

УДК 69.07

Палагин Николай Григорьевич

кандидат технических наук, доцент

Email: pal_nik11@mail.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

Ахметов Марат Марселевич

инженер

Email: marat9701@yandex.ru

ООО «Артемид»

Адрес организации: 426010, Россия, г. Ижевск, ул. Автономная, д. 87

Гридчин Анатолий Митрофанович

доктор технических наук, профессор

Email: prezident@intbel.ru

Черватова Алла Васильевна

доктор технических наук, профессор

Email: cherry_611@mail.ru

Белгородский Государственный Технологический Университет им. В. Г. Шухова

Адрес организации: 308012, Россия, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46

Экономическая целесообразность изготовления многопустотных плит перекрытий из высокопрочного песчаного бетона

Аннотация

Постановка задачи. Проведены исследования по выявлению экономической целесообразности изготовления многопустотных плит перекрытий высотой 220 мм, имеющих круглые пустоты диаметром 159 мм, ненапрягаемую арматуру (серия 1.141-1, выпуск 60) и предварительно напряженную арматуру класса А800 (серия 1.141-1, выпуск 63), из высокопрочного песчаного бетона классов ВПБ60 и ВПБ80 в сравнении с плитами из тяжелого бетона классов В15...В80 применительно к городу Казань.

Проведение исследований обусловлено отсутствием месторождений крупного заполнителя на большей части европейской территории Российской Федерации или наличием месторождений осадочных пород, ограниченно пригодных для применения в железобетоне, при повсеместном наличии песка, а также известной экономической эффективностью применения высокопрочного бетона при изготовлении несущих конструкций.

Задачи исследований состояли в сравнении технико-экономических показателей плит из высокопрочного песчаного бетона классов ВПБ60 и ВПБ80 с показателями плит из тяжелого бетона классов В15...В80.

Исследования проводились инженерным методом расчета по действующим нормам с использованием ПК MS Excel. Прочностные и деформативные характеристики высокопрочного песчаного бетона принимались по результатам исследований кафедры ТСМиК КГАСУ, полученных для бетонов на песках местных месторождений.

Результаты. Повышение класса тяжелого и высокопрочного песчаного бетона не сказывается на общем расходе стали. По стоимости материалов во всех случаях наиболее экономичным является применение тяжелого бетона минимального класса (В15 в плитах с ненапрягаемой арматурой и В20 в плитах с предварительно напряженной арматурой).

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в выявлении экономичных решений по расходу материалов в зависимости от класса тяжелого и высокопрочного песчаного бетона для многопустотных плит перекрытий длиной до 6,3 м с ненапрягаемой арматурой класса А500С и с предварительно напряженной арматурой класса А800.

Ключевые слова: высокопрочный песчаный бетон, тяжелый бетон, многопустотные плиты перекрытий с ненапрягаемой и предварительно напряженной арматурой, расчетная нагрузка, типоразмер, экономическая эффективность.

Для цитирования: Палагин Н. Г., Ахметов М. М., Гридчин А. М., Череватова А. В. Экономическая целесообразность изготовления многопустотных плит перекрытий из высокопрочного песчаного бетона // Известия КГАСУ. 2021. №4 (58). С. 26-38. DOI: 10.52409/20731523_2021_4_26.

1. Введение

Объектом исследований являются железобетонные многопустотные плиты перекрытий высотой 220 мм с круглыми пустотами диаметром 159 мм, имеющие круглые пустоты диаметром 159 мм, ненапрягаемую арматуру (серия 1.141-1, выпуск 60) и предварительно напряженную арматуру класса А800 (серия 1.141-1, выпуск 63).

В мировой практике строительства все большее использование находят высокопрочные и сверхвысокопрочные тяжелые бетоны нового поколения, которые позволяют значительно уменьшать размеры сечений элементов, экономить бетон и арматуру [1]. Их применение открыло практически безграничные возможности для возведения уникальных зданий и сооружений по всему миру. В России внедрение таких бетонов началось значительно позже, чем в западно-европейских странах, США, Канаде и Японии. Одними из наиболее известных объектов, возведенных из тяжелых бетонов классов В80...В90, являются строения комплекса «Федерация» ММДЦ «Москва Сити» и общественно-делового комплекса «Лахта-Центр» в г. Санкт-Петербург [2].

Альтернативой высокопрочному тяжелому бетону выступает высокопрочный песчаный бетон (ВПБ) [3]. Его состав включает в себя фракционированный кварцевый песок, высокоактивное вяжущее и эффективные модификаторы. В качестве химических добавок в основном используются пластификаторы, позволяющие значительно снизить водопотребность бетонной смеси и расход цемента (С-3/2,5, Sika VC5-800/2,5, Metflux 2651/2,5) [4].

Применение песчаного бетона имеет следующие преимущества по сравнению с тяжелым бетоном: высококачественную структуру и высокую технологичность, более высокую водо- и газонепроницаемость, и износостойкость, повышенную стойкость к химически активным веществам, возможность получения тонкостенных конструкций, декоративных бетонов и др.

Песчаные бетоны имеют и недостатки, обусловленные большой поверхностью заполнителей. Это ведет к увеличению расхода цемента на 15-20 % по сравнению с равнопрочным тяжелым бетоном. Поэтому при их изготовлении наряду с пластифицирующими в состав вводятся также минеральные добавки или используются композиционные цементы или цементы низкой водопотребности. Также для песчаных бетонов характерно повышенное воздухоовлечение, для снижения которого следует использовать эффективные разжижители или пеногасители.

В Российской Федерации песчаный бетон находит применение в строительстве по причине повсеместного наличия сырьевой базы. Так, на территории Республики Татарстан известно свыше 50 месторождений песка, прогнозные ресурсы строительных песков в республике составляют 1 млрд. м³, в том числе реальные для обработки - около 300 млн. м³. Согласно стратегии экологической безопасности Республики Татарстан и развития природно-ресурсного комплекса республики на 2017-2021 годы и на перспективу до 2030 года перед промышленностью строительных материалов поставлена задача расширения ассортимента продукции, выпускаемой из местного минерального сырья.

