

## О соотношении пределов прочности цементных бетонов на растяжение при изгибе и сжатии

Г.В. Несветаев<sup>1</sup>, Т.Г. Кузьменко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Донской государственной технической университет, Ростов-на-Дону

<sup>2</sup> Дирекция мониторинга дорожной деятельности Федерального дорожного агентства (ФГБУ «Росдортехнология»), Москва

**Аннотация:** Представлен анализ зависимостей «предел прочности на растяжение при изгибе – предел прочности на сжатие» тяжелых бетонов, полученных в результате обработки многочисленных экспериментальных данных авторов и заимствованных из опубликованных работ, а также по данным, представленным в различных нормативных документах. На основании полученных уравнений регрессии, описывающих зависимость предела прочности бетона на растяжение при изгибе, от предела прочности на сжатие в диапазоне прочности на сжатие от 30 до 100 Мпа, сделан вывод о целесообразности нормирования классов по прочности на растяжение при изгибе без учета рецептурных особенностей бетонов. Выявлена некоторая несогласованность соотношений классов по прочности на растяжение при изгибе и сжатие в проанализированных нормативных документах. Подтверждена высокая достоверность полученной ранее зависимости прочности бетона на растяжение при изгибе от прочности на сжатие  $R_f = 0,29 \cdot R^{0,74}$ . Предложена формула, учитывающая влияние добавки микрокремнезема в составе бетонной смеси на соотношение пределов прочности на растяжение при изгибе и сжатии. Отмечена роль качества заполнителей в обеспечении высоких показателей предела прочности бетона на растяжение при изгибе.

**Ключевые слова:** предел прочности бетона на растяжение при изгибе, предел прочности бетона на сжатие, классы по прочности бетона, бетон для дорожных и аэродромных покрытий.

Согласно СП 34.13330.2021, жесткие дорожные одежды выполняются в виде монолитного либо сборного цементобетонного покрытия, СП 121.13330.2019 предписывает «строительство жестких покрытий... выполнять ... из тяжелого бетона». Минимальный класс бетона по прочности на сжатие в СП установлен - В30, а один из ключевых показателей назначения бетонов для дорожных и аэродромных покрытий - предел прочности на растяжение при

изгибе  $R_f$  нормируется классом по прочности при изгибе не ниже  $B_{tb}4,0$ . Согласно СП 121.13330.2019 нормирование величин  $B_{tb}$ ,  $P_{II}$  и начального модуля упругости бетона  $E_0$  устанавливается в табл. И1 без привязки к классу бетона по прочности на сжатие  $B$ . Зависимость  $R_f = f(E_0)$  при допущении  $R_f = P_{II}$  по данным табл. И1 СП описывается уравнением:

$$R_f = 0,0074 \cdot E_0^{1,88}, \quad (1)$$

с показателем достоверности аппроксимации  $R^2 = 0,955$  ( $E_0$  – в ГПа).

ГОСТ Р 59300-2021 и ГОСТ 26633-2015 нормируют классы тяжелого бетона по прочности на сжатие до В60 и до В120 соответственно, классы по прочности на растяжение при изгибе до  $B_{tb}6$  и  $B_{tb}10$ . В ранней редакции ГОСТ 26633-91 нормировались классы по прочности на сжатие до В80, по прочности на растяжение при изгибе до  $B_{tb}8$ . При допущении  $R_f = B_{tb}/0,8$  и  $R = B/0,8$  зависимость  $R_f = f(R)$  по данным ГОСТ для класса по прочности на сжатие не ниже В30 описывается уравнениями, приведенными в табл. 1.

Таблица № 1

Уравнения регрессии  $R_f = f(R)$

№	По данным	Уравнение	Показатель достоверности аппроксимации $R^2$
1	ГОСТ Р 59300-20	$R_f = 0,143 \cdot R^{0,923}$	0,988
2	ГОСТ 26633-2015	$R_f = 1,261 \cdot R^{0,46}$	0,993
3	ГОСТ 26633-91	$R_f = 0,255 \cdot R^{0,786}$	0,991

Согласно нормам Беларуси СНБ 5.03.01-2002, нормируются классы бетона по прочности на сжатие и осевое растяжение и устанавливается (ф.6.23) связь между прочностью на растяжение при изгибе и прочностью на осевое растяжение, что позволяет получить зависимость  $R_f = f(R)$  в виде:

$$R_f = 0,238 \cdot R^{0,783} \quad (2)$$

с показателем достоверности аппроксимации  $R^2 = 0,957$ .

