Жесткостные параметры контактного конечного элемента, описываемые параметрами погонной (линейной) жесткости, максимальным допускаемым усилием на сжатие и растяжение приведены в таблице 2.

Таблица 2 / Table 2

Параметры контактного конечного элемента

Contact finite element parameters

	[R], т/м	[N+], т	[N-], т
x	285.4	10.104	-116.8
y	14.14	0.005	-0.0584
z	285.4	10.104	-116.8

Составлено авторами / Compiled by the authors

Жесткость связи считается в предположении о том, постоянстве по всей длине контактной области:

$$R = \frac{E \cdot A}{l},$$

где А площадь кольца в окрестности арматурного стержня, ширину которого образует длина конечного элемента $r = 1.3$ мм, Е – модуль упругости контактного слоя, специально занижаемый в первом приближении и принятый значению модуля сдвига, поскольку прочность контактного слоя значительно ниже прочности основной среды. В дальнейшем варьировалось численное значение модуля упругости с целью получения зависимости перемещений от жесткости линейной связи. В таблице 3 сведены полученные перемещения в зависимости от R.

В качестве натурального образца рассмотрена стеклопластбетонная балка изготовленная в лаборатории мостовых конструкций ТОГУ сотрудниками кафедры Автомобильные Дороги.

⁴ СП 35.13330.2011 Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84* (с Изменениями N 1, 2).

Таблица 3 / Table 3

Перемещения полученные в численном
опыте при варьировании жесткости конечной связи

Displacements obtained in the numerical
experiment by varying the finite connection stiffness

Ry, т/м	dлев, мм d left, mm	dправ, мм d right, mm
2	-0.72	0.59
3	-0.596	0.53
5	-0.467	0.45
10	-0.338	0.351
20	-0.249	0.269
30	-0.21	0.23
40	-0.187	0.206
50	-0.172	0.19

Составлено авторами / Compiled by the authors

Для напрягаемой арматуры была выбрана низко модульная стеклопластиковая с песчаной обсыпкой Rockbar диаметром 6 мм, с общей площадью пучка армирования 1.7 см², а также базальтопластиковая с аналогичной площадью и текстурой. В таблице 4 приведены данные по испытанию арматуры на разрыв.

Во время эксперимента осуществлялось механическое натяжение пучков арматуры, состоящих из шести стержней, с последующим их отпуском.

По факту отпуска было измерено перемещение втягивания выпуска арматурного стержня, с помощью цифровых датчиков с ценой деления 0.001 мм.

Таблица 4 / Table 4

Технические характеристики арматуры заявленные производителем

The technical characteristics of the reinforcement declared by the manufacturer

Технические характеристики Technical characteristics	Базальтопластик Basalt fiber reinforced polymer	Стеклопластик Fiber-glass
Прочность на разрыв, МПа Tear strength, MPa	1200	1000
Модуль упругости, ГПа Elastic modulus, GPa	50	45
Плотность, т/м ³ Density, t/m ³	2	2

Составлено авторами / Compiled by the authors

На рисунке 2 изображены показания цифрового датчика в момент отпуска арматуры с упоров. Показания перемещений с цифрового датчика совпадают с картиной перемещений, полученной в конечно-элементной модели.

Далее представлены картины визуализирующие результаты численных опытов перемещений арматуры. Полученные результаты в

натурном опыте соответствуют перемещениям, полученным в численных моделях для погонной жёсткости $R = 14.14$ т/м.



Рисунок 2. Результаты перемещения арматурного выпуска от сил стягивания (разработано авторами)

Figure 2. The protruding bar motion results from the retraction forces. (developed by the authors)

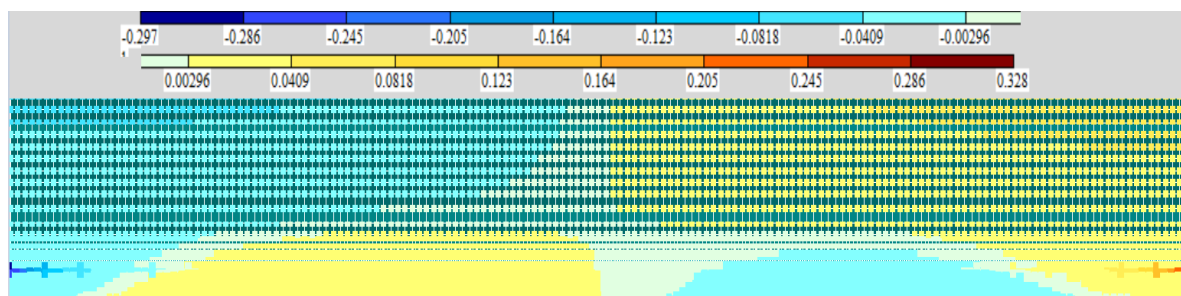


Рисунок 3. Результаты численного расчета продольных перемещений торцевых сечений арматурного стержня, для жесткости связи $R = 14.14$ т/м (разработано авторами)

Figure 3. Coplanar motion numerical calculation results of the reinforcing bar end-type sections, for the connection stiffness $R = 14.14$ t/m (developed by the authors)

На рисунке 3, 4.1, 4.2 изображена цветовая мозаика перемещений узлов конечно-элементной модели, вызванных загрузением арматуры от усилия обжатия.

На рисунке 5 представлена картина касательных напряжений вдоль арматурного стержня. Можно видеть, что напряжения локализируются преимущественно в области торцевых участков.