В связи с тем, что большая часть европейской территории России (Москва, Московская область, Поволжье, Вологда и др.) не имеет месторождений крупного заполнителя или имеет месторождения осадочных пород, которые ограничено пригодны для применения в железобетоне, использование песчаного бетона является актуальной задачей при его производстве. Кроме того, добыча камня и его переработка на щебень требует значительных затрат электроэнергии и является трудоемкой. При производстве щебня фракции более 5 мм образуется большое количество (до 20-30%) отсевов фракции менее 5 мм, занимающих значительные площади и нарушающих тем самым экологический баланс природы. Лишь в незначительном количестве эти отходы используются в качестве сырья для приготовления известняковой муки и минерального порошка для асфальтобетона. Разрушение гор при добыче щебня приводит к

необратимым климатическим изменениям в Карелии, Северном Кавказе и на Урале, с чем не раз выступали средства массовой информации. Использование песка в качестве заполнителя для бетона вместо щебня наносит меньший урон экологии.

Внедрение высокопрочных песчаных бетонов с применением речных песков Республики Татарстан и химических добавок является альтернативой традиционным бетонам, для получения которых необходим высокопрочный щебень, поставляемый с Урала.

На кафедре ТСМиК КГАСУ на базе песков местных месторождений рек Камы, Волги и Вятки разработаны составы песчаных бетонов высоких классов ВПБ60...ВПБ80, прочностные характеристики которых (R_b , R_{bt} , $R_{b,ser}$, $R_{bt,ser}$) превышают значения для тяжелого бетона тех же классов в 1,05...2,05 раза, а модуль упругости E_b меньше в 1,02...1,04 раза.

Обзор зарубежной и отечественной литературы показал, что практически отсутствуют исследования по использованию песчаного и высокопрочного песчаного бетона в несущих конструкциях. В основном изучаются вопросы оптимизации их состава [5 - 8] и долговечности [9, 10]. Проводятся также исследования по определению их различных механических характеристик [11 - 14].

В [15] и [16] указывается на значительный потенциал применения песчаных бетонов в аддитивных технологиях возведения зданий и сооружений методом 3D-печати. Многочисленные исследования свидетельствуют о необходимости их эффективного применения по причине отсутствия крупного заполнителя, приводящего к значительным деформациям свеженапечатанных слоев и дефектам его структуры.

Изучению вопроса экономичности применения высокопрочных песчаных бетонов в несущих конструкциях посвящены работы [17 - 19]. В [17] приводятся результаты исследований по определению экономической эффективности возведения сборных и монолитных длинных цилиндрических оболочек из ВПБ классов ВПБ60 и ВПБ80 по сравнению с тяжелым бетоном классов В20...В80. Исследования показали, что применительно к городу Казань использование ВПБ по сравнению с тяжелым позволяет уменьшить расход стали до 30,6 %, бетона - до 15,9 %, общую стоимость материалов - до 20,3 %. В статье [18] выявлена экономическая эффективность возведения сборных и монолитных пологих оболочек положительной гауссовой кривизны из ВПБ классов ВПБ60 и ВПБ80 по сравнению с тяжелым бетоном классов В25...В80 применительно к городу Казань. Исследования показали, что использование ВПБ по сравнению с тяжелым уменьшает расход стали до 43,0 %, бетона - до 12,9 %, общую стоимость материалов - до 29,4 %. В [19] приведены результаты исследований по определению экономической эффективности изготовления сплошных колонн одноэтажных промышленных зданий с мостовыми кранами по серии 1.424.1-5 из ВПБ классов ВПБ60 и ВПБ80 по сравнению с тяжелым бетоном классов В20...В80. Исследования показали, что применительно к городу Казань использование ВПБ классов ВПБ60 и ВПБ80 по сравнению с тяжелым бетоном классов В20...В40 уменьшает расход стали до 71,5%. При этом общая стоимость материалов при применении тяжелого бетона классов В20...В40 оказалась ниже на 1,7%...38,1%, чем при ВПБ60 и ВПБ80.

Несмотря на перечисленные выше преимущества, на сегодняшний день в Республике Татарстан и России песчаный бетон не находит широкого применения. Его использование ограничивается покрытиями для полов промышленных зданий, а также изготовлением мелкоштучных и различных декоративных архитектурно-отделочных изделий.

В соответствии с вышесказанным, необходимо продолжать работу по проектированию из ВПБ различных строительных конструкций, в т.ч. и несущих. Единственным критерием эффективности его использования должна быть экономическая целесообразность. В связи с этим рассматриваемая в статье тема является актуальной для развития строительной отрасли как Республики Татарстан, так и России в целом.

Цель исследований состояла в выявлении экономической целесообразности изготовления многопустотных плит перекрытий высотой 220 мм, имеющих круглые пустоты диаметром 159 мм, ненапрягаемую арматуру (серия 1.141-1, выпуск 60) и

предварительно напряженную арматуру класса А800 (серия 1.141-1, выпуск 63), из высокопрочного песчаного бетона классов ВПБ60 и ВПБ80 в сравнении с плитами из тяжелого бетона классов В15...В80 применительно к городу Казань.

Задачами исследований были следующие:

1. выявить влияние повышения класса тяжелого и высокопрочного песчаного бетона многопустотных плит перекрытий с ненапрягаемой и предварительно напряженной арматурой на требуемый и принятый расход стали, а также на общую стоимость материалов;
2. выполнить сравнение технико-экономических показателей плит из высокопрочного песчаного бетона классов ВПБ60 и ВПБ80 с показателями применяемых в типовой серии плит с ненапрягаемой арматурой из тяжелого бетона класса В15 и предварительно напряженных плит с напрягаемой арматурой класса А800 из тяжелого бетона класса В20.

2. Материалы и методы

Исследовались железобетонные многопустотные плиты перекрытий из тяжелого бетона средней прочности классов В15, В25, В40 и тяжелого высокопрочного бетона классов В60, В80 (с ненапрягаемой арматурой), из тяжелого бетона средней прочности классов В20, В30, В40 и тяжелого высокопрочного бетона классов В60, В80 (с предварительно напряженной арматурой), высокопрочного песчаного бетона классов ВПБ60 и ВПБ80 (с ненапрягаемой и предварительно напряженной арматурой). Размеры в плане плит с ненапрягаемой арматурой составляют 2380×990 мм, 2380×1490 мм, 4180×990 мм, 4180×1490 мм, с предварительно напряженной – 4780×990 мм, 4780×1490 мм, 6280×990 мм, 6280×1490 мм.