При допущении принятия зависимости между начальным модулем упругости бетона  $E_0$ , ГПа и пределом прочности на сжатие  $R$ , МПа [1]:

$$E_0 = \frac{0,05 \cdot 0,8 \cdot R + 57}{1 + \frac{29}{3,8 + 0,8 \cdot R}}, \quad (3)$$

уравнение ф.(1) сводится к виду:

$$R_f = 0,253 \cdot R^{0,812} \quad (4)$$

с показателем достоверности аппроксимации  $R^2 = 0,963$ .

На рис. 1 представлены зависимости  $R_f = f(R)$  по уравнениям табл.1, ф.(2,4), зависимости по данным [2] и некоторым экспериментальным данным, рассматриваемым далее (рис.3).

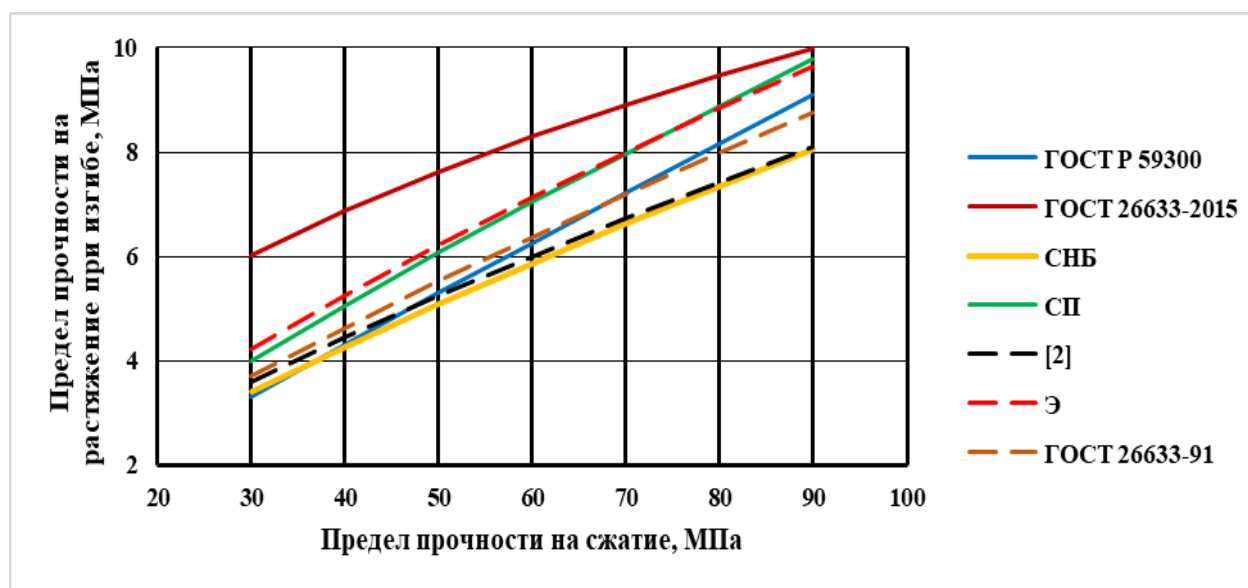


Рис. 1 – Зависимость предела прочности на растяжение при изгибе от предела прочности на сжатие

ГОСТ Р 59300 – по №1 табл.1; ГОСТ 26633-2015 - №2 табл.1; СНБ – по ф.(2);

СП – по ф.(4); Э – по экспериментальным данным (рис.3);

ГОСТ 26633-91 – по №3 табл.1

В [2] в результате обработки 181 значения « $R_f - R$ », из которых 95 заимствованы из опубликованных работ, остальные получены в лаборатории НИИЖБ, предложена зависимость:

$$R_f = 0,29 \cdot R^{0,74}, \quad (5)$$

представленная на рис. 1 под индексом [2].

