

УДК 691.33

Макаренко Сергей Викторович

кандидат технических наук, доцент

E-mail: makarenko_83_07@mail.ru

Лозовский Борис Михайлович

аспирант

E-mail: borislozovskiy@mail.ru

Иркутский национальный исследовательский технический университет

Адрес организации: 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 83

Хохряков Олег Викторович

кандидат технических наук, доцент

E-mail: olvik@list.ru

Хозин Вадим Григорьевич

доктор технических наук, профессор

E-mail: khozin.vadim@yandex.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

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

Влияние активных пуццолановых наполнителей на свойства мелкозернистого цементного бетона

Аннотация

Постановка задачи. Цель работы – изучение способа повышения прочности мелкозернистого (песчаного) бетона при совместном использовании в его составе активных пуццолановых наполнителей природного и техногенного происхождения.

Результаты. Представлены результаты совместного влияния золы-уноса и метакеолина на технологические и физико-механические показатели мелкозернистого (песчаного) цементного бетона (распływ конуса, воздухосодержание и плотность бетонной смеси, прочность при изгибе и сжатии). Методом математического планирования эксперимента выведены уравнения регрессии для подвижности и прочности бетона, а также оценен вклад каждого наполнителя в кинетику его твердения. Достоверность результатов работы обоснована расчетами доверительного интервала и однородности дисперсий с помощью критериев Кохрена, а также проверки модели на адекватность с учетом коэффициентов Фишера.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительства состоит в возможности использования активных наполнителей как техногенного, так и природного происхождения. Показано, что наибольший вклад в кинетику твердения в раннем возрасте (до 7 суток) вносит метакеолин, а на поздних сроках твердения (28 суток) – зола-уноса. Благодаря их совместному использованию обеспечивается получение высокопрочных мелкозернистых бетонов с прочностью при сжатии свыше 100 МПа.

Ключевые слова: мелкозернистый бетон, метакеолин, зола-уноса, суперпластификатор, прочность.

Для цитирования: Макаренко С. В., Лозовский Б. М., Хохряков О. В., Хозин В. Г. Влияние активных пуццолановых наполнителей на свойства мелкозернистого цементного бетона // Известия КГАСУ. 2020. № 3 (53). С. 39–46.

1. Введение

В настоящее время в Российской Федерации под влиянием западных и турецких строительных фирм активно развивается монолитное строительство [1-3], в т.ч. в домостроении, успешно заполняя нишу, образованную уничтоженными заводами крупнопанельного домостроения (КПД) и домостроительными комбинатами (ДСК) советского прошлого. И это несмотря на то, что сборному железобетону в нашей стране с самым суровым климатом альтернативы нет, и КПД по экономическим показателям и скорости возведения [4-6], безусловно, превосходит монолитное, о чем свидетельствует

европейский опыт, в частности, Финляндии и др. [7]. Однако отсутствие собственной стратегии домостроения и доминирование импортного мышления вынуждает строительные подрядные организации и проектировщиков ориентироваться на монолитный способ домостроения. Очевидно, что это обуславливает необходимость применения высокоподвижных бетонных смесей [8, 9], и особенно, мелкозернистых (песчаных) смесей [10-12], поскольку во многих регионах остро ощущается дефицит крупного заполнителя [13]. Его месторождения либо отсутствуют, либо представлены слабыми осадочными породами. Ряд очевидных недостатков мелкозернистого бетона, к которым, например, относятся повышенные пористость и удельная поверхность твердой фазы, отсутствие жесткого каменного скелета, высокое содержание цементного камня и пр., сдерживают его широкое применение. Все эти недостатки, по мнению авторов, могут быть устранены путем повышения прочности мелкозернистого бетона.

2. Материалы и методы

Авторами была выполнена оценка одного из способов повышения прочности бетона за счет совместного использования в его составе активных пуццолановых наполнителей природного и техногенного происхождения [14, 15]. В качестве таковых были приняты:

1. Метакаолин (МК) месторождения «Журавлиный лог» – природный наполнитель, содержащий 93 % стеклофазы и 7 % кристаллической фазы, в состав которой входят реликтовая слюда и кварц. Удельная поверхность метакаолина $16500 \pm 500 \text{ см}^2/\text{г}$.