Расчетная нагрузка без учета собственного веса плит составляла 3 и 8 кН/м². Длина плит и нагрузки приняты минимальными и максимальными, применяемыми в типовой серии. Класс рабочей продольной рабочей арматуры – А500С (в плитах с ненапрягаемой арматурой), А800 (в плитах с предварительно напряженной арматурой), поперечной и конструктивной арматуры – В500С, монтажных петель – А240С. Способ натяжения – электротермический на упоры формы. Было рассмотрено 16 вариантов плит, отличающихся типоразмерами и (или) величиной нагрузки. С учетом различных вариантов плит, видов и классов бетона общее число рассмотренных случаев составило 112.

Были выполнены расчеты плит по I и II группам предельных состояний в стадии эксплуатации. При этом использовались следующие нормативные документы: СП 63.13330.2018 «СНиП 52-01-2003 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения» (с изменением № 1), СП 311.1325800.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции из высокопрочных бетонов. Правила проектирования», методическое пособие «Расчет железобетонных конструкций без предварительно напряженной арматуры (к СП 63.13330.2012)» - М., 2015, «Методическое пособие по расчету предварительно напряженных железобетонных конструкций (к СП 63.13330.2012) - М., 2015 и «Инструкция по расчету и проектированию конструкций из высокопрочных тяжелых бетонов классов В60-В90 и мелкозернистых бетонов классов В50-В90» - М., 2015.

Прочностные и деформативные характеристики тяжелого бетона и арматуры принимались в соответствии с вышеуказанными нормами, а высокопрочного песчаного бетона классов ВПБ60 и ВПБ80 – согласно результатам исследований кафедры ТСМиК КГАСУ, полученных для бетонов на песках местных месторождений. Для тяжелого бетона класса В80 и высокопрочного песчаного бетона класса ВПБ80 значения расчетного сопротивления бетона осевому сжатию (R_b) и растяжению (R_{bt}) приняты с учетом понижающего коэффициента, учитывающего увеличение хрупкости высокопрочных бетонов в связи с уменьшением деформаций ползучести ($\gamma_{b,br}$), равного

$$\gamma_{b,br}=(360-B)/300, \quad (1)$$

где В – класс бетона.

Коэффициент надежности по ответственности (γ_n) принимался равным 1,0.

Для автоматизации расчетов было составлено 8 блок-схем и соответствующая им единая программа расчета в MS Excel, тестирование которой показало полную сходимость с результатами ручного счета. По данной программе были выполнены расчеты для всех указанных выше 112 случаев различных вариантов плит, видов и классов бетона.

Конструирование плит выполнялось с соблюдением следующих конструктивных требований. Продольная рабочая арматура устанавливалась не реже, чем через две пустоты. В случае отсутствия необходимости по расчету поперечная арматура не устанавливалась. Минимальный диаметр арматуры класса А500С – 6 мм, А800 – 10 мм, В500С – 3 мм. Сетки и каркасы изготавливались с выполнением условия свариваемости. Конструкция монтажных петель принималась по типовой серии.

Для всех рассмотренных случаев с помощью составленной в MS Excel программы определялся расход материалов (бетона и арматуры), а также суммарная их стоимость. Стоимость обоих видов бетона и арматуры была принята по ценам, актуальным для города Казани на октябрь 2021 г.

3. Результаты

Некоторые результаты расчетов приведены на рис. 1...4, на которых принята следующая маркировка плит: «ПК» - плита круглопустотная, первая цифра – длина плиты в дм, вторая – ширина в дм, третья – расчетная нагрузка без учета собственного веса плиты, кН/м².