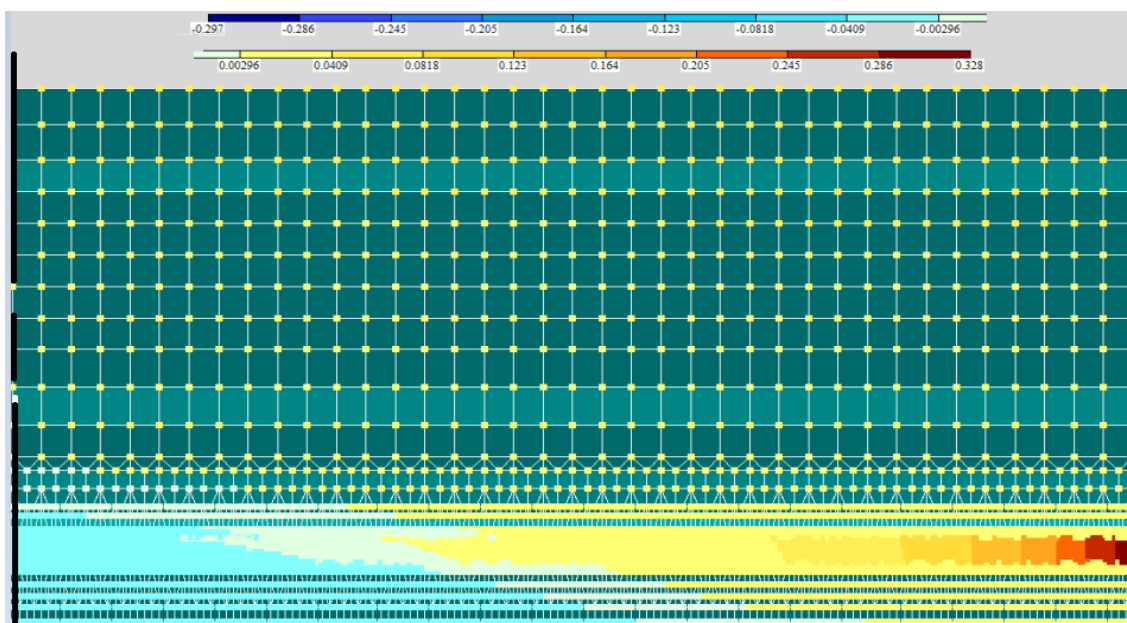


Рисунок 4.1. Полученные перемещения арматурного стержня в численном опыте, мм. Фрагменты наиболее интенсивных локаций, чёрной вертикальной линией слева показана ось симметрии балки (разработано авторами)

Figure 4.1. Obtained reinforcing bar motion in the numerical experiment, mm. Most intense locations fragments, the black vertical line on the left shows the beam symmetry axis (developed by the authors)

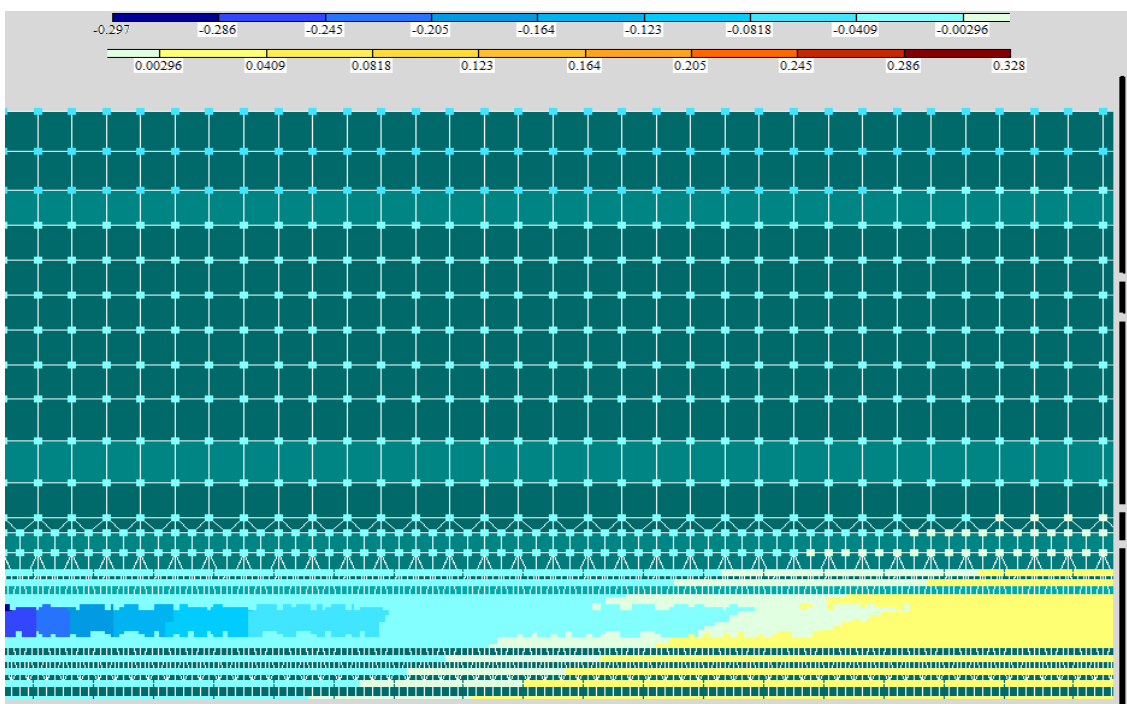


Рисунок 4.2. Полученные перемещения арматурного стержня в численном, мм. Фрагменты наиболее интенсивных локаций, чёрной вертикальной линией справа показана ось симметрии балки (разработано авторами)

Figure 4.2. The obtained reinforcing bar motion in numerical, mm. Most intense locations fragments, the black vertical line on the right shows the beam symmetry axis (developed by the authors)

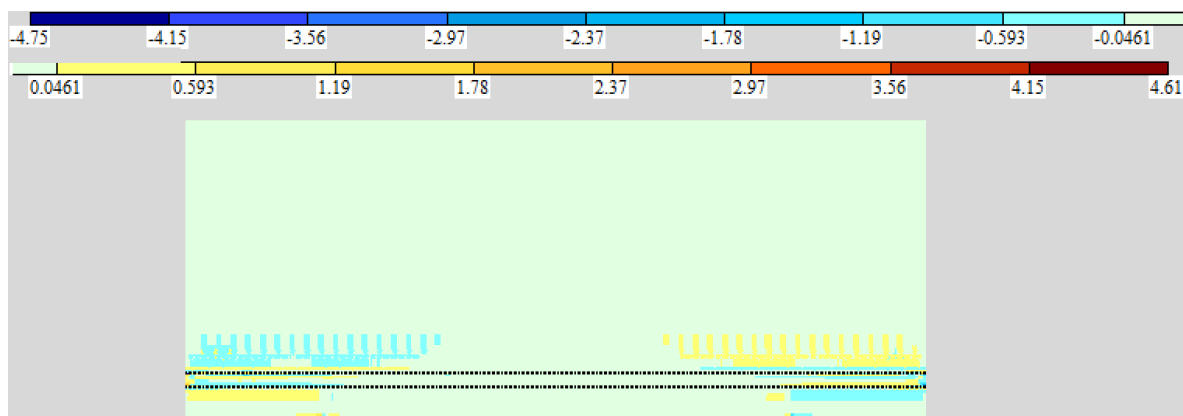


Рисунок 5. Картина касательных напряжений ориентированных вдоль арматурного стержня, kH/cm^2 (разработано авторами)

Figure 5. The shear stresses pattern positioned lengthwise the reinforcing bar, kN/cm^2 (developed by the authors)

Создание опытного образца

Prototype work

В качестве опытного образца создана балка таврового сечения, с композитной арматурой «Rockbar» из стеклопластика АКС6-П-100 (ТУ 2296-014-013101102-2012) и базальтопластика АКСБ6-П-100 (ТУ 5714-007-13101102-2009) фирмы «Гален». На рисунке 6 изображен общий вид балки, а также геометрические характеристики её поперечного сечения. В таблице 5 представлены паспортные характеристики согласно паспорту качества на композитную арматуру.

