

DOI: 10.12737/22317

*Строкова В.В., д-р техн. наук, проф.,  
Нелубова В.В., канд. техн. наук, доц.,  
Боцман Л.Н., канд. техн. наук, доц.,  
Огурцова Ю.Н., канд. техн. наук,  
Хахалева Е.Н., канд. техн. наук*

*Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова*

## КОМПОЗИЦИОННОЕ ВЯЖУЩЕЕ ДЛЯ МОНОЛИТНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА В СЕВЕРНЫХ РЕГИОНАХ\*

nelubova@list.ru

*В работе обоснована возможность получения композиционных вяжущих различного состава для монолитного бетонирования, в том числе при отрицательных температурах. Получены математические модели зависимости предела прочности при сжатии и при изгибе, а также средней плотности КВ от соотношения кварцосодержащего и пластифицирующего компонентов в его составе. Разработаны составы композиционных вяжущих на основе песка Эсского месторождения, позволяющие при сохранении физико-механических характеристик бетона снизить расход цемента. Установлено влияние состава кремнеземного компонента на гранулометрию композиционного вяжущего. Изучены реотехнологические характеристики и микроструктурные особенности цементного камня различного состава.*

**Ключевые слова:** композиционные вяжущие, тонкомолотый цемент, пластификатор, кремнеземистый компонент, микроструктура, гидросиликаты кальция.

**Введение.** Масштабная застройка в северных регионах страны приводит к необходимости использования современных технологий строительства, а также поиск рациональных путей использования местных ресурсов. С учетом специфики природно-климатических и инженерно-геологических условий таких регионов одним из перспективных направлений является монолитное строительство, в том числе с использованием мелкозернистых бетонов. Эффективность монолитного строительства обусловлена укороченными сроками возведения объектов, снижением затрат на доставку материалов, меньшей материалоемкостью строительства, большей конструкционной надежностью зданий, их приемлемой себестоимостью и улучшенными эксплуатационными характеристиками.

Мелкозернистый бетон обладает рядом достоинств, обуславливающих его применение, но у него есть основной недостаток, заключающийся в повышенном расходе вяжущего. Эту проблему разрешает использование композиционных вяжущих (КВ).

Разработка и использование современных композиционных вяжущих позволяет решать ряд проблем, касающихся строительства в целом и монолитного строительства, в частности. Замена традиционного цемента КВ, эффективность которых доказана многочисленными исследованиями [1–14], позволяет повышать физико-механические и эксплуатационные характеристики бетонов на их основе, а также значительно экономить на сырьевых компонентах. В КВ, наряду с цементом, важным составляющим

является наполнитель, который может быть как природного, так и техногенного происхождения, при этом предпочтительно использование местного сырья с целью снижения транспортных затрат.

В связи с этим целью настоящего исследования является разработка композиционных вяжущих для применения при бетонировании в условиях отрицательных температур на основе местного сырья с учетом особенностей его минерального состава.

**Методика.** Композиционные вяжущие в работе получены совместным помолотом цемента, кремнеземистого компонента и пластификатора до удельной поверхности 500–550 м<sup>2</sup>/кг. Для получения композиционных вяжущих использованы цемент ЦЕМ I 42,5Н производства ЗАО «Белгородский цемент»; песок Эсского месторождения Ханты-Мансийского автономного округа; пластифицирующая добавка «Полипласт СП-1» производства ОАО «Полипласт». Концентрацию пластифицирующей добавки определяли по растекаемости паст из тонкомолотых цементов с различным содержанием кремнеземистого компонента согласно методике, разработанной НИИЖБ Госстроя СССР с помощью миниконуса. Реотехнологические характеристики полученных связующих определяли при помощи ротационного вискозиметра Rheotest RN 4.1. Дисперсность композиционных вяжущих оценивали по распределению частиц по размерам, изученному на лазерном гранулометре, а также удельной поверхности, изученной методом воздухопроницаемости на приборе ПСХ-

12SP. Физико-механические свойства вяжущих (нормальная плотность, сроки схватывания, плотность, прочность на сжатие изгиб) оценивали с использованием стандартных методик, описанных в соответствующей нормативной литературе. Для оптимизации составов композиционных вяжущих применялся метод математического планирования эксперимента (второго порядка). При проведении экспериментальных исследований в качестве основного принят центральный композиционный план полного факторного эксперимента (ПФЭ).