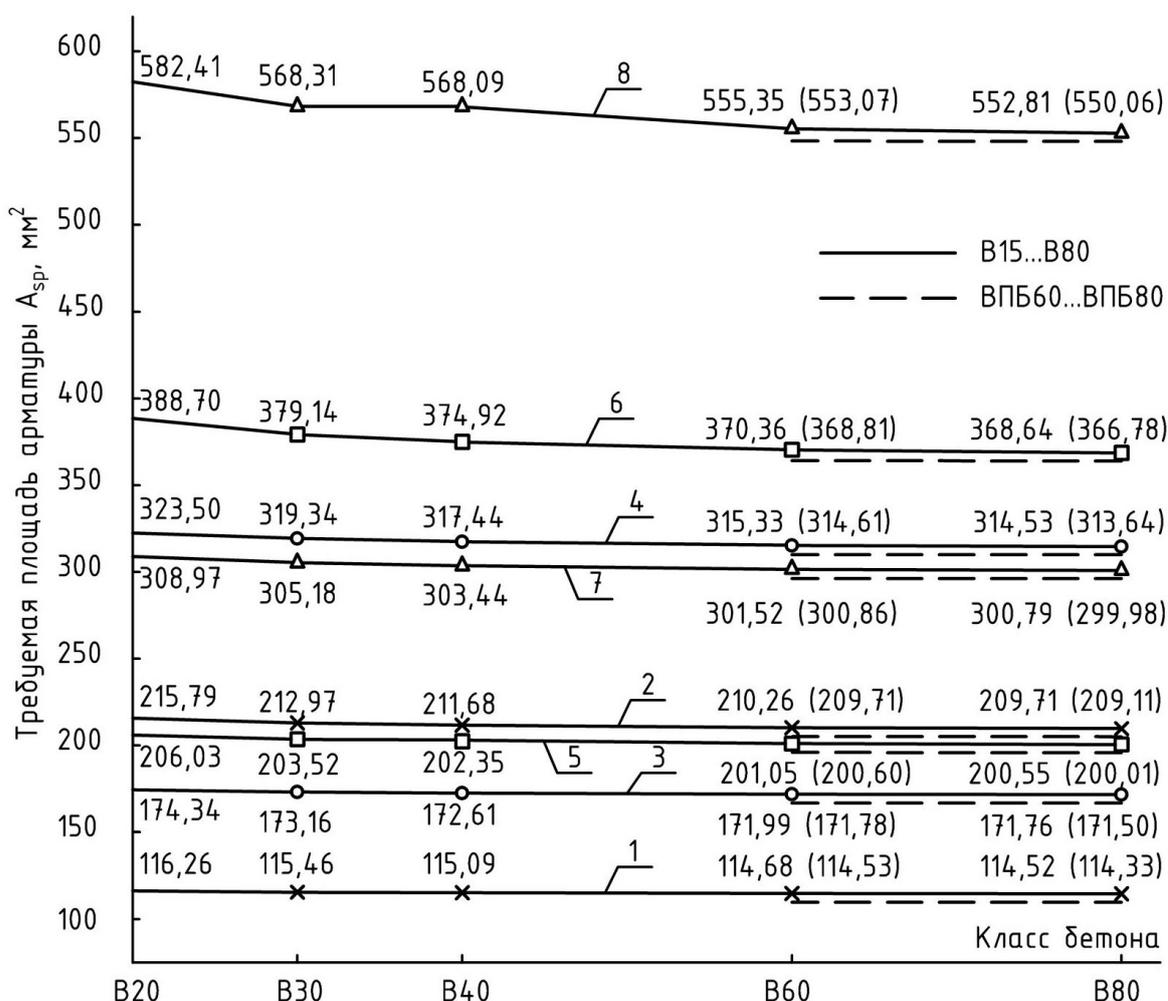


Рис. 1 Графики зависимости требуемой площади предварительно напряженной арматуры от вида и класса бетона. 1 – ПК48.10.3; 2 - ПК48.10.8; 3 - ПК48.15.3; 4 - ПК48.15.8; 5 – ПК63.10.3; 6 - ПК63.10.8; 7 - ПК63.15.3; 8 - ПК63.15.8 (иллюстрация авторов). В скобках приведены значения для классов ВПБ60 и ВПБ80

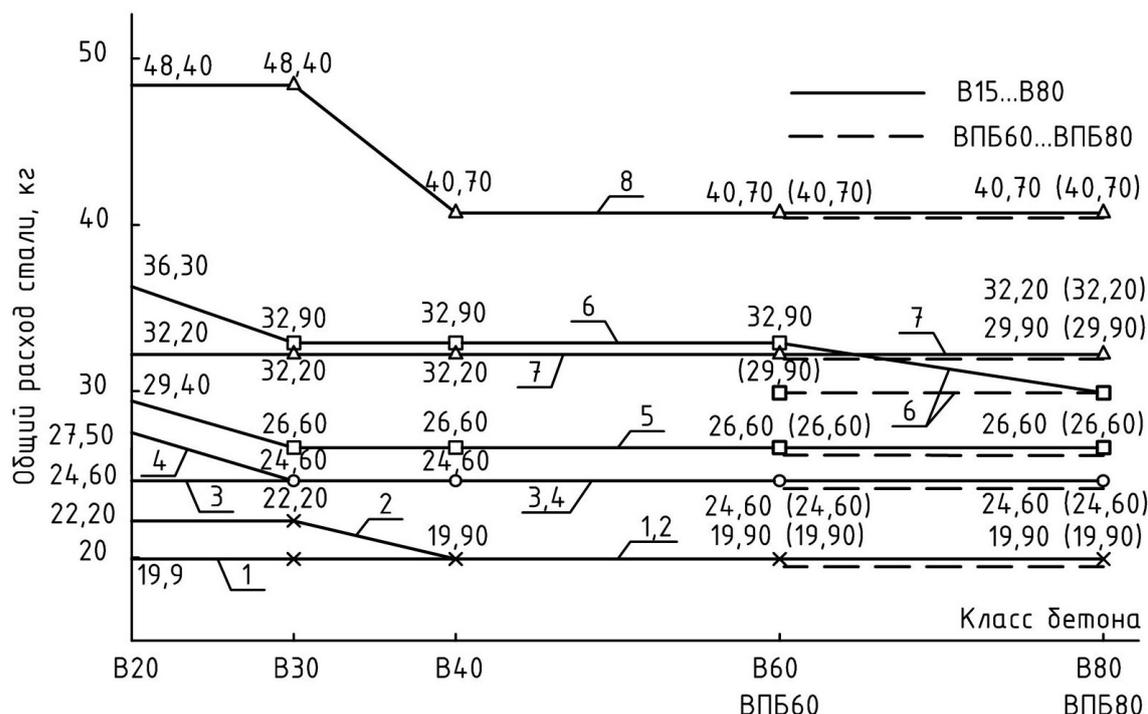


Рис. 2 Графики зависимости принятого общего расхода стали в предварительно напряженных плитах от вида и класса бетона. 1 – ПК48.10.3; 2 – ПК48.10.8; 3 – ПК48.15.3; 4 – ПК48.15.8; 5 – ПК63.10.3; 6 – ПК63.10.8; 7 – ПК63.15.3; 8 – ПК63.15.8 (иллюстрация авторов). В скобках приведены значения для классов VПБ60 и VПБ80

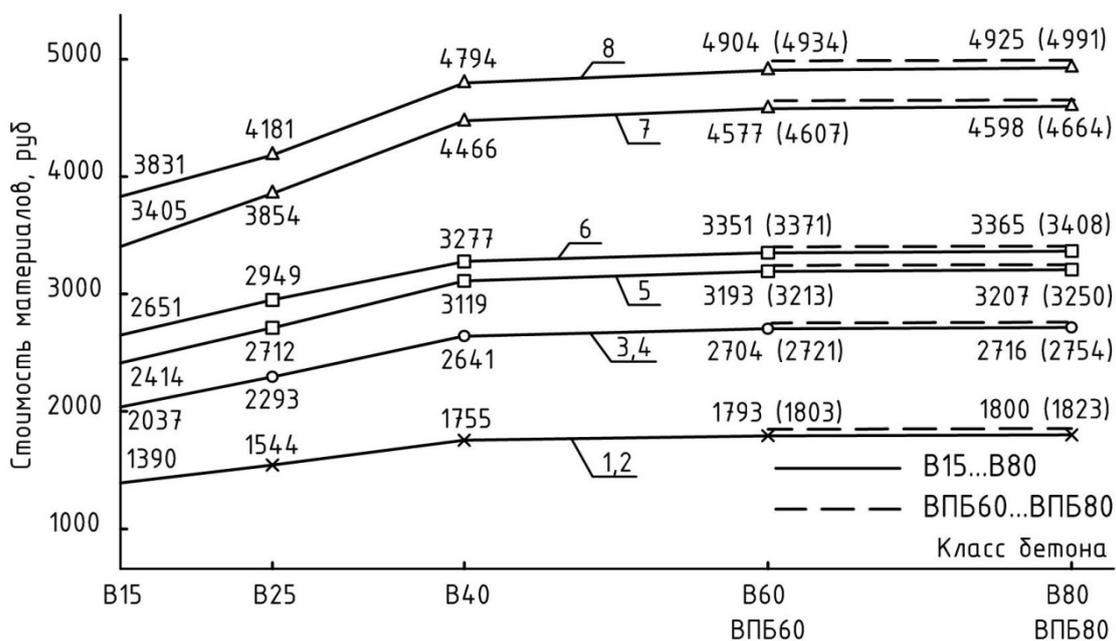


Рис. 3 Графики зависимости общей стоимости материалов плит с ненапрягаемой арматурой от вида и класса бетона. 1 – ПК24.10.3; 2 – ПК24.10.8; 3 – ПК24.15.3; 4 – ПК24.15.8; 5 – ПК42.10.3; 6 – ПК42.10.8; 7 – ПК42.15.3; 8 – ПК42.15.8 (иллюстрация авторов). В скобках приведены значения для классов VПБ60 и VПБ80