Для формовки был задействован бетон марки В30. Модель стеклопластбетонной балки таврового сечения, полной длиной 5 м, с расчетным пролетом 4,6 м. Высота балки 33,5 см, ширина плиты 18,5 см, толщина 4,5 см. Ребро выполнено в виде трапеции со средней толщиной 8 см.

Таблица 5 / Table 5

Паспортные характеристики качества стеклопластиковой арматуры

Passport specification of the fiberglass reinforcement quality

Технические характеристики Specifications	Значение Value
Диаметр стержня, мм Rod diameter, mm	6±(0.3)
Прочность при растяжении, ≤ МПа Tensile strength, ≤MPa	1113
Изгибающее напряжение арматуры, ≤ МПа Reinforcement cross-bending stress, ≤MPa	1165

Составлено авторами / Compiled by the authors

Балки армировались напрягаемой арматурой (АСП) Ø6 мм и плоскими каркасами из стальной арматуры класса А-I Ø5 мм. В каждой балке было по 6 стержней АСП, конструкция балки [1] представлена на рисунке 6.

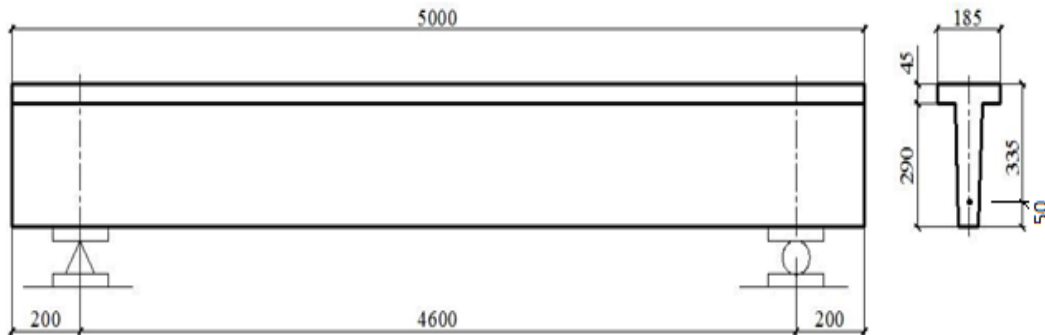


Рисунок 6. Общий вид балки
и поперечное сечение [1] (разработано авторами)

Figure 6. Beam and cross current overview [1] (developed by the authors)

В качестве ненапрягаемой арматуры использовались плоские сетки СП и СР, устанавливаемые соответственно в плиту и ребре балки. Схема армирующей сетки изображена на рисунке 7. Кроме того, устанавливались незамкнутые хомуты.

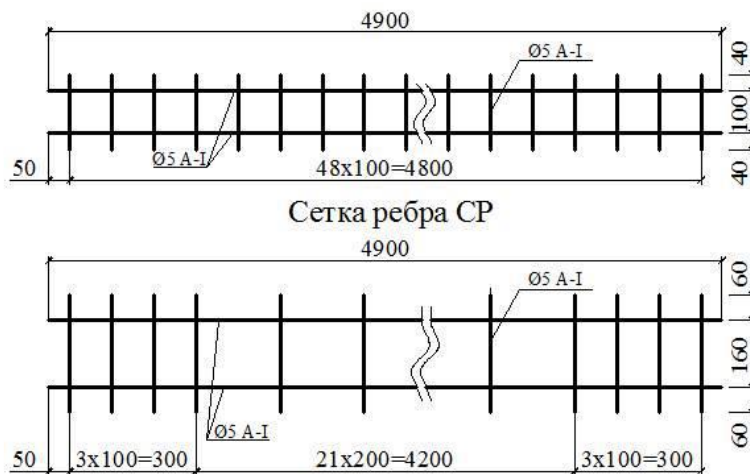


Рисунок 7. Схема армирования балки
ненапрягаемой арматурой (разработано авторами)

Figure 7. Beam reinforcement with
the untensioned reinforcement (developed by the authors)

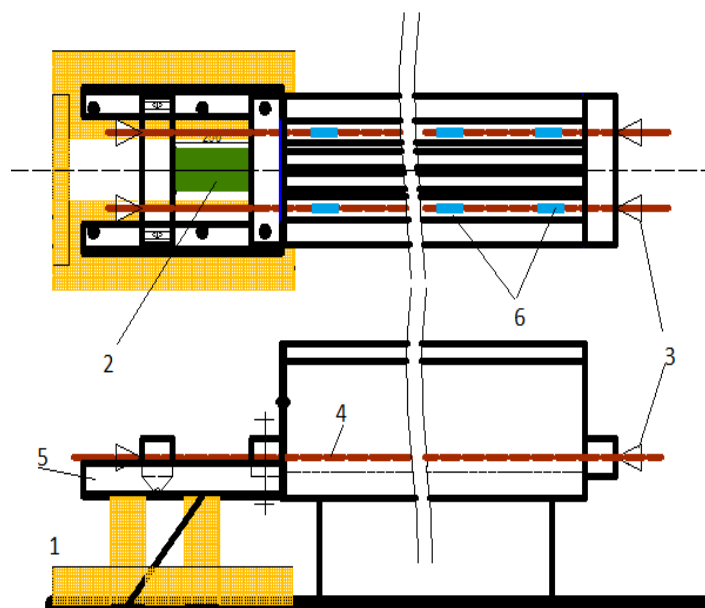
Создавалась балка на базе лаборатории мостовых конструкций, кафедры автомобильных дорог Тихоокеанского государственного университета, на базе оборудования созданного Кулиш В.И., Белуцким И.Ю., Казариновым В.Е., Гришиным А.И., Стовба С.Д., в рамках научно-исследовательской работы по использованию стеклопластиковой

арматуры при создании начальных напряжений в стеклопластбетонных балках.⁵

Задача предварительного натяжения

Pretensioning problem

Для предварительного натяжения арматуры была изготовлена установка из сборных элементов, схема которой изображена на рисунке 8.