**Результаты (основная часть).** Согласно полученным данным, для ТМЦ-70 и ТМЦ-50 оптимальная дозировка пластификатора Полипласт СП-1 составила 0,6 %, для ТМЦ-30 – 0,7 %.

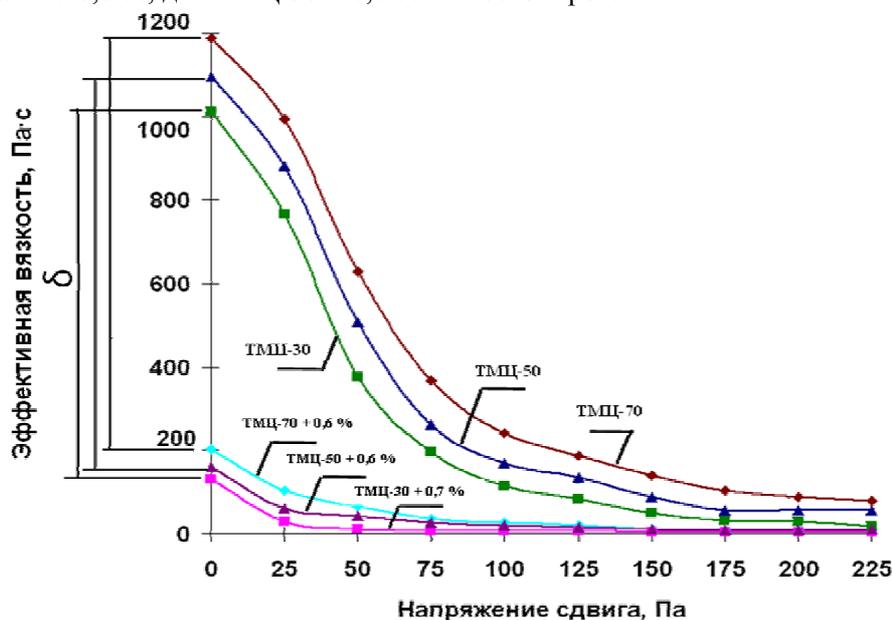


Рис. 1. Реограммы вяжущих в зависимости от состава

Анализ гранулометрического состава вяжущих с одинаковой удельной поверхностью при разном содержании кремнеземного компонента показал схожесть кривых. При этом основная масса частиц характеризуется диапазоном размеров частиц 40–60 мкм. При переходе от ВНВ-30 к ВНВ-70 заметно равномерное увеличение распределения частиц в сторону меньших значений их размеров. Увеличение содержания пластифицирующей добавки от 0,5 до 0,7 % при помоле вяжущего не повышает размолоспособность, о чем свидетельствует незначи-

тельное смещение распределения в сторону крупных частиц.

Анализ физико-механических характеристик композиционных вяжущих различных марок позволяет сделать вывод об их соответствии нормативным документам (табл. 1). Однако, нормальная плотность для связующих характеризуется несколько завышенными показателями, что обусловлено значительным содержанием в составе кремнеземного компонента обладающего повышенной водопотребностью.

Таблица 1

**Физико-механические свойства композиционных вяжущих**

Состав вяжущего	Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /кг	НГ, %	Сроки схватывания, мин	
			начало	конец
ВНВ-30	550	25	195	270
ВНВ-50		23	175	230
ВНВ-70		20,5	165	220

Для оптимизации состава КВ проведено математическое планирование эксперимента второго порядка. В качестве параметров оптимизации, характеризующих физико-механические показатели вяжущего, приняты: прочность на

сжатие, прочность при изгибе и средняя плотность. В качестве варьируемых факторов принято содержание кремнеземного компонента и пластифицирующей добавки (табл. 2).

Таблица 2

## Условия планирования эксперимента

Фактор		Уровни варьирования			Интервал варьирования
		-1	0	1	
натуральный вид	кодированный вид				
Количество кремнеземного компонента, %	X <sub>1</sub>	30	50	70	20
Количество добавки, %	X <sub>2</sub>	0,5	0,6	0,7	0,1

Уровни варьирования факторов были выбраны такими, что бы любое их сочетание, предусмотренное планом, было реализуемо на разработанных моделях и учитывает реальные технологические условия.