Из представленных на рис. 1 данных очевидно, что имеет место некоторое несоответствие зависимостей  $R_f = f(R)$ , полученных по рассмотренным выше данным, что может быть обусловлено как принятой в данной работе методикой обработки, так и некоторыми объективными факторами. Расхождение значений, полученных по ф. №1 в табл. 1 с [2] составляют от - 9% до 12%, по ф. №2 в табл.1 относительно [2] от 23% до 68%, по ф.(2) относительно [2] от 0% до - 5%, по ф.(4) относительно [2] от 11% до 21%. Следует отметить, что зависимость  $R_f = f(R)$  №3 в табл.1 (редакция ГОСТ 26633-91) существенно отличается от зависимости  $R_f = f(R)$  №2 в табл. 1 (редакция ГОСТ 26633-2015), при этом расхождение значений по зависимости №3 табл.1 от [2] составляет от 3% до 8%. Из этого следует, что либо ряды классов по прочности на сжатие В и классов по прочности на растяжение при изгибе  $V_{tb}$  представлены в ГОСТ 26633-2015 без привязки друг к другу и, используя эти данные, нельзя получить зависимость  $R_f = f(R)$ , что с практической точки зрения не рационально, либо нормирование значений  $V_{tb}$  произведено по непонятному принципу. В связи с этим, уточнение зависимости  $R_f = f(R)$ , особенно для некоторых современных бетонов, изготовленных с применением различных модифицирующих добавок, полученных из самоуплотняющихся бетонных смесей и др., представляет собой актуальную задачу.

По опубликованным результатам сформирован массив данных (рис.2), включающих 30 значений « $R_f - R$ » для бездобавочных бетонов (э на рис. 2) [3-16], 31 значение для бетонов, содержащих микрокремнезем (МК на рис.2) [3-

---

11] и 34 значения для бетонов, содержащих иные минеральные добавки (др на рис.2) [10-16]. Также использованы данные авторов (А на рис.2).