Обозначения: 1 – опорная часть, 2 – гидравлический домкрат, 3 – внешние анкера для арматуры, 4 – стеклопластиковая арматура, 5 – накаточные пути для подвижной траверсы, 6 – внутренние анкера

Designations: 1 – support, 2 – hydraulic cell, 3 – an external holdfast for reinforcement, 4 – fiberglass reinforcement, 5 – launching rail for a mobile traverse, 6 – internal holdfast

Рисунок 8. Схематичное изображение опалубки и испытательной установки, для натяжения и фиксации арматуры (разработано авторами)

Figure 8. Sheathing and testing plant for reinforcement tensioning and locking (developed by the authors)

В процессе монтажа выставляется арматурный каркас и одновременно сквозь него продевается пучок композитной арматуры, с уже зафиксированными внутренними анкерами.

⁵ Кулиш В.И. «Внедрение законченной научно-исследовательской работы по использованию стеклопластиковой арматуры при создании начальных напряжений в стеклопластбетонных балках с проведением испытаний в процессе и по окончании строительства моста» / В.И. Кулиш, И.Ю. Белуцкий, В.Е. Казаринов, А.И. Гришин, С.Д. Стовба // Отчёт о научно-исследовательской работе. – ХПИ. – 1988. – 75 с.

Далее на концах армирующих стержней монтируется упорный анкер, который упирается в натягивающую траверсу. На рисунке 9 изображена фотография с процесса монтажа, сделанная с торцевого ракурса, на котором можно видеть захватные устройства и установку для натяжения.

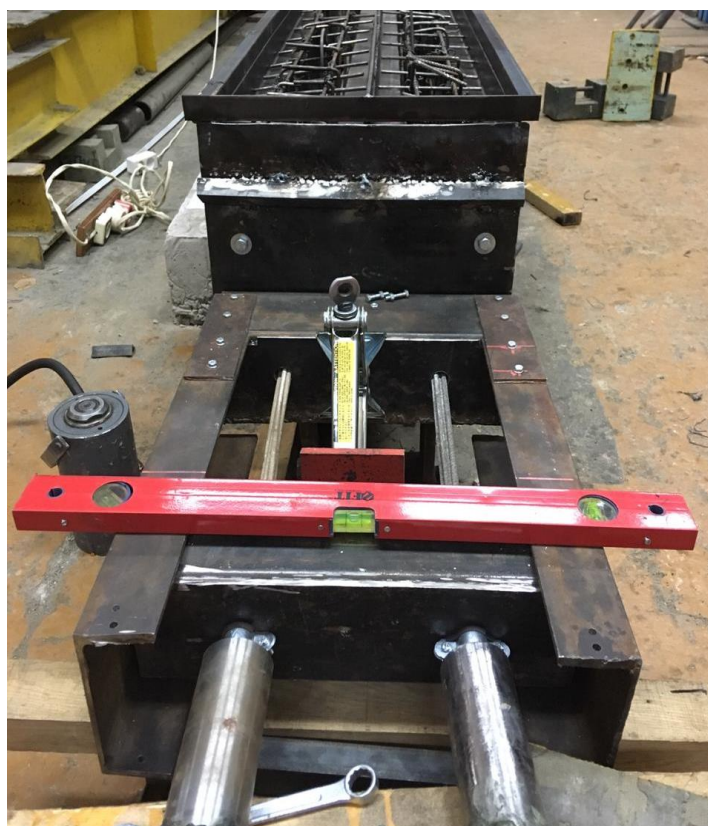


Рисунок 9. Опалубка и испытательная установка, для натяжения и фиксации арматуры (разработано авторами)

Figure 9. Sheathing and a testing plant for tensioning and reinforcement locking (developed by the authors)

На рисунке 9 можно видеть фотографию, на которой запечатлён процесс предварительной корректировки положения всех элементов, непосредственно перед установкой гидравлического домкрата. Для достижения более плавного хода в процессе приложения усилия была спроектирована подвижная траверса на тележке. Конструкция траверсы показана на рисунке 10. Можно обратить внимание, что на рисунке 10 в нижней части данного ракурса траверсы усилена листом стали. Это конструктивное решение выполнено для придания большей жесткости и исключения возможной ошибки вследствие смятия материала, при определении величины усилия предварительного натяжения, а также втягивания арматуры в бетон.

Конструктивные решения по предотвращению такого исхода были также смоделированы в ПК Лира САПР.

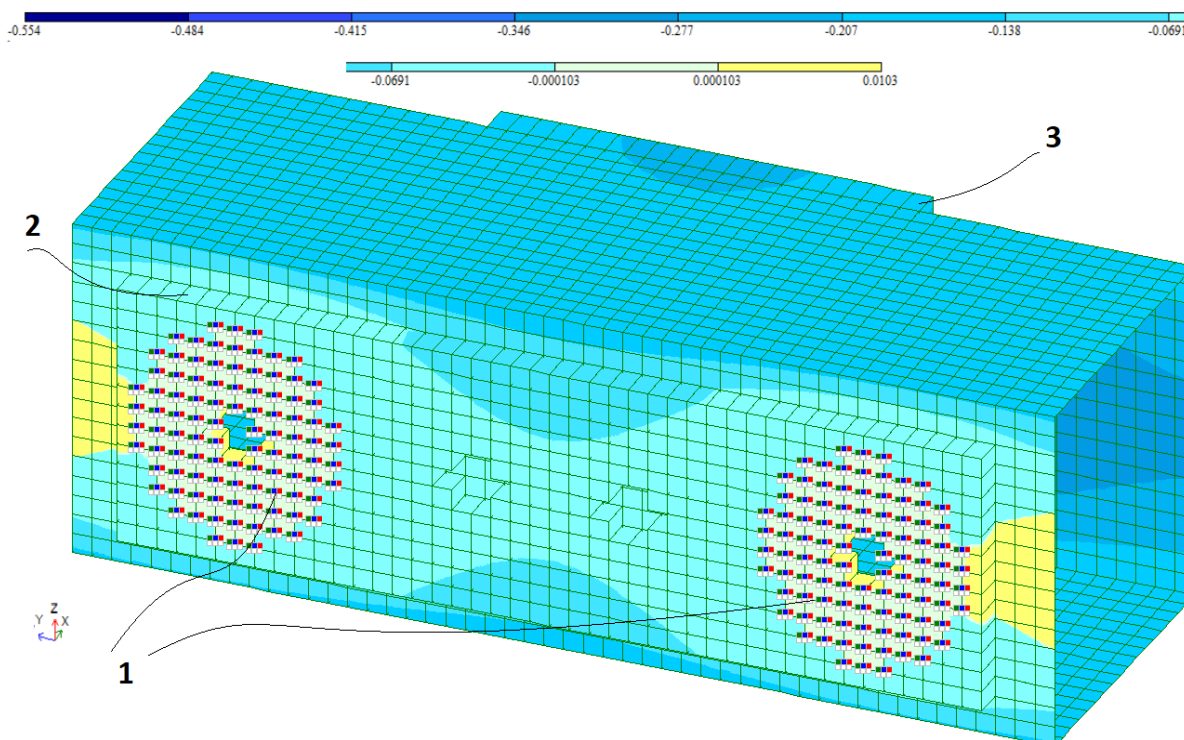
Рисунок 11 раскрывает смещения со стороны посадочных мест анкеров. Из данного анализа можно утверждать, что усиление позволяет отбросить фактор смещения вызванного смятием. Аналогичным образом устраивается тыловая траверса, которая монтируется вплотную на торце опалубки, где фиксируется вторая пара анкеров.