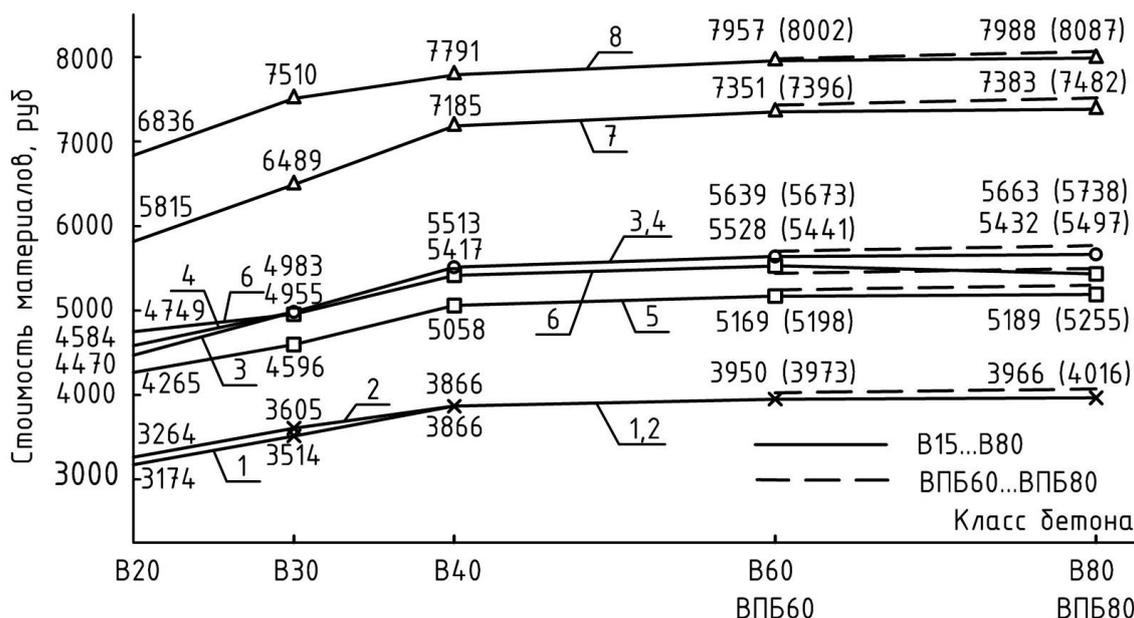


Рис. 4 Графики зависимости общей стоимости материалов плит с предварительно напряженной арматурой от вида и класса бетона. 1 – ПК48.10.3; 2 - ПК48.10.8; 3 - ПК48.15.3; 4 - ПК48.15.8; 5 – ПК63.10.3; 6 - ПК63.10.8; 7 - ПК63.15.3; 8 - ПК63.15.8 (иллюстрация авторов). В скобках приведены значения для классов ВПБ60 и ВПБ80

Сравнение технико-экономических показателей плит из тяжелого бетона классов В15...В80, ВПБ60 и ВПБ80 с ненапрягаемой и предварительно напряженной арматурой для всех рассмотренных случаев показало следующее:

- с повышением класса тяжелого и высокопрочного песчаного бетона требуемая площадь сечения ненапрягаемой (A_s) и предварительно напряженной арматуры (A_{sp}) снижается. Так, в плитах с ненапрягаемой арматурой при увеличении класса тяжелого бетона с В15 до В80 уменьшение требуемой A_s составило от 0,51 % до 3,18 % в зависимости от типоразмера плиты и величины нагрузки, а с ВПБ60 до ВПБ80 – от 0,04 % до 0,23 %. В предварительно напряженных плитах при увеличении класса тяжелого бетона с В20 до В80 уменьшение требуемой A_{sp} составило от 1,48 % до 5,16 %, а с ВПБ60 до ВПБ80 – от 0,16 % до 0,55 % (рис. 1);

- применение высокопрочного песчаного бетона классов ВПБ60 и ВПБ80 по сравнению с тяжелым бетоном классов В15 и В20 уменьшает требуемую площадь сечения арматуры A_s на 0,56...3,39 %, арматуры A_{sp} - на 1,63...5,64 % (рис. 1);

- изготовление плит из высокопрочного песчаного бетона классов ВПБ60 и ВПБ80 по сравнению с их изготовлением из высокопрочного тяжелого бетона классов В60 и В80 ведет к снижению требуемой площади сечения арматуры A_s на 0,06...0,41 %, арматуры A_{sp} на 0,28...0,97 % (рис. 1);

- повышение класса тяжелого и высокопрочного песчаного бетона практически никак не сказывается на принятом общем расходе стали, который, как правило, остается постоянным для конкретного типоразмера плиты для одной нагрузки. Он снизился в плитах с ненапрягаемой арматурой лишь в 2 случаях из 56 (т. е. в 3,5 % случаев) - на 9,8 % и 10,4 % - и в преднапряженных плитах в 7 случаях из 56 (12,5 %) - на 9,1...15,9 % (рис. 2);

- применение высокопрочного песчаного бетона классов ВПБ60 и ВПБ80 по сравнению с высокопрочным тяжелым бетоном классов В60 и В80 в 31 случае из 32 дает одинаковый принятый общий расход стали. Лишь в 1 случае (3,1 %) - в плите ПК63.10.8 при классе бетона ВПБ60 - произошло снижение на 3,0 кг (9,1 %) по сравнению с применением бетона класса В60 (рис. 2);

- по общей стоимости материалов (арматуры и бетона) во всех случаях наиболее экономичным оказалось применение тяжелого бетона минимального класса (В15 в плитах с ненапрягаемой арматурой и В20 в предварительно напряженных) (рис. 3 и рис. 4). Экономия по сравнению с применением тяжелого бетона класса В80 составила в

плитах с ненапрягаемой арматурой от 26,9 % до 35,0 %, в предварительно напряженных – от 14,4% до 27,0 %. По сравнению с применением высокопрочного песчаного бетона класса ВПБ80 - от 28,6 % до 37,0 % в плитах с ненапрягаемой арматурой и от 15,8 % до 28,7 % в предварительно напряженных;

- общая стоимость материалов при изготовлении как плит с ненапрягаемой арматурой, так и предварительно напряженных плит из высокопрочного тяжелого бетона классов В60 и В80 практически всегда ниже, чем при изготовлении их из высокопрочного песчаного бетона ВПБ60 и ВПБ80, соответственно (на 0,6...0,7 % при сравнении В60 и ВПБ60 и на 1,2...1,4 % при сравнении В80 и ВПБ80). Только в 1 случае из 16 (6,3 %) - для плиты ПК63.10.8 при применении тяжелого бетона класса В60 - она оказалась выше на 1,6 % по сравнению с применением высокопрочного песчаного бетона класса ВПБ60, что связано с большим на 3,0 кг (9,1 %) общим расходом стали (рис. 2).