С целью уменьшения влияния систематических ошибок, вызываемых внешними условиями, проведена рандомизация опытов, запланированных в матрице плана экспериментов. Для этих целей использована таблица случайных чисел, по которой получена следующая последовательность опытов: 5, 7, 4, 3, 8, 2, 9, 1, 6.

Необходимое количество образцов исследуемого материала устанавливали статистическим

путем, исходя из величины характерного для данного метода испытаний коэффициента вариации  $K_{вар}$  и требуемой степени точности результатов  $K_{дон}$ .

Для проведения эксперимента были заформованы образцы – балочки 4×4×16 см, которые подвергались тепловой обработке в пропарочной камере. В дальнейшем полученные образцы испытывались, и полученные результаты были обработаны (табл. 3). Результатом обработки экспериментальных данных стали уравнения регрессии, на основании которых и были построены номограммы (рис. 2).

Таблица 3

## Свойства ВНВ в зависимости от состава

№ п/п	Состав вяжущего, %		Физико-механические характеристики КВ		
	Кремнеземный компонент	Добавка СП-1	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	R <sub>изг</sub> , МПа	R <sub>сж</sub> , МПа
1	30	0,5	2200	6,8	49,44
2	70	0,5	2159	3	20,97
3	30	0,7	2190	5	48,32
4	70	0,7	2160	2,7	19,34
5	50	0,6	2190	4,9	38,24
6	50	0,7	2189	4,2	31,34
7	50	0,5	2182	5,1	34,78
8	70	0,6	2160	3	23,42
9	30	0,6	2224	7,6	55,31

Для прочности на сжатие КВ уравнение регрессии в кодированном и декодированном виде имеет вид:

$$y=38,09-14,89 \cdot x_1-1,032 \cdot x_2+1,347 \cdot x_1^2-4,96 \cdot x_2^2-0,1 \cdot x_1 \cdot x_2$$

$$R_{сж}=90,13+1,05 \cdot K-587,4 \cdot Д-0,003 K^2+496 Д^2+0,05 \cdot K \cdot Д$$

В кодированном и декодированном виде уравнение регрессии для прочности при изгибе КВ имеет вид:

$$y=4,48-1,525 \cdot x_1-0,525 \cdot x_2+0,375 \cdot x_1 \cdot x_2$$

$$R_{изг}=17,07-0,19 \cdot K-14,62 \cdot Д+0,19 \cdot K \cdot Д$$

Для средней плотности КВ уравнение регрессии в кодированном и декодированном виде имеет вид:  

$$y = 2195 - 22,5 \cdot x_1 - 0,33 \cdot x_2 + 4,83 \cdot x_1^2 - 11,3 \cdot x_2^2 + 2,75 \cdot x_1 \cdot x_2$$

$$\rho = 1857,5 - 0,74 \cdot K + 1283,9 \cdot D - 0,012 \cdot K^2 - 1130 \cdot D^2 + 1,37 \cdot K \cdot D$$