Рисунок 10. Фотография силовой траверсы (разработано авторами)

Figure 10. Power traverse (developed by the authors)

Особенность процесса натяжения заключается в том, что из-за хрупкой структуры композитного арматурного стержня процесс его жёсткого защемления становится невозможным. Встаёт задача о выборе захватов, которые могли бы удерживать стержень без деформации его структуры. Решением данной задачи является монолитный заливной анкер, который способен создать единую структуру со стержнем и предотвратить проскальзывание вдоль собственной оси.



Обозначения: 1 – места приложения анкеров, 2 – усиливающая пластина для упора анкеров, 3 – усиливающая пластина для упора гидравлического домкрата

Designations: 1 – holdfast application points, 2 – reinforcing plate for holdfast buffer, 3 – reinforcing plate for hydraulic cell buffer

Рисунок 11. Контрастные изополя перемещений конструкции натяжной траверсы, в оси направлении линии действия усилия натяжения (разработано авторами)

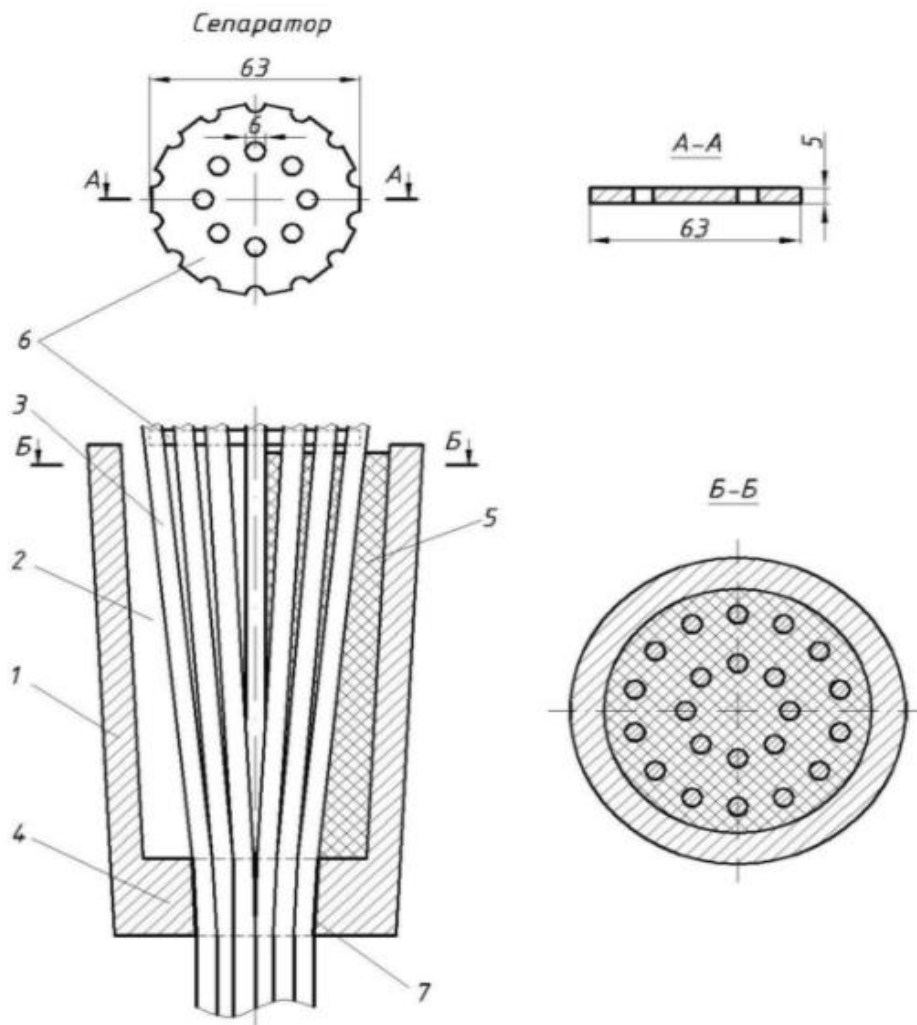
Figure 11. Contrast motion isofields of the tension traverse structure, in the axis of the tension force line direction (developed by the authors)

Известен заливной анкер для закрепления пучка из композитной арматуры, патент на изобретение номер 2703026⁶. Данный анкер включает корпус с внутренней полостью в форме усеченного конуса для расположения в ней композитной арматуры, который изображён на рисунке 12. В узкой части усеченного конуса внутренней полости устроена диафрагма с отверстием для пропуска в нем стержней из композитной арматуры и предупреждения образования воздушных пузырей в среде анкерения, которая формируется посредством заливки компаунда в свободное от арматуры пространство усеченного конуса внутренней полости корпуса анкера.

Реализация заливного анкера для закрепления пучка из композитной арматуры осуществляется следующим образом. Пространство усеченного конуса заполняется компаундом. После полимеризации компаунд получает форму конусного клина, увлекаемого при натяжении

⁶ Сим А.Д. Заливной анкер для закрепления пучка из композитной арматуры: пат. 2703026 Рос. Федерация N 2703026(13) С1; заявл. 30.01.2019; опубл. 15.10.2019, Бюл. N29.