Кроме того, в результате расчетов было выявлено, что:

- в 98 случаях из 112 (87,5 %) поперечная арматура по расчету не требовалась и поэтому не устанавливалась;
- в 98 случаях из 112 (87,5 %) нормальные трещины не образовывались;
- во всех случаях продольная рабочая арматура, принятая из расчета по I группе предельных состояний, оказывалась достаточной для выполнения требований II группы.

4. Обсуждение

Анализ полученных результатов показывает, что повышение класса тяжелого и высокопрочного песчаного бетона ведет к снижению требуемого количества продольной растянутой ненапрягаемой арматуры A_s и предварительно напряженной арматуры A_{sp} , а также, в большинстве случаев, к отказу от установки поперечной арматуры.

В то же время это практически никак не сказывается на принятом общем расходе стали, который, как правило, остается постоянным для конкретного типоразмера плиты для одной нагрузки.

Во всех случаях наиболее экономичным по общей стоимости материалов оказалось применение тяжелого бетона минимального класса (В15 в плитах с ненапрягаемой арматурой и В20 в плитах с предварительно напряженной арматурой). Изготовление плит из высокопрочного песчаного бетона классов ВПБ60 и ВПБ80 оказалось самым затратным по стоимости материалов. По сравнению с плитами из тяжелого бетона класса В15 с ненапрягаемой арматурой они оказались дороже на 28,6 %...37,0 %, по сравнению с плитами из тяжелого бетона класса В20 с предварительно напряженной арматурой – на 15,8 %...28,7 %.

Полученные результаты явились следствием: 1.невозможности увеличения или уменьшения высоты сечения плит, что значительно ограничивало увеличение плеча внутренней пары сил при повышении прочности бетона сжатой зоны, а также не приводило к снижению расхода бетона; 2.необходимости выполнения при армировании растянутой продольной и поперечной арматурой конструктивных требований; 3.получения во всех случаях величины относительной высоты сжатой зоны, не превышающей ее граничного значения $\xi \leq \xi_R$, в результате чего сжатая арматура устанавливалась по конструктивным требованиям.

Во всех ранее проведенных аналогичных исследованиях [17], [18], [19], указанных в разделе «Введение», применение высокопрочного песчаного бетона классов ВПБ60 и ВПБ80 приводило к снижению общего расхода стали, а в работах [17] и [18] также и общей стоимости материалов. Это явилось следствием:

1. возможности снижения сечения элементов ([17], [18]);
2. как правило, превышением полученной по расчету площади рабочей арматуры конструктивных значений;
3. другим, по сравнению с настоящим временем, соотношением стоимости арматуры и бетона на момент проведения исследований.

Полученные в настоящих исследованиях результаты являются значимыми, т. к. они позволили выявить экономичные решения по расходу материалов в зависимости от применяемого вида и класса тяжелого и высокопрочного песчаного бетона для многопустотных плит перекрытий длиной до 6,3 м с ненапрягаемой арматурой (при

классе арматуры А500С) и с предварительно напряженной арматурой (при классе арматуры А800).

В дальнейшем предполагается выполнить аналогичные исследования для многопустотных плит с другой высотой сечения, формой, размерами пустот и способом изготовления ($h=260$ мм с круглыми пустотами диаметром 180 мм и грушевидными пустотами, $h=300$ мм с круглыми пустотами диаметром 203 мм и др., предварительно напряженных плит стендового безопалубочного формования) и классами напрягаемой арматуры. Кроме того, планируется провести аналогичные исследования для других видов несущих железобетонных конструкций.

5. Заключение

1. Повышение класса тяжелого и высокопрочного песчаного бетона ведет к снижению требуемого количества продольной растянутой ненапрягаемой и предварительно напряженной арматуры, а также, в большинстве случаев, к отказу от установки поперечной арматуры. В то же время это практически никак не сказывается на принятом общем расходе стали, который, как правило, остается постоянным для конкретного типоразмера плиты для одной нагрузки.

2. Во всех случаях наиболее экономичным по общей стоимости материалов оказалось применение тяжелого бетона минимального класса (В15 в плитах с ненапрягаемой арматурой и В20 в плитах с предварительно напряженной арматурой). Изготовление плит из высокопрочного песчаного бетона классов ВПБ60 и ВПБ80 оказалось неэкономичным.

3. Основные полученные результаты объясняются следующим: 1) невозможностью увеличения или уменьшения высоты сечения плит, что значительно ограничивало увеличение плеча внутренней пары сил при повышении прочности бетона сжатой зоны, а также не приводило к снижению расхода бетона; 2) необходимостью выполнения при армировании растянутой продольной и поперечной арматурой конструктивных требований; 3) получением во всех случаях значения относительной высоты сжатой зоны, не превышающей ее граничного значения, в результате чего сжатая арматура устанавливалась по конструктивным требованиям.

4. Выполненные исследования позволили выявить экономичные решения многопустотных плит перекрытий длиной до 6,3 м с ненапрягаемой арматурой класса А500С и с предварительно напряженной арматурой класса А800 с учетом применяемого вида и класса бетона.

5. В дальнейшем предполагается выполнить аналогичные исследования для многопустотных плит с другими типоразмерами, формой и размером пустот, способом изготовления и классами напрягаемой арматуры. Планируется также провести исследования для других видов несущих железобетонных конструкций.