2. Зола-уноса с отвала ТЭЦ-9 ПАО «Иркутскэнерго» – техногенный наполнитель. Из данных рентгеноструктурного анализа выявлено, что зола на 35 % представлена кристаллической фазой, в которую входят 27 % муллита и 8 % кварца и на 65 % – алюмосиликатной стеклофазой. Зола с отвала представляла собой грубодисперсный порошок с удельной поверхностью $740 \text{ см}^2/\text{г}$. Перед использованием зола была высушена до постоянной массы и подвергнута домолу в вибрационно-шаровой мельнице до удельной поверхности $5400 \pm 200 \text{ см}^2/\text{г}$.

В качестве вяжущего был использован бездобавочный портландцемент ЦЕМ I 42,5Б Мордовского цементного завода (ГОСТ 31108). Мелкий заполнитель – кварцевый песок, рассеянный на три фракции: 1,25-5 мм – 60 %; 0,315-1,25 мм – 20 %; 0,315 мм и менее – 20 %. Суперпластификатор – Melflux 2651F на основе модифицированных эфиров поликарбоксилатов (АО «Еврохим-1»).

В соответствии с ГОСТ 310.4 были определены технологические и физико-механические свойства мелкозернистого бетона: для бетонной смеси подвижность по распылу конуса (РК), плотность ($\rho_{сс}$) – в мерном металлическом сосуде и воздухоудержание (ВВ) – с помощью объемера «Testing». Кинетику твердения мелкозернистого бетона оценивали по прочности при изгибе и сжатии согласно ГОСТ 310.4 на 3, 7 и 28 сутки путем испытания образцов-балочек $4 \times 4 \times 16 \text{ см}$ при их твердении после распалубки в нормальных условиях.

Для установления зависимости влияния наполнителей на свойства мелкозернистого бетона и сокращения объема экспериментальной работы авторами был использован метод математического планирования. Метод позволяет установить зависимость в виде степенного ряда или многомерного полинома:

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^K a_i x_i + \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^K a_{ij} x_i x_j + \dots, \quad (1)$$

где a_0, a_i, a_{ij} – эмпирические коэффициенты; x_i, x_j – значения уровней соответственно i -го и j -го факторов. При математическом планировании эксперимента опыты проводятся для того, чтобы определить коэффициенты модели, которые указывают на вклад каждого фактора в параметр оптимизации (отклик).

Матрица планирования представляла собой двухуровневый трехфакторный эксперимент (2^3). Факторы и интервал варьирования приведены в табл. 1, матрица планирования – в табл. 2. При этом постоянными факторами для всех составов являлись водоцементное отношение (В/Ц=0,39), расход цемента (Ц) 500 кг и песка (П) 1600 кг на 1 м^3 бетона. Выходными параметрами эксперимента (отклики) являлись распыл конуса бетонной смеси и прочность бетона в возрасте 3, 7, 28 суток нормального твердения.

Достоверность результатов работы обоснована расчетами доверительного интервала и однородности дисперсий с помощью критериев Кохрена, а также проверки модели на адекватность с учетом коэффициентов Фишера (табл. 5-6).

Таблица 1

Факторы и интервал варьирования

| Фактор | Расшифровка фактора | Уровень фактора | | | Интервал варьирования |
|----------------|--|-----------------|------|----|-----------------------|
| | | -1 | 0 | +1 | |
| X ₁ | содержание суперпластификатора, % от массы ЦЕМ | 0,5 | 0,75 | 1 | 0,25 |
| X ₂ | содержание золы-уноса, % от массы ЦЕМ | 5 | 10 | 15 | 5 |
| X ₃ | содержание метакаолина, % от массы ЦЕМ | 5 | 10 | 15 | 5 |

Таблица 2

Матрица планирования

| № состава | X ₀ | X ₁ | X ₂ | X ₃ |
|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 1 | + | + | + | - |
| 2 | + | - | + | - |
| 3 | + | + | - | - |
| 4 | + | - | - | - |
| 5 | + | + | + | + |
| 6 | + | - | + | + |
| 7 | + | + | - | + |
| 8 | + | - | - | + |

3. Результаты

На основании принятой матрицы планирования эксперимента были испытаны составы мелкозернистого бетона (табл. 3) с оценкой его технологических и физико-механических характеристик. Результаты испытания представлены в табл. 4.