композитной арматуры в сторону отверстия в диафрагме. При этом формируется эффект объемного напряженного состояния с сопутствующим обжатием стержней композитной арматуры, что усиливает эффект сил трения, которые в этой ситуации способствуют сохранению сил сцепления, эффективных благодаря тому, что компаунд обволакивает стержни композитной арматуры. После полимеризации компаунда образуются условия идеально-плотного контакта компаунда со стержнем из композитной арматуры. Равноценный контакт стержней из композитной арматуры с компаундом достигается путем упорядочения стержней во внутренней полости корпуса анкера благодаря их фиксации сепаратором.



Обозначения: 1 – корпус, 2 – внутренняя полость, 3 – арматура композитная, 4 – диафрагма, 5 – заполняющий полимерный компаунд, 6 – сепаратор, 7 – техническое отверстие

Designations: 1 – body, 2 – inner cavity, 3 – composite reinforcement, 4 – diaphragm, 5 – filling polymer compound, 6 – separator, 7 – technical port

Рисунок 12. Схематичное изображение устройства заливного анкера [9]

Figure 12. Filling holdfast design [9]



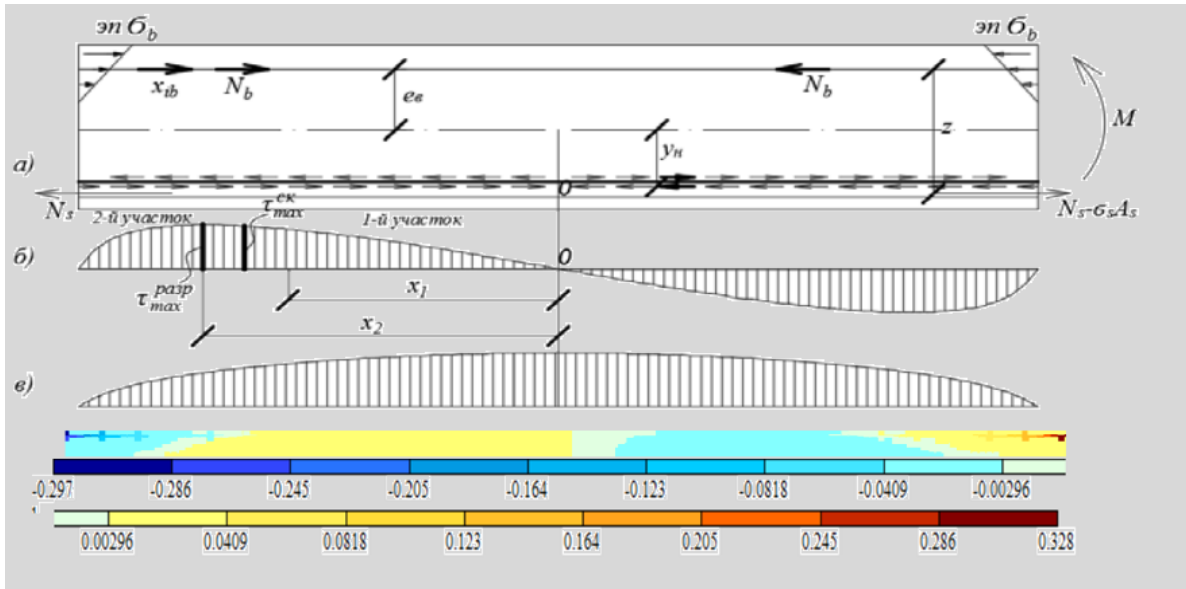
Рисунок 13. Фотография, сделанная в момент непосредственной «заливки» компаундом анкера (разработано авторами)

Figure 13. Photo taken at the moment of direct "filling" the holdfast with the compound (developed by the authors)

Анализ полученных данных

Analysis of the received data

Среди рассмотренных стадий работы напряжённо-деформированного состояния контактного слоя отметим полную хронологию их развития применительно для данного опыта.



Обозначения: а) схема силового взаимодействия арматуры и бетона растянутой зоны изгибаемого элемента; б) эпюра касательных напряжений τ по контакту арматуры и бетона; в) эпюра погонных сил, как совокупность касательных напряжений по периметру контакта арматуры с бетоном

Designations: a) force interaction of reinforcement and tension region concrete of the flexural member; b) shearing stress distribution diagram τ against reinforcement and concrete; c) force per unit length diagram as a sum-total of tangential stresses along the perimeter of the reinforcement-concrete contact

Рисунок 14. Фрагмент картины характерной зависимости между перемещениями торцевых сечений арматуры и распределением касательных сил (разработано авторами)

Figure 14. The peculiar relationship between the reinforcement end-type sections motion and the shear forces distribution (developed by the authors)

Не смотря на линейную постановку задачи, можно наблюдать из численного опыта по перемещению конечного сечения арматурного стержня, следующую закономерность – на участках торцевых сечений возникают максимальные перемещения, что соответствует IV стадии напряжённо-деформированного состояния. Так, на рисунке 14 стоит обратить внимание на визуализацию перемещений полученных из численного опыта, которые в достаточной мере совпадают с характером эпюры касательных напряжений по контакту с арматурой.

Актуальность применения

Application relevancy

По данным Государственного доклада "О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2016 и 2017 годах" выпущенного Министерством природных ресурсов и экологии Российской Федерации, Россия располагает внушительными запасами железных руд, составляющими 110,3 млрд т. Тем не менее, это число намного уступает запасам твердых минеральных и магматических пород, что делает их переработку и использование актуальным для изготовления строительных конструкций.

Заключение

Conclusion

Таким образом, подведем итог:

- Полученные значения перемещений торцевых сечений арматурного пучка из натуральных испытаний хорошо сопоставимы с перемещениями для рассчитанной жесткости.
- Получены значения перемещений для конечного элемента, длина которого эквивалента толщине бетонного слоя вокруг стержня $r = 1.3$ мм.
- Перемещения стержней имеют схожий характер с эпюрой касательных напряжений по контакту с арматурой.
- Построенная расчётная модель в рамках данной работы отражает адекватную работу напряжённо-деформированного состояния контактной зоны.
- Полученные результаты помогут сформировать оценку и спрогнозировать потери предварительного напряжения в пролётных элементах армированных композитной арматурой.
- Универсальность метода данного моделирования позволит применить его для других контактных задач.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Гринёв П.Е.** Особенности построения конечно элементной модели силового взаимодействия композитной арматуры со средой анкерения / П.Е. Гринёв, И.Ю. Белуцкий // Сборник трудов конференции «Материалы секционных заседаний 59-й студенческой научно-практической конференции ТОГУ» / Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2019. – С. 22–27. – URL: http://pnu.edu.ru/media/filer_public/9f/b6/9fb62cc3-ef03-4cbb-a085-f7c9022209a3/volume2.pdf (дата обращения: 15.10.2020).
2. **Кашеварова Г.Г.** Расчетно-экспериментальное исследование процесса разрушения связей сцепления при вдавливании стержня жесткой арматуры в бетон / Г.Г. Кашеварова, А.С. Мартиросян, В.И. Травуш. – DOI: [10.15593/perm.mech/2016.3.04](https://doi.org/10.15593/perm.mech/2016.3.04) // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2016. – № 3. – С. 62–75. – URL: <https://ered.pstu.ru/index.php/mechanics/article/view/174> (дата обращения: 15.10.2020).
3. **Зиннуров Т.А.** Численное моделирование сцепления композитной арматуры с бетоном / Т.А. Зиннуров, А.А. Пискунов, Л.Г. Сафиюлина, О.К. Петропавловских, Д.Г. Яковлев. – DOI: [10.15862/11TVN415](https://doi.org/10.15862/11TVN415) // Интернет-журнал «Науковедение». – 2015. – Т 7, № 4. – URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/11TVN415.pdf> (дата обращения: 25.11.2019).
4. **Тихомиров В.Н.** Исследование стадии обжатия элемента бетонной конструкции, армированной канатом / В.М. Тихомиров, Ю.В. Астахов, А.С. Самошкин // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2015. – № 6. – С. 5–13. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24180985> (дата обращения: 15.10.2020).
5. **Самошкин А.С.** Математическая модель деформирования железобетона с учетом контактного взаимодействия его структурных компонентов / А.С. Самошкин, В.М. Тихомиров // Вычислительные технологии. – 2017. – Т 22, № S1. – С. 75–86. – URL: <http://www.ict.nsc.ru/jct/annotation/1796> (дата обращения: 15.10.2020).
6. **Самошкин А.С.** Исследование нелинейного деформирования железобетона экспериментально-расчетными методами / А.С. Самошкин, В.М. Тихомиров // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2017. – № 5. – С. 17–27. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29739788> (дата обращения: 23.10.2020).
7. **Самошкин А.С.** Надежность сцепления арматуры с бетоном в транспортных сооружениях / А.С. Самошкин, В.М. Тихомиров // Техническое регулирование в транспортном строительстве. – 2016. – № 1. – С. 13–17. – URL: <http://trts.esrae.ru/28-144> (дата обращения: 15.10.2020).
8. **Белуцкий И.Ю.** К оценке трещиностойкости железобетонных изгибаемых элементов, армированных композитной арматурой / И.Ю. Белуцкий, А.Д. Сим // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2016. – № 4. – С. 95–102. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28805625> (дата обращения: 15.10.2020).

9. **Belutsky I.Yu.** Numerical Solutions and Experimental Research in Justification of the Design Model of the Force Interaction of the Reinforcing Beam with the Anchoring Medium / I.Yu. Belutsky, A.D. Sim, P.E. Grinev. – DOI: [10.1088/1755-1315/459/5/052036](https://doi.org/10.1088/1755-1315/459/5/052036) // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2020. – № 459. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/459/5/052036/pdf> (дата обращения: 23.10.2020).
10. **Рябенко Н.Д.** Установка для определения длины зоны передачи напряжений предварительно напряженной арматуры железобетонных элементов / Н.Д. Рябенко, В.В. Тур // Вестник Полоцкого государственного университета. – 2017. – № 16. – С. 98–105. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32778056> (дата обращения: 15.10.2020).
11. **Тихомиров В.Н.** Моделирование упругопластического сцепления арматуры с бетоном / В.Н. Тихомиров, Ю.В. Астахов, А.С. Самошкин // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2015. – № 2. – С. 103–109. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23727315> (дата обращения: 15.10.2020).
12. **Yan F.** Bond behavior of GFRP bar-concrete interface: Damage evolution assessment and FE simulation implementations / F. Yan, Z. Lin. – DOI: [10.1016/j.compstruct.2016.07.078](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.07.078) // Composite Structures. – 2016. – Т 155. – С. 63–76. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822316313733> (дата обращения: 28.09.2020).
13. **Hu Hsuan-Teh** Nonlinear Analysis of Axially Loaded Concrete-Filled Tube Columns with Confinement Effect / Hu Hsuan-Teh, Huang Chiung-Shiann, Wu Ming-Hsien, Wu Yih-Min. – DOI: [10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2003\)129:10\(1322\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:10(1322)) // Journal of Structural Engineering. – 2003. – Т 129, № 10. – С. 1322–1329. – URL: [https://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2003\)129:10\(1322\)](https://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:10(1322)) (дата обращения: 28.09.2020).
14. **Li J.** A Research on Modification Method for NSM FRP-Concrete Bonded Joints Strength Models / J. Li, L. Zhang, Y. Deng, J. Zhang. – DOI: [10.1155/2020/1973626](https://doi.org/10.1155/2020/1973626) // Advances in Polymer Technology. – 2020. – Т 2020. – URL: <https://www.hindawi.com/journals/apt/2020/1973626/> (дата обращения: 23.10.2020).
15. **Heniegal A.** Performance of concrete beams reinforced with fiber ropes as a partial replacement of steel bars / A. Heniegal // International Journal of Engineering and Innovative Technology. – 2017. – Т 7, № 3. – С. 25–33. – URL: https://www.researchgate.net/publication/324485534_Performance_of_concrete_beams_reinforced_with_fiber_ropes_as_a_partial_replacement_of_steel_bars (дата обращения: 28.09.2020).
16. **Torres L.** Experimental study of the influence of adhesive properties and bond length on the bond behaviour of NSM FRP bars in concrete / L. Torres, I. A. Sharaky, C. Barris, M. Vaena. – DOI: [10.3846/13923730.2014.914097](https://doi.org/10.3846/13923730.2014.914097) // Journal of Civil Engineering and Management. – 2016. – Т 22, № 6. – С. 808–817. – URL: <https://journals.vgtu.lt/index.php/JCEM/article/view/1875> (дата обращения: 28.09.2020).