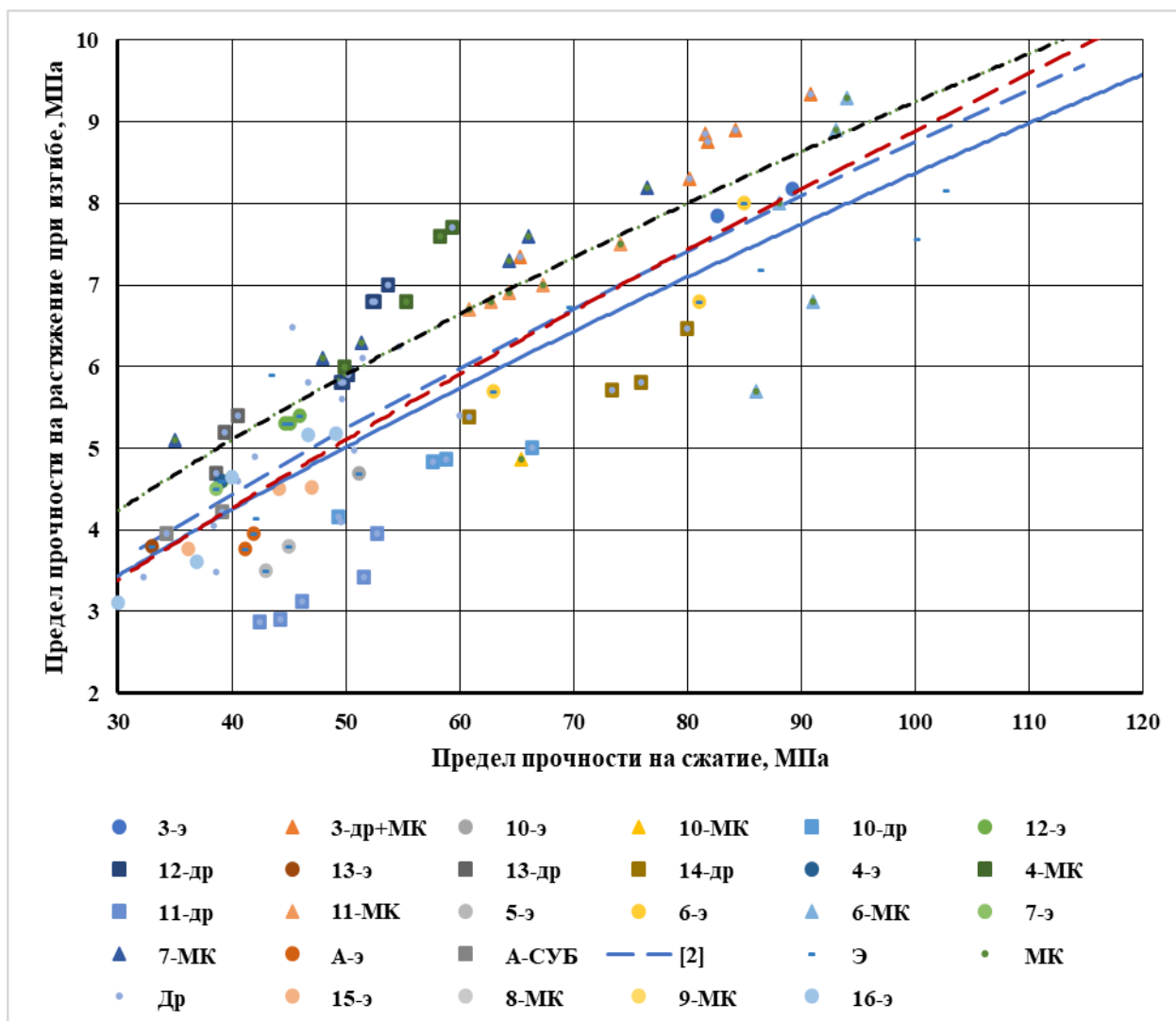


Рис.2. – Зависимость предела прочности на растяжение при изгибе от предела прочности на сжатие

Э – бездобавочные бетоны; МК – бетоны, содержащие микрокремнезем;  
др – бетоны с различными минеральными добавками,  
кроме микрокремнезема; А – данные авторов;  
2-16 – по литературным данным [2-16]

Уравнения регрессии, описывающие зависимость  $R_f = f(R_c)$  для трех указанных выше групп данных, представленных на рис. 2, приведены в табл.2.

Таблица № 2

Уравнения регрессии по данным рис. 2

№	Группа	Уравнение	Показатель достоверности аппроксимации $R^2$
1	э	$R_f = 0,277 \cdot R^{0,74}$	0,873
2	МК	$R_f = 0,47 \cdot R^{0,648}$	0,814
3	Др.	$R_f = 0,222 \cdot R^{0,8}$	0,59

Представленные на рис. 2 и в табл. 2 результаты показывают:

- зависимость, полученная по результатам настоящего исследования (ф.(1) в табл.2), практически не отличается от полученной в [2], расхождение значений на всем диапазоне прочности на сжатие от 30 до 100 МПа не превышает 5%;
- предел прочности на растяжение при изгибе бетонов, содержащих МК, превышает, при равной прочности на сжатие, предел прочности на растяжение при изгибе бездобавочных бетонов среднестатистически на 24%, при прочности на сжатие 30 МПа и 11% при прочности на сжатие 100 МПа, т.е. для бетонов, содержащих МК, справедлива зависимость:

$$R_{f,МК} = 1,7 \cdot R^{-0,09} \cdot R_{f,э} , \quad (6)$$

где  $R_{f,МК}$ ;  $R_{f,э}$ ;  $R$  – соответственно, предел прочности на растяжение при изгибе бетона, содержащего МК, бездобавочного бетона (эталоны), предел прочности бетона на сжатие;

- предел прочности на растяжение при изгибе бетонов, содержащих отличные от МК минеральные добавки, среднестатистически соответствует значениям прочности на растяжение при изгибе для бездобавочных бетонов, различие на всем диапазоне прочности на сжатие от 30 до 100 МПа не превышает 6%, но, учитывая низкий показатель достоверности аппроксимации  $R^2 = 0,59$ , следует иметь в виду, что возможны индивидуальные особенности влияния минеральной добавки на предел прочности на растяжение при изгибе, в связи с

чем объединять их в одну группу нецелесообразно. В частности, по данным [17] отмечено повышение предела прочности на растяжение при изгибе до 26% при использовании маршаллита, а по данным [18] повышение предела прочности на растяжение при изгибе при применении в качестве минеральной добавки опоки составило до 2 раз. Кроме того, предел прочности на растяжение при изгибе существенно зависит от прочности сцепления цементного камня с заполнителем, которая определяется минеральным составом заполнителя и его чистотой. Учет этих факторов в СП, ГОСТ при нормировании класса бетона по прочности на растяжение при изгибе нецелесообразен, да и практически нереализуем, в связи с чем при нормировании, по нашему мнению, следует ориентироваться на нижний предел зависимости  $R_f = f(R)$ ;

- максимальное отклонение единичных значений на рис. 2 от значений по ф.(5) в большую сторону составляет 1,35, в меньшую – 0,65.