Список библиографических ссылок

1. Mindess S. Developments in the formulation and reinforcement of concrete. 2019. 423 p. DOI:10.1016/C2017-0-03347-5.
2. Илюхина Е.А., Лахман С.И., Миллер А.Б., Травуш В.И. Конструктивные решения высотного здания «Лахта Центр» в Санкт-Петербурге // Строительные науки. 2019. № 3. С. 110-121.
3. Карпенко Н.И., Каприелов С.С., Безгоднов И.М., Моисеенко Г.А., Степанов М.В. Исследование структурных деформаций мелкозернистого высокопрочного бетона и фибробетона с рациональным содержанием фибры // Известия высших учебных заведений. Серия «Технология текстильной промышленности». 2018. № 3. С. 227-230.
4. Морозов Н.М., Хозин В.Г., Мугинов Х.Г. Особенности формирования структуры модифицированных песчаных бетонов // Строительные материалы. 2010. № 9. С. 72-73.
5. Boucedra A., Bederina M., Ghernouti Y. Study of the acoustical and thermo-mechanical properties of dune and river sand concretes containing recycled plastic aggregates //

- Construction and Building Materials. 2020. V. 256. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2020.119447.
6. Ouassila B., Houria H., Leila K., Mouloud B., Assia A., Chaher R.. Valorization of marble's waste as a substitute in sand concrete // *Advances in Concrete Construction*. 2020. № 9 (2). P. 217-225. DOI:10.12989/acc.2020.9.2.217.
 7. Nguyen T. S., Chu L. H. Effect of ground blast furnace slag in replacement of cement in ternary binder on performance of sand concrete // *Lecture Notes in Civil Engineering* 2020. V. 54 P. 403-408. DOI:10.1007/978-981-15-0802-8_62.
 8. Yan, W., Wu, G., & Dong, Z. Optimization of the mix proportion for desert sand concrete based on a statistical model // *Construction and Building Materials*. 2019. V. 226. P. 469-482. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2019.07.287/
 9. Thangapandi K., Anuradha R., Awoyera P. O., Gobinath R., Archana N., Berlin M., Oladimeji O. B. Durability phenomenon in manufactured sand concrete: Effects of zinc oxide and alcofine on behavior // *Silicon*. 2021. V. 13(4). P. 1079-1085. DOI:10.1007/s12633-020-00494-2.
 10. Tolstoy A. D., Fomina E. V., Milkina A. S. Durability of fine-grained high-strength concrete in corrosive environment. Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. V. 753 (3). DOI:10.1088/1757-899X/753/3/032036.
 11. Peng Z., Li D., Zhou Y., Ren, S.. Failure criterion in stress space for coral reef sand concrete under biaxial compression. *Wuhan Ligong Daxue Xuebao/Journal of Wuhan University of Technology*. 2018. V. 40 (5). P. 66-70. DOI:10.3963/j.issn.1671-4431.2018.05.011.
 12. Li Z., Wang G., Yang S., Ju G. Experimental study on mechanical properties and stress-strain constitutive relations of desert sand concrete. *Yingyong Lixue Xuebao // Chinese Journal of Applied Mechanics*. 2019. V. 36 (5). P. 1131-1137. DOI:10.11776/cjam.36.05.B063.
 13. Li B., Yin L., Fan L. Analysis on flexural fatigue performance of manufactured sand concrete. *Jianzhu Cailiao Xuebao // Journal of Building Materials*. 2017. V. 20 (5). P. 801-807. DOI:10.3969/j.issn.1007-9629.2017.05.024.
 14. Dong Z., Wu G., Xu Y. Bond and flexural behavior of sea sand concrete members reinforced with hybrid steel-composite bars presubjected to wet-dry cycles // *Journal of Composites for Construction*. 2017. V. 21 (2). DOI:10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000749.
 15. Mukhametrakhimov R., Lukmanova L. Influence of the technological properties of cement-sand mortar on the quality of 3D printed products, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. V. 890 012082 DOI:10.1088/1757-899X/890/1/012082.
 16. Mukhametrakhimov R.K., Lukmanova L.V. Structure and properties of mortar printed on a 3D printer // *Magazine of Civil Engineering*. 2021. V. 102 (2). Article number 10206. DOI: 10.18720/MCE.10206.
 17. Palagin N., Dul'miyeva A. Cost-effective design of long cylindrical shells of high-strength sand concrete, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. V. 890 012078. DOI: 10.1088/1757-899X/890/1/012078.
 18. Палагин Н.Г., Никитин Г.П., Садрутдинова А.Р. Возведение пологих оболочек положительной гауссовой кривизны из высокопрочного песчаного бетона и его экономическая эффективность: сб. ст. V Международной (XI Всероссийской) конференции – Строительство и застройка: жизненный цикл – 2020 / Чебоксарский государственный университет. Чебоксары, 2020. С. 142–149.
 19. Palagin N., Nikitin G., Trunov A. Erection of solid columns of one-storey industrial buildings with bridge cranes made of high-strength sandy concrete and its economic efficiency, *E3S Web of Conferences*. 2021. V. 274. 03028. DOI: org/10.1051/e3sconf/2021/274/03028.

Palagin Nikolay Grigorievich

candidate of technical sciences, associate professor

Email: pal_nik11@mail.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

Akhmetov Marat Marselevich

Engineer

Email: marat9701@yandex.ru

ООО «Artemida»

The organization address: 426010, Russia, Izhevsk, Autonomous st., 87

Gridchin Anatoly Mitrofanovich

doctor of Technical Sciences

Email: prezident@intbel.ru

Cherevatova Alla Vasilevna

doctor of Technical Sciences

Email: cherry_611@mail.ru

Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov

The organization address: 308012, Russia, Belgorod, Kostyukova st., 46

Economic feasibility of manufacturing hollow-core floor slabs from high-strength sand concrete**Abstract**

Problem statement. Studies were carried out to identify the economic feasibility of manufacturing hollow-core floor slabs with a height of 220 mm, having round voids with a diameter of 159 mm, non-tensioned reinforcement (series 1.141-1, issue 60) and prestressed reinforcement class A800 (series 1.141-1, issue 63), from high-strength sand concrete of classes VPB60 and VPB80 in comparison with slabs of heavy-weight concrete of classes B15 ... B80 in relation to the city of Kazan.

The research is due to the absence of large aggregate deposits in a large part of the European territory of the Russian Federation or the presence of deposits of sedimentary rocks that are of limited use in reinforced concrete, with the widespread presence of sand, as well as the well-known economic efficiency of using high-strength concrete in the manufacture of load-bearing structures.

The objectives of the research consisted in comparing the technical and economic indicators of slabs made of high-strength sand concrete of classes VPB60 and VPB80 with indicators of slabs made of heavy-weight concrete of classes B15 ... B80.