Сведения об авторах:

Белуцкий Игорь Юрьевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Автомобильные дороги», ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», Хабаровск, Россия, e-mail: 000177@pnu.edu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3881-2050>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=272934

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57215841851>

Гринёв Павел Евгеньевич – ассистент кафедры «Автомобильные дороги», ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», Хабаровск, Россия, e-mail: 011988@pnu.edu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4427-5033>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1077652

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57216510068>

Иовенко Владимир Васильевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленное и гражданское строительство», ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», Хабаровск, Россия, e-mail: 000258@pnu.edu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7397-0372>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1034438

Статья получена: 29.09.2020. Принята к публикации: 10.11.2020. Опубликовано онлайн: 25.11.2020.

REFERENCES

1. Grinev P.E., Belutsky I.Yu. [Features of constructing a finite element model of the force interaction of composite reinforcement with an anchoring medium]. In: Pacific National University. [*Proceedings of the conference "Materials of breakout sessions of the 59th student scientific and practical conference PNU"*]. Khabarovsk: Publishers PNU; 2019. p. 22–27. Available at: http://pnu.edu.ru/media/filer_public/9f/b6/9fb62cc3-ef03-4cbb-a085-f7c9022209a3/volume2.pdf (accessed 15th October 2020). (In Russ.).
2. Kashevarova G.G., Martirosyan A.S., Travush V.I. Computational and experimental research of the contact debonding process when rigid reinforcement is pressed into concrete. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2016; (3): 62–75. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: [10.15593/perm.mech/2016.3.04](https://doi.org/10.15593/perm.mech/2016.3.04).
3. Zinnurov T.A., Piskunov A.A., Safiyulina L.G., Petropavlovskih O.K., Yakovlev D.G. Numerical modeling of bond composite reinforcement and concrete. *Naukovedenie*. 2015; 7(4). (In Russ., abstract in Eng.) DOI: [10.15862/11TVN415](https://doi.org/10.15862/11TVN415).
4. Tikhomirov V.M., Astakhov Y.V., Samoshkin A.S. Analysis compressing stage of the stressed concrete construction by cord-reinforced. *Proceedings of higher educational institutions. Construction*. 2015; (6): 5–13. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24180985> (accessed 15th October 2020). (In Russ., abstract in Eng.).
5. Samoshkin A.S., Tikhomirov V.M. Mathematical model of reinforced concrete deformation with considering contact interaction of its structural components. *Computational Technologies*. 2017; 22(S1): 75–86. Available at: <http://www.ict.nsc.ru/jct/annotation/1796> (accessed 15th October 2020). (In Russ., abstract in Eng.).

6. Samoshkin A.S., Tikhomirov V.M. Study of nonlinear deformation of reinforced concrete by experimental-calculated methods. *Proceedings of higher educational institutions. Construction.* 2017; (5): 17–27. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29739788> (accessed 23rd October 2020). (In Russ., abstract in Eng.).
7. Samoshkin A.S., Tikhomirov V.M. Reliability of bond between concrete and fiber reinforcement in transport structures. *Technical regulation in transport construction.* 2016; (1): 13–17. Available at: <http://trts.esrae.ru/28-144> (accessed 15th October 2020). (In Russ., abstract in Eng.).
8. Belutsky I.Yu., Sim A.D. Evaluation of Fracture Toughness of Concrete Flexural Members Reinforced by Composite Armature. *Bulletin of Pacific National University.* 2016; (4): 95–102. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28805625> (accessed 15th October 2020). (In Russ., abstract in Eng.).
9. Belutsky I.Yu., Sim A.D., Grinev P.E. Numerical Solutions and Experimental Research in Justification of the Design Model of the Force Interaction of the Reinforcing Beam with the Anchoring Medium. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* 2020; (459). (In Eng.) DOI: [10.1088/1755-1315/459/5/052036](https://doi.org/10.1088/1755-1315/459/5/052036).
10. Ryabenko N.D., Tur V.V. Setting to determine the length of the zone of transmission of stress in the pre-stressed reinforcement concrete elements. *Vestnik of Polotsk State University.* 2017; (16): 98–105. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32778056> (accessed 15th October 2020). (In Russ., abstract in Eng.).
11. Tikhomirov V.M., Astakhov Y.V., Samoshkin A.S. The modeling of elastic-plastic interaction fiber reinforcement with concrete. *Proceedings of higher educational institutions. Construction.* 2015; (2): 103–109. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23727315> (accessed 15th October 2020). (In Russ., abstract in Eng.).
12. Yan F., Lin Z. Bond behavior of GFRP bar-concrete interface: Damage evolution assessment and FE simulation implementations. *Composite Structures.* 2016; 155 63–76. (In Eng.) DOI: [10.1016/j.compstruct.2016.07.078](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.07.078).
13. Hu Hsuan-Teh, Huang Chiung-Shiann, Wu Ming-Hsien, Wu Yih-Min Nonlinear Analysis of Axially Loaded Concrete-Filled Tube Columns with Confinement Effect. *Journal of Structural Engineering.* 2003; 129(10): 1322–1329. (In Eng.) DOI: [10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2003\)129:10\(1322\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:10(1322)).
14. Li J., Zhang L., Deng Y., Zhang J. A Research on Modification Method for NSM FRP-Concrete Bonded Joints Strength Models. *Advances in Polymer Technology.* 2020. (In Eng.) DOI: [10.1155/2020/1973626](https://doi.org/10.1155/2020/1973626).
15. Heniegal A. Performance of concrete beams reinforced with fiber ropes as a partial replacement of steel bars. *International Journal of Engineering and Innovative Technology.* 2017; 7(3): 25–33. Available at: https://www.researchgate.net/publication/324485534_Performance_of_concrete_beams_reinforced_with_fiber_ropes_as_a_partial_replacement_of_steel_bars (accessed 28th September 2020). (In Eng.).

16. Torres L., Sharaky I.A., Barris C., Baena M. Experimental study of the influence of adhesive properties and bond length on the bond behaviour of NSM FRP bars in concrete. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2016; 22(6): 808–817. (In Eng.) DOI: [10.3846/13923730.2014.914097](https://doi.org/10.3846/13923730.2014.914097).
-

Information about the authors:

Igor Yu. Belutsky – Pacific National University, Khabarovsk, Russia, e-mail: 000177@pnu.edu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3881-2050>

РИИЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=272934

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57215841851>

Pavel E. Grinev – Pacific National University, Khabarovsk, Russia, e-mail: 011988@pnu.edu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4427-5033>

РИИЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1077652

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57216510068>

Vladimir V. Iovenko – Pacific National University, Khabarovsk, Russia, e-mail: 000258@pnu.edu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7397-0372>

РИИЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1034438

Submitted: 29th September 2020. Revised: 10th November 2020. Published online: 25th November 2020.