На рис. 3 представлены результаты, полученные при подборе состава бетона для аэродромного покрытия в одной из дорожно-строительных лабораторий. Подборы произведены с использованием ПЦ двух заводов, высококачественного щебня трех карьеров, высококачественного песка одного карьера и суперпластифицирующей добавки трех производителей. Вероятно, этим разнообразием компонентов бетонной смеси объясняется довольно низкий показатель достоверности аппроксимации (табл. 3). Из представленных в табл. 3 результатов очевидно, что, несмотря на определенный разброс результатов (размах  $\langle \max/\min = 1,29 \rangle$ ), показатель степени в среднестатистической зависимости  $R_f = f(R)$  в табл. 3 достаточно хорошо коррелирует с показателем степени в ф.(5), а расчетные значения, полученные по формулам табл.3, превышают значения по ф.(5) на 16-19% и практически совпадают со значениями, полученными при вышеописанной обработке данных СП 121.13330.2019 (рис.1, Э).

---

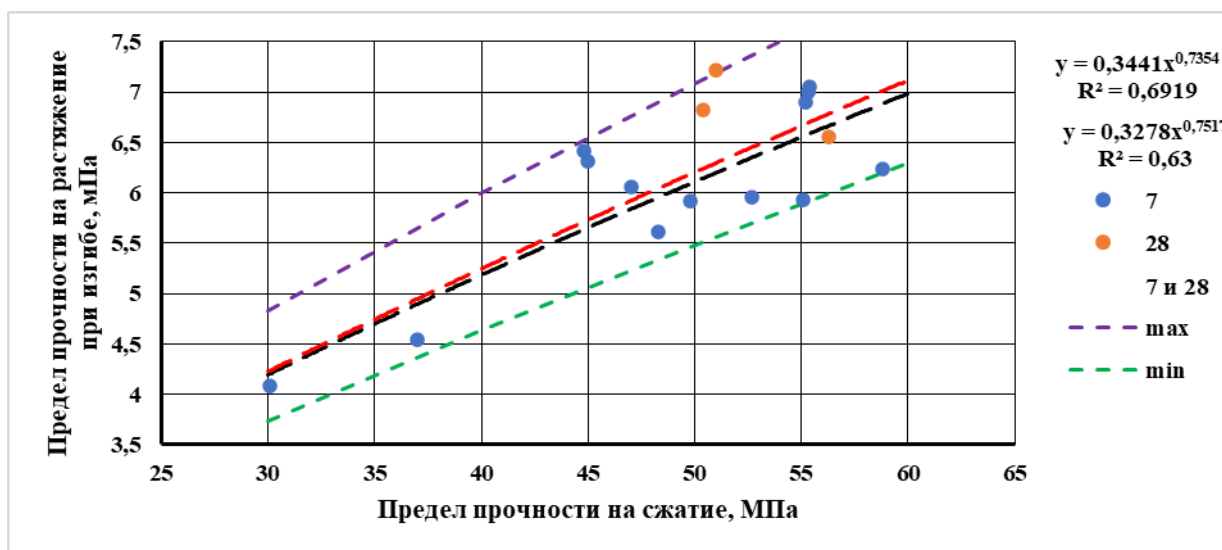


Рис. 3. – Зависимость предела прочности на растяжение при изгибе от предела прочности на сжатие  
 7,28 – возраст бетона в момент испытаний

Таблица № 3

Уравнения регрессии по данным рис. 3

№	Возраст бетона, сут	Уравнение	Показатель достоверности аппроксимации $R^2$
1	7	$R_f = 0,344 \cdot R^{0,735}$	0,692
2	7 и 28	$R_f = 0,328 \cdot R^{0,752}$	0,63

### Заключение

Получены уравнения регрессии, описывающие зависимость предела прочности бетона на растяжение при изгибе от предела прочности на сжатие в диапазоне от 30 до 100 МПа как по экспериментальным данным, так и по представленным в различных нормативных документах нормативным значениям. Обоснована целесообразность нормирования классов по прочности на растяжение при изгибе без учета рецептурных особенностей бетонов. Выявлена некоторая несогласованность соотношений классов по прочности на



растяжение при изгибе и сжатии в различных нормативных документах. Подтверждена высокая достоверность полученной ранее зависимости  $R_f = 0,29 \cdot R^{0,74}$ . Предложена формула, учитывающая влияние добавки микрокремнезема в составе бетонной смеси на соотношение пределов прочности на растяжение при изгибе и сжатие. Отмечена роль качества заполнителей в обеспечении высоких показателей предела прочности бетона на растяжение при изгибе.