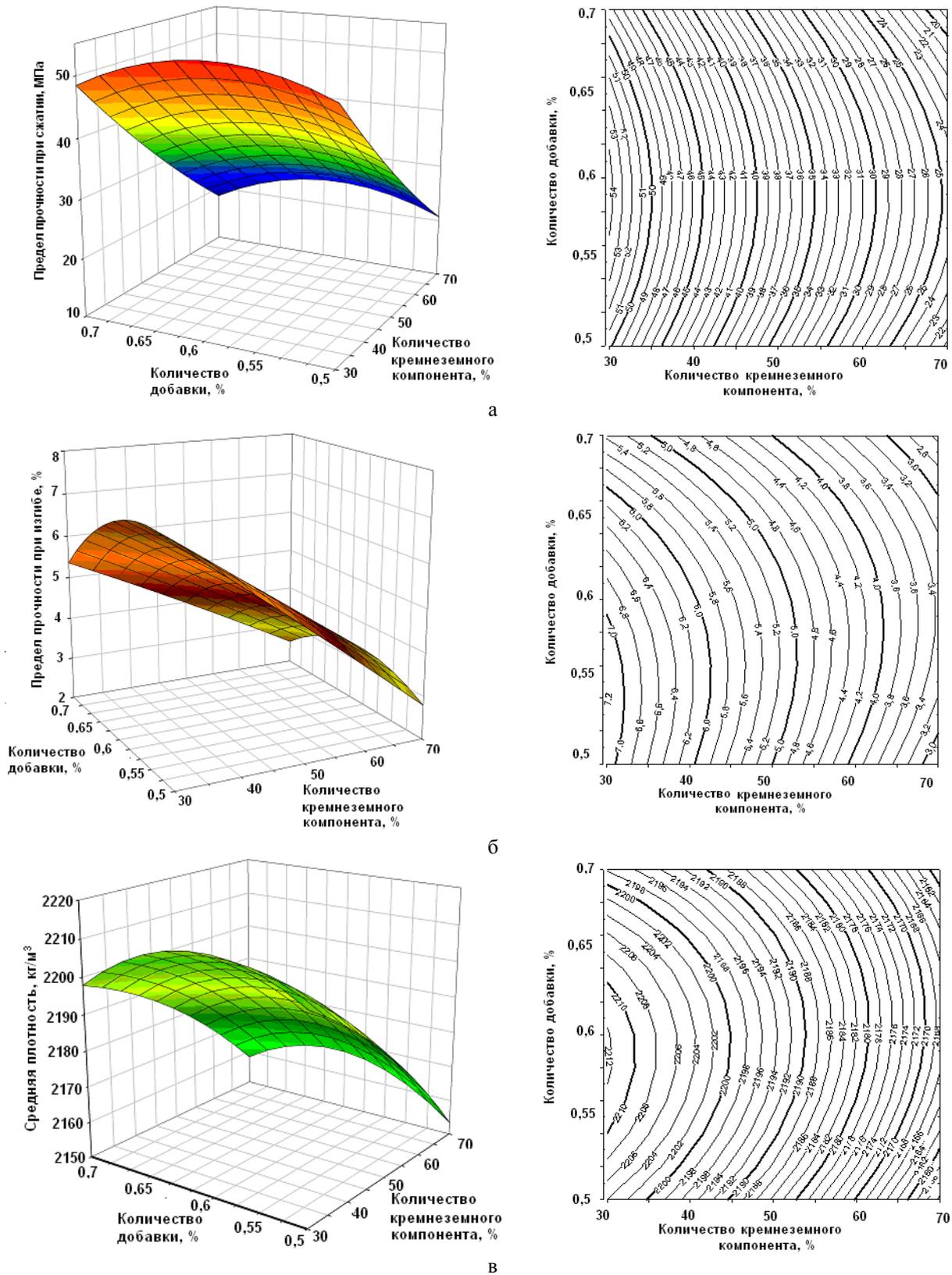


Рис. 2. Влияние количества вводимых кремнеземного компонента и добавки на физико-механические свойства КВ:  
 а – предел прочности при сжатии, б – предел прочности при изгибе, в – среднюю плотность

Анализ полученных данных (рис. 2) показывает, что при введении 30 % кремнеземного компонента в состав ВНВ прочность вяжущего меняется в зависимости от дозировки добавки в пределах 50–55 МПа. Оптимальной дозировкой принято считать 0,6 % добавки, так как именно данное количество обеспечивает максимальную прочность при определенном количестве кремнеземного компонента.

При введении 30 % кремнеземного компонента и 0,6 % пластифицирующей добавки, возможно достичь максимальной прочности вяжущего – 55 МПа, что удовлетворяет диапазону прочностей для марки портландцемента ЦЕМ I 52,5 Н. Увеличение содержания кремнеземного компонента до 50 % при оптимальной дозировке добавки приводит к снижению активности вяжущего до 38 МПа, что обусловлено низким коэффициентом качества песка Эсского месторождения как компонента композиционного вяжущего, но несмотря на это, его можно исполь-

зовать для получения мелкозернистого бетона, приняв во внимание пониженную активность по сравнению с активностью портландцемента марки ЦЕМ I 42,5 Н. При замене 70 % цемента кремнеземным компонентом прочность вяжущего даже не достигает 25 МПа, поэтому его использование в дальнейшем нерационально.

По результатам анализа номограммы прочности при изгибе можно сделать вывод, что характер ее изменения незначительно отличается, а пик предела прочности при изгибе смещается в сторону снижения пластифицирующей добавки с 0,6 % до 0,55 %.

Сходный характер имеет номограмма зависимости средней плотности КВ от выбранных факторов. Максимальные значения в данном диапазоне соотношения компонентов наблюдаются при введении кремнеземного компонента и добавки Полипласт СП-1 – 30 % и 0,6 % соответственно.