Таблица 3

Составы и свойства мелкозернистой бетонной смеси и бетона

| № состава | Ц, кг/1м ³ | П, кг/1м ³ | Melflux, % | Зола-уноса, % | МК, % | В/Ц |
|-----------|-----------------------|-----------------------|------------|---------------|-------|------|
| 1 | 500 | 1600 | 1 | 5 | 5 | 0,39 |
| 2 | | | 0,5 | 5 | 5 | |
| 3 | | | 1 | 15 | 5 | |
| 4 | | | 0,5 | 15 | 5 | |
| 5 | | | 1 | 5 | 15 | |
| 6 | | | 0,5 | 5 | 15 | |
| 7 | | | 1 | 15 | 15 | |
| 8 | | | 0,5 | 15 | 15 | |

Таблица 4

| № состава | РК, мм | ВВ, % | Р _{бс} , кг/м ³ | Прочность, МПа, при изгибе в возрасте, сут | | Прочность (МПа), при сжатии в возрасте, сут | | |
|-----------|--------|-------|-------------------------------------|--|------|---|------|-------|
| | | | | 3 | 28 | 3 | 7 | 28 |
| | | | | | | | | |
| 1 | 240 | 4,1 | 2340 | 5,9 | 7,8 | 29,4 | 59,0 | 73,4 |
| 2 | 210 | 4,4 | 2330 | 5,8 | 8,4 | 35,6 | 51,2 | 82,4 |
| 3 | 270 | 2,6 | 2350 | 5,9 | 8,6 | 39,6 | 47,6 | 94,0 |
| 4 | 190 | 3,5 | 2300 | 5,8 | 8,5 | 37,6 | 53,2 | 85,0 |
| 5 | 210 | 3,4 | 2320 | 6,6 | 9,1 | 47,6 | 70,2 | 91,8 |
| 6 | 100 | 4,0 | 2280 | 7,4 | 9,3 | 53,0 | 78,0 | 102,4 |
| 7 | 215 | 4,2 | 2280 | 6,7 | 9,3 | 47,8 | 77,0 | 105,0 |
| 8 | 100 | 4,3 | 2280 | 7,2 | 10,2 | 53,2 | 84,8 | 105,6 |

Таблица 5

Значения коэффициентов Кохрена и среднего и максимального квадратичного отклонения по результатам испытания

| Наименование показателя | Значения показателей | | | |
|----------------------------------|---|---|---|---|
| | в возрасте 3 суток | в возрасте 7 суток | в возрасте 28 суток | ПК (расплав конуса) |
| $\max \hat{S}_2$ | 6,37 | 5,97 | 4,27 | 175 |
| $G_{\text{расч}}$ | 0,458 | 0,226 | 0,193 | 0,219 |
| $G_{\text{табл}}$ | 0,510 | 0,51 | 0,51 | 0,51 |
| Выводы об однородности дисперсии | $G_{\text{расч}} < G_{\text{табл}}$, дисперсия однородна | $G_{\text{расч}} < G_{\text{табл}}$, дисперсия однородна | $G_{\text{расч}} < G_{\text{табл}}$, дисперсия однородна | $G_{\text{расч}} < G_{\text{табл}}$, дисперсия однородна |
| $S_{\text{ср}}^2$ | 1,739 | 3,3045 | 2,76 | 100 |