### Литература

1. Маилян Д. Р., Несветаев Г.В. Регулирование жесткости и прочности железобетонных балок варьированием модуля упругости бетона // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. Т. 20. № 4. С. 86-93. DOI: 10.31675/1607-1859-2018-20-4-86-93.
  2. Несветаев Г. В., Кардумян Г.С. О применении цементных бетонов для дорожных и аэродромных покрытий // Строительные материалы. 2014. № 3. С. 31-35.
  3. Nguyen Duc Vinh Quang, Bazhenov Y.M., Aleksandrova O.V. Effect of quartz powder and mineral admixtures on the properties of high-performance concrete // Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2019. 14:1:102-117. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.1.102-117.
  4. Kasatkin S.P., Soloviova V.Y., Stepanova I.V., Kuznetsov D.V., Sinitsin D.A. High-performance nano-modified concrete of increased strength and durability. Nanotechnologies in construction. 2022. 14 (6). 493–500. URL: doi.org/10.15828/2075-8545- 2022-14-6-493-500.
  5. Булгаков А.Г., Ерофеева И.В., Ишутин А.А., Афонин В.В., Моисеев В.В. Прочность на растяжение при изгибе бетонов нового поколения // Эксперт: теория и практика. 2022. № 2 (17). С. 21-27. DOI: 10.51608/26867818\_2022\_2\_21.
-

6. Крамар Л.Я., Кудяков А.И., Трофимов Б.Я., Шулдяков К.В. Цементные тяжелые бетоны для строительства скоростных автомобильных дорог // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2017. № 4 (63). С. 147-157.
  7. Коровяков В. Ф., М.Ч. Туан Литые бетонные смеси для дорожного строительства // Технологии бетонов. 2012. № 9-10 (74-75). С. 52-55.
  8. Калашников В.И., Тараканов О.В., Кузнецов Ю.С., Володин В.М., Белякова Е.А. Бетоны нового поколения на основе сухих тонкозернисто-порошковых смесей // Инженерно-строительный журнал. 2012. № 8 (34). С. 47-53.
  9. Каприелов С. С., Чилин И.А. Сверхвысокопрочный самоуплотняющийся фибробетон для монолитных конструкций // Вестник НИЦ Строительство. 2017. № 1 (12). С. 14-22.
  10. Красникова Н.М., Морозов И.М., Хохряков О.В., Хозин В.Г. Оптимизация состава цементного бетона для аэродромных покрытий // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2014. № 2 (28). С. 166-172.
  11. Bazhenov Y.M., Murtazaev S. A. Y., Alaskhanov A. H., Saydumov M.S., Bataev D.R.C., Murtazaeva T.S.A. High-strength concretes based on anthropogenic raw materials for earthquake resistant high-rise construction // Engineering Solid Mechanics. 2021. Vol. 9. No. 3. P. 335-346. DOI: 10.5267/j.esm.2021.1.004.
  12. Соловьянова В.Я., Степанова И.В., Разуваев Д.А. Высокоэффективный бетон для дорожных покрытий // Транспорт БРИКС. 2022. Т. 1. Вып. 1. Ст. 2. С. 1-6. DOI: 10.46684/2022.1.2.
  13. Рахимов М.А., Рахимова Г.М., Рахимов А.М., Садирбаева А.М., Иманов Е.К. Исследование влияния комплексных гидрофобизирующих органо-минеральных модификаторов на эксплуатационные свойства тяжелого бетона // Фундаментальные исследования. 2016. № 2. С. 294-298.
-