The studies were carried out by the engineering method of calculation according to the current standards using the MS Excel PC. The strength and deformation characteristics of high-strength sand concrete were taken based on the results of studies of the Department of technology of building materials, products and structures (Kazan State University of Architecture and Engineering), obtained for concrete on the sands of local deposits.

Results. Raising the class of the heavy-weight and high-strength sand concrete does not affect the overall steel consumption. In terms of the cost of materials, in all cases, the most economical is the use of heavy-weight concrete of the minimum class (B15 in slabs with non-tensioned reinforcement and B20 in slabs with prestressed reinforcement).

Conclusions. The significance of the results obtained for the construction industry consists in identifying cost-effective solutions for the consumption of materials, depending on the class of heavy-weight and high-strength sand concrete for hollow-core floor slabs up to 6.3 m in length with non-tensioned reinforcement of class A500C and with prestressed reinforcement of class A800.

Key words: high-strength sand concrete, heavy-weight concrete, hollow-core floor slabs with non-stressed and prestressed reinforcement, design load, standard size, economic efficiency.

For citation: Palagin N. G., Akhmetov M. M., Gridchin A. M., Cherevatova A. V. Economic feasibility of manufacturing hollow-core floor slabs from high-strength sand concrete // *Izvestiya KGASU*. 2021. №4 (58). P. 26-38. DOI: 10.52409/20731523_2021_4_26.

References

1. Mindess S. Developments in the formulation and reinforcement of concrete. 2019. 423 p. DOI:10.1016/C2017-0-03347-5.
2. Iyukhina E.A., Lakhman S.I., Miller A.B., Travush V.I. Constructive solutions of the high-rise building "Lakhta Center" in St. Petersburg // *Construction sciences*. 2019. № 3. P. 110-121.
3. Karpenko N.I., Kaprielov S.S., Bezgodov I.M., Moiseenko G.A., Stepanov M.V. Investigation of structural deformations of fine-grained high-strength concrete and fiber-reinforced concrete with a rational fiber content // *Izvestiya Vyss.Uchebnykh Zaved. Seriya Technology Textile Industry*. 2018. № 3. P. 227-230.
4. Morozov N.M., Khozin V.G., Muginov Kh.G. Features of the formation of the structure of modified sand concretes // *Building Materials Journal*. 2010. № 9. P. 72-73.
5. Boucedra A., Bederina M., Ghernouti Y. Study of the acoustical and thermo-mechanical properties of dune and river sand concretes containing recycled plastic aggregates // *Construction and Building Materials*. 2020. V. 256. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2020.119447.
6. Ouassila B., Houria H., Leila K., Mouloud B., Assia A., Chaheer R. Valorization of marble's waste as a substitute in sand concrete // *Advances in Concrete Construction*. 2020. № 9 (2). P. 217-225. DOI:10.12989/acc.2020.9.2.217.
7. Nguyen T. S., Chu L. H. Effect of ground blast furnace slag in replacement of cement in ternary binder on performance of sand concrete // *Lecture Notes in Civil Engineering* 2020. V. 54 P. 403-408. DOI:10.1007/978-981-15-0802-8_62.
8. Yan, W., Wu, G., & Dong, Z. Optimization of the mix proportion for desert sand concrete based on a statistical model // *Construction and Building Materials*. 2019. V. 226. P. 469-482. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2019.07.287/
9. Thangapandi K., Anuradha R., Awoyera P. O., Gobinath R., Archana N., Berlin M., Oladimeji O. B. Durability phenomenon in manufactured sand concrete: Effects of zinc oxide and alcofine on behavior // *Silicon*. 2021. V. 13(4). P. 1079-1085. DOI:10.1007/s12633-020-00494-2.
10. Tolstoy A. D., Fomina E. V., Milkina A. S. Durability of fine-grained high-strength concrete in corrosive environment. Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. V. 753 (3). DOI:10.1088/1757-899X/753/3/032036.
11. Peng Z., Li D., Zhou Y., Ren, S. Failure criterion in stress space for coral reef sand concrete under biaxial compression. *Wuhan Ligong Daxue Xuebao/Journal of Wuhan University of Technology*. 2018. V. 40 (5). P. 66-70. DOI:10.3963/j.issn.1671-4431.2018.05.011.
12. Li Z., Wang G., Yang S., Ju G. Experimental study on mechanical properties and stress-strain constitutive relations of desert sand concrete. *Yingyong Lixue Xuebao // Chinese Journal of Applied Mechanics*. 2019. V. 36 (5). P. 1131-1137. DOI:10.11776/cjam.36.05.B063.
13. Li B., Yin L., Fan L. Analysis on flexural fatigue performance of manufactured sand concrete. *Jianzhu Cailiao Xuebao // Journal of Building Materials*. 2017. V. 20 (5). P. 801-807. DOI:10.3969/j.issn.1007-9629.2017.05.024.
14. Dong Z., Wu G., Xu Y. Bond and flexural behavior of sea sand concrete members reinforced with hybrid steel-composite bars presubjected to wet-dry cycles // *Journal of Composites for Construction*. 2017. V. 21 (2). DOI:10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000749.
15. Mukhametrakhimov R., Lukmanova L. Influence of the technological properties of cement-sand mortar on the quality of 3D printed products, IOP Conference Series:

- Materials Science and Engineering. 2020. V. 890 012082 DOI:10.1088/1757-899X/890/1/012082.
16. Mukhametrakhimov R.K., Lukmanova L.V. Structure and properties of mortar printed on a 3D printer // Magazine of Civil Engineering. 2021. V. 102 (2). Article number 10206. DOI: 10.18720/MCE.10206.
17. Palagin N., Dul'miyeva A. Cost-effective design of long cylindrical shells of high-strength sand concrete, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. V. 890 012078. DOI: 10.1088/1757-899X/890/1/012078.
18. Palagin N.G., Nikitin G.P., Sadrutdinova A.R. Erection of shallow shells of positive Gaussian curvature from high-strength sandy concrete and its economic efficiency: Collection of articles. Art. V International (XI All-Russian) conference - Construction and development: life cycle - 2020 / Cheboksary State University. Cheboksary, 2020, P. 142–149.
19. Palagin N., Nikitin G., Trunov A. Erection of solid columns of one-storey industrial buildings with bridge cranes made of high-strength sandy concrete and its economic efficiency, E3S Web of Conferences. 2021. V. 274. 03028. DOI: org/10.1051/e3sconf/2021/274/03028.