Таблица 6

Значения коэффициентов Фишера и дисперсии адекватности модели

| Наименование показателя | Значения показателей | | | |
|--|---|---|---|---|
| | Прочность при сжатии в возрасте | | | Расплав конуса |
| | 3 суток | 7 суток | 28 суток | |
| $S_{2\text{ад}}$ | 3,46 | 15,52 | 28,42 | 507,81 |
| $F_{\text{набл}}$ | 1,99 | 4,69 | 10,292 | 5,1 |
| $F_{\text{табл}}$ | 19,3 | 19,3 | 19,3 | 19,3 |
| Проверка адекватности модели | модель адекватна, т.к. $F_{\text{набл}} < F_{\text{табл}}$ | модель адекватна, т.к. $F_{\text{набл}} < F_{\text{табл}}$ | модель адекватна, т.к. $F_{\text{набл}} < F_{\text{табл}}$ | модель адекватна, т.к. $F_{\text{набл}} < F_{\text{табл}}$ |
| Дисперсия коэффициента регрессии | 0,217 | 0,413 | 0,345 | 12,5 |
| Квадратичная ошибка коэффициента регрессии | 0,466 | 0,643 | 0,587 | 3,53 |
| Коэффициент Стьюдента | 2,92 | 2,92 | 2,92 | 2,92 |

4. Обсуждение

На основании результатов испытаний, представленных в табл. 4, и метода математического планирования для мелкозернистого бетона были выведены следующие уравнения регрессии:

- для расплыва конуса:

$$PK = 192 + 42X_1 + 2X_2 - 36X_3; \quad (2)$$

- для прочности при сжатии на 3 сутки:

$$R_3 = 42,97 - 1,872X_1 + 1,56X_2 + 7,43X_3; \quad (3)$$

- для прочности при сжатии на 7 сутки:

$$R_7 = 65,12 - 1,68X_1 + 0,53X_2 + 12,37X_3; \quad (4)$$

- для прочности при сжатии на 28 суток:

$$R_{28} = 92,45 - 1,4X_1 + 4,95X_2 + 8,75X_3. \quad (5)$$

Из уравнения регрессии (2) видно, что наибольший вклад в расплыв конуса вносит фактор X_1 , поскольку численное значение коэффициента ($a_1=42$) при нём существенно превышает коэффициенты при факторах X_2 и X_3 ($a_2=2$ и $a_3=-36$). Закономерно, что суперпластификатор, принятый в качестве фактора X_1 , оказывает наибольшее влияние на подвижность бетонной смеси. Обращает на себя внимание отрицательное значение коэффициента $a_3=-36$ при факторе X_3 , что указывает на резко негативное влияние метакаолина на водопотребность бетонной смеси. Наоборот, в уравнении регрессии трех- и семисуточной прочности метакаолин проявляет себя эффективнее, чем суперпластификатор и зола-уноса. Это видно из численного значения коэффициента ($a_3=7,43$) при факторе X_3 , существенно превышающего коэффициенты при факторах X_1 и X_2 (-1,872 и 1,56). Из уравнения регрессии для прочности бетона в 28-суточном возрасте следует, что помимо метакаолина ($a_3=8,75$) ощутимый вклад в кинетику твердения на поздних сроках твердения начинает вносить зола-уноса ($a_2=4,95$). Очевидно, что оба

наполнителя в мелкозернистом бетоне проявляют пуццолановую активность, но в наибольшей степени эту активность во все сроки твердения показывает метаксаолин.

Наглядное изображение вклада каждого из факторов в рост прочности мелкозернистого бетона хорошо продемонстрировано на рис. 1-2.