14. Okolnikova G. E., Grishin G.E., Kurbanmagomedov A. K., Bronnikov D.A. Experimental study of the modified highstrength coarse-grained concrete // Системные технологии. 2019. № 31. С. 25-30.
15. Смирнова О.М. Влияние дисперсного армирования синтетическим макроволокном на прочность дорожного бетона // Вестник науки и образования Северо-Запада России 2016. Т. 2. № 3. С. 15-19.
16. Макридин Н. И., Максимова И.Н. Оптимизация структуры и прогнозирование конструкционной прочности бетонов нового поколения // Региональная архитектура и строительство. 2021. № 4(49). С. 13-24. DOI: 10.54734/20722958\_2021\_4\_13.
17. Несветаев Г.В., Козлов А.В., Козлов Г.А., Филонов И.А. Влияние некоторых минеральных добавок на свойства мелкозернистых бетонов // Инженерный вестник Дона. 2022. № 11. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2022/7972.
18. Шляхова Е. А., Шляхов М.А. Влияние вида минеральной добавки микронаполнителя на свойства мелкозернистого бетона // Инженерный вестник Дона. 2015. № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3394.

### References

1. Mailyan D. R., Nesvetaev G.V. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. 2018. Т. 20. № 4. pp. 86-93. DOI: 10.31675/1607-1859-2018-20-4-86-93.
  2. Nesvetaev G. V., Kardumyan G.S. Stroitel'ny'e materialy`. 2014. № 3. pp. 31-35.
  3. Nguyen Duc Vinh Quang, Bazhenov Y.M., Aleksandrova O.V. Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2019. 14:1:102-117. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.1.102-117.
  4. Kasatkin S.P., Soloviova V.Y., Stepanova I.V., Kuznetsov D.V., Sinitsin D.A. Nanotechnologies in construction. 2022. 14 (6). 493–500. URL: doi.org/10.15828/2075-8545- 2022-14-6-493-500.
-



5. Bulgakov A.G., Erofeeva I.V., Ishutin A.A., Afonin V.V., Moiseev V.V. E`kspert: teoriya i praktika. 2022. № 2 (17). pp. 21-27. DOI: 10.51608/26867818\_2022\_2\_21.
  6. Kramar L.Ya., Kudyakov A.I., Trofimov B.Ya., Shuldyakov K.V. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arxitekturno-stroitel`nogo universiteta. 2017. № 4 (63). pp. 147-157.
  7. Korovyakov V. F., M.Ch. Tuan Texnologii betonov. 2012. № 9-10 (74-75). pp. 52-55.
  8. Kalashnikov V.I., Tarakanov O.V., Kuzneczov Yu.S., Volodin V.M., Belyakova E.A. Inzhenerno-stroitel`ny`j zhurnal. 2012. № 8 (34). pp. 47-53.
  9. Kaprielov S. S., Chilin I.A. Vestnik NICz Stroitel`stvo. 2017. № 1 (12). pp. 14-22.
  10. Krasinikova N.M., Morozov I.M., Xoxryakov O.V., Xozin V.G. Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arxitekturno-stroitel`nogo universiteta. 2014. № 2 (28). pp. 166-172.
  11. Bazhenov Y.M., Murtazaev S. A. Y., Alaskhanov A. H., Saydumov M.S., Bataev D.R.C., Murtazaeva T.S.A. Engineering Solid Mechanics. 2021. Vol. 9. No. 3. pp. 335-346. DOI: 10.5267/j.esm.2021.1.004.
  12. Solov`eva V.Ya, Stepanova I.V., Razuvaev D.A. Transport BRIKS. 2022. T. 1. Vy`p. 1. St. 2. pp. 1-6. DOI: 10.46684/2022.1.2.
  13. Raximov M.A., Raximova G.M., Raximov A.M., Sadirbaeva A.M., Imanov E.K. Fundamental`ny`e issledovaniya. 2016. № 2. pp. 294-298.
  14. Okolnikova G. E., Grishin G.E., Kurbanmagomedov A. K., Bronnikov D.A. Sistemny`e texnologii. 2019. № 31. pp. 25-30.
  15. Smirnova O.M. Vestnik nauki i obrazovaniya Severo-Zapada Rossii 2016. T. 2. № 3. pp. 15-19.
  16. Makridin N. I., Maksimova I.N. Regional`naya arxitektura i stroitel`stvo. 2021. № 4(49). pp. 13-24. DOI: 10.54734/20722958\_2021\_4\_13.
  17. Nesvetaev G.V., Kozlov A.V., Kozlov G.A., Filonov I.A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2022. № 11. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2022/7972.
-



18. Shlyahova E. A., Shlyahov M.A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2015. № 4.  
URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3394](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3394).