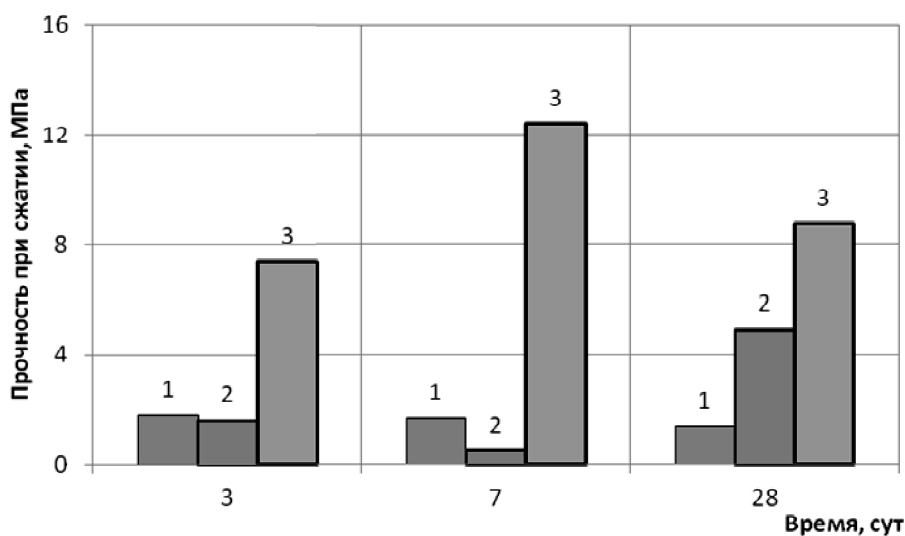


Рис. 1. Влияние вклада X_1 (1 – суперпластификатор), X_2 (2 – зола-уноса) и X_3 (3-метаксаолин) в прочность бетона в возрасте 3, 7 и 28 суток (иллюстрация авторов)

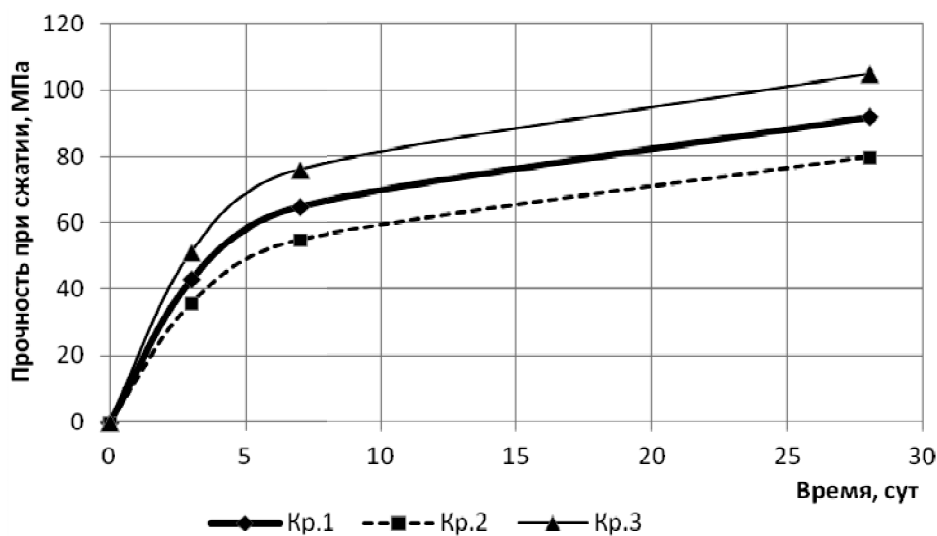


Рис. 2. Кинетика твердения бетона при нахождении факторов на нулевом «0» (кр. 1), на нижнем «-1» (кр. 2) и на верхнем «+1» (кр. 3) уровнях (иллюстрация авторов)

Из рис. 2 видно, что наиболее интенсивная кинетика твердения мелкозернистого бетона наблюдается при уровне фактора «+1», для которого содержание суперпластификатора, золы-уноса и метаксаолина составляет 1, 15 и 15 %, соответственно.

5. Заключение

Совместное использование суперпластификатора и наполнителей позволяет получать высокопрочные мелкозернистые бетоны с прочностью при сжатии свыше 100 МПа. Математические уравнения регрессии позволили установить, что наибольший вклад в кинетику твердения в раннем возрасте (до 7 суток) вносит метаксаолин, а на поздних сроках твердения (28 суток) – зола-уноса.

Список библиографических ссылок

1. Муртазаев С-А. Ю., Саламанова М. Ш. Высококачественные бетоны для монолитного строительства // Экономика строительства и природопользования. 2018. № 4 (69). С. 138–142.
2. Бедов А. И., Бабков В. В., Габитов А. И. Сахибгареев Р. Р., Салов А. С. Монолитное строительство в Республике Башкортостан: от теории к практике // Вестник МГСУ. 2013. № 10. С. 110–121. DOI: 10.22227/1997-0935.2013.10.110-121.
3. Усов Б. А. Бетонирование монолитных конструкций из литых смесей в зимних условиях // Системные технологии. 2016. № 21. С. 5–17.
4. Дубынин Н. В. От крупнопанельного домостроения XX в. к системе панельно-каркасного домостроения XXI в. // Жилищное строительство. 2015. № 10. С. 12–20.
5. Аилатов Е. Ф. Снижение материалоемкости изделий крупнопанельного домостроения // Жилищное строительство. 2016. № 10. С. 30–33.
6. Николаев С. В. Панельные и каркасные здания нового поколения // Жилищное строительство. 2013. № 8. С. 2–9.
7. Сапачева Л. В., Юмашева Е. И. Крупнопанельное домостроение остается самым быстрым и экономичным // Жилищное строительство. 2014. № 10. С. 3–10.
8. Okamura Hajime, Ouchi Masahiro. Self-Compacting Concrete // Journal of Advanced Concrete Technology. 2003. Vol. 1. № 1. P. 5–15.
9. Feys D., Verhoeven R., Schutter G. Fresh self compacting concrete, a shear thickening material // Cement and Concrete Research. 2008. (38) № 7. P. 920–929.
10. Бетон песчаный : пат. 2569947С1 Рос. Федерация. № 2014152748/03 заявл. 24.12.14 ; опубл. 10.12.2015. Бюл. № 34. 5 с.
11. Борисюк Е. А. Относительная взаимосвязь компонентов в многокомпонентных системах (часть 2) // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. № 12. С. 34–41. DOI: 10.12737/article_5c1c9951a85d95.66778563.
12. Кайс Х. А., Морозова Н. Н. Свойства природного цеолита для получения высокопрочного мелкозернистого бетона // Строительные материалы. 2017. № 6. С. 63–68.
13. Харченко А. И., Алексеев В. А., Харченко И. Я., Баженов Д. А. Структура и свойства мелкозернистых бетонов на основе композиционных вяжущих // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. В. 13. С. 322–331. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.3.322-331.
14. Mateusz Radlinski, Jan Olek. Investigation into the synergistic effects in ternary cementations systems containing Portland cement, fly ash and silica fume // Cement and Concrete Research. 2012. № 34. P. 451–459.
15. Pistilli M. F. The Variability of Condensed Silica Fume from a Canadian Source and its Influence on the Properties of Portland Cement Concrete // Cement, Concrete and Aggregate. 1984. Vol. 6. № 1. P. 33–37.

Makarenko Sergey Viktorovich

candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: makarenko_83_07@mail.ru**Lazovskiy Boris Mihailovich**

postgraduate student

E-mail: borislozovskiy@mail.ru**Irkutsk National Research Technical University**

The organization address: 664074, Russia, Irkutsk, Lermontov st., 83

Khokhryakov Oleg Viktorovich

candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: olvik@list.ru**Khozin Vadim Grigorievich**

doctor of technical sciences, professor

E-mail: khozin.vadim@yandex.ru**Kazan State University of Architecture and Engineering**

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

The effect of active pozzolanic fillers on the properties of fine-grained cement concrete

Abstract

Problem statement. The work aimed to study a method for increasing the strength of fine-grained (sandy) concrete with the combined use of active pozzolanic fillers of natural and technogenic origin in its composition.

Results. The results of the combined effect of fly ash and metakaolin on the technological and physical-mechanical parameters of fine-grained (sandy) cement concrete (cone spread, air content and density of the concrete mixture, bending and compressive strength) are presented. By the method of mathematical planning of the experiment, regression equations for the mobility and strength of concrete are derived, and the contribution of each filler to the kinetics of its hardening is estimated. The reliability of the results of the work is justified by calculating the confidence interval and homogeneity of variances using Cochran's criteria, as well as checking the model for adequacy taking into account the Fisher coefficients.

Conclusions. The significance of positive results for construction lies in the possibility of using active fillers of both technogenic and natural origin. It is shown that metakaolin makes the greatest contribution to the kinetics of hardening at an early age (up to 7 days), and fly ash at the later hardening periods (28 days). Thanks to their combined use, it is possible to obtain high-strength fine-grained concrete with a compressive strength of over 100 MPa.

Keywords: fine-grained high-strength concrete, metakaolin, dump-ash, strength.

For citation: Makarenko S. V., Lazovskiy B. M., Khokhryakov O. V., Khozin V. G. The effect of active pozzolanic fillers on the properties of fine-grained cement concrete // *Izvestija KGASU*. 2020. № 3 (53). P. 39–46.

References

1. Murtazaev S.-A. Yu., Salamanova M. Sh. High-quality concrete for monolithic construction // *Ekonomika stroitel'stva i prirodopol'zovaniya*. 2018. № 4 (69). P. 138–142.
2. Bedov A. I., Babkov V. V., Gabitov A. I., Sakhibgareev R. R., Salov A. S. Monolithic construction in the Republic of Bashkortostan: from theory to practice // *Vestnik MGSU*. 2013. № 10. P. 110–121. DOI: 10.22227/1997-0935.2013.10.110-121.
3. Usov B. A. Concreting of monolithic structures made of cast mixtures in winter conditions // *Systemnyeologii*. 2016. № 21. P. 5–17.
4. Dubynin N. V. From large-panel housing construction of the XX century to the system of panel-frame housing construction of the XXI century // *Zhilishchnoye stroitel'stvo*. 2015. № 10. P. 12–20.
5. Ailatov E. F. Reducing the material consumption of large-panel housing construction products // *Zhilishchnoye stroitel'stvo*. 2016. № 10. P. 30–33.
6. Nikolaev S. V. Panel and frame buildings of the new generation // *Zhilishchnoye stroitel'stvo*. 2013. № 8. P. 2–9.
7. Sapacheva L. V., Yumasheva E. I. Large-panel housing construction remains the fastest and most economical // *Zhilishchnoye stroitel'stvo*. 2014. № 10. P. 3–10.
8. Okamura Hajime, Ouchi Masahiro. Self-Compacting Concrete // *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2003. Vol. 1. № 1. P. 5–15.
9. Feys D., Verhoeven R., Schutter G. Fresh self-compacting concrete, a shear thickening material // *Cement and Concrete Research*. 2008. (38) № 7. P. 920–929.
10. Sandy concrete : US Pat. 2569947C1 Rus. Federation. № 2014152748/03 App. 12.24.14 ; publ. 10.12.2015. Bul. № 34. 5 p.
11. Borisyuk E. A. Relative relationship of components in multicomponent systems (part 2) // *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhov*. 2018. № 12. P. 34–41. DOI: 10.12737/article_5c1c9951a85d95.66778563.
12. Kais Kh. A., Morozova N. N. Properties of natural zeolite for obtaining high-strength fine-grained concrete // *Stroitelnye materialy*. 2017. № 6. P. 63–68.

13. Kharchenko A. I., Alekseev V. A., Kharchenko I. Ya., Bazhenov D. A. The structure and properties of fine-grained concrete based on composite binders // Vestnik MGSU. 2019. Vol. 14. Iss. 13. P. 322–331. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.3.322-331.
14. Mateusz Radlinski, Jan Olek. Investigation into the synergistic effects in ternary cementations systems containing Portland cement, fly ash and silica fume // Cement and Concrete Research. 2012. № 34. P. 451–459.
15. Pistilli M. F. The Variability of Condensed Silica Fume from a Canadian Source and its Influence on the Properties of Portland Cement Concrete // Cement, Concrete and Aggregate. 1984. Vol. 6. № 1. P. 33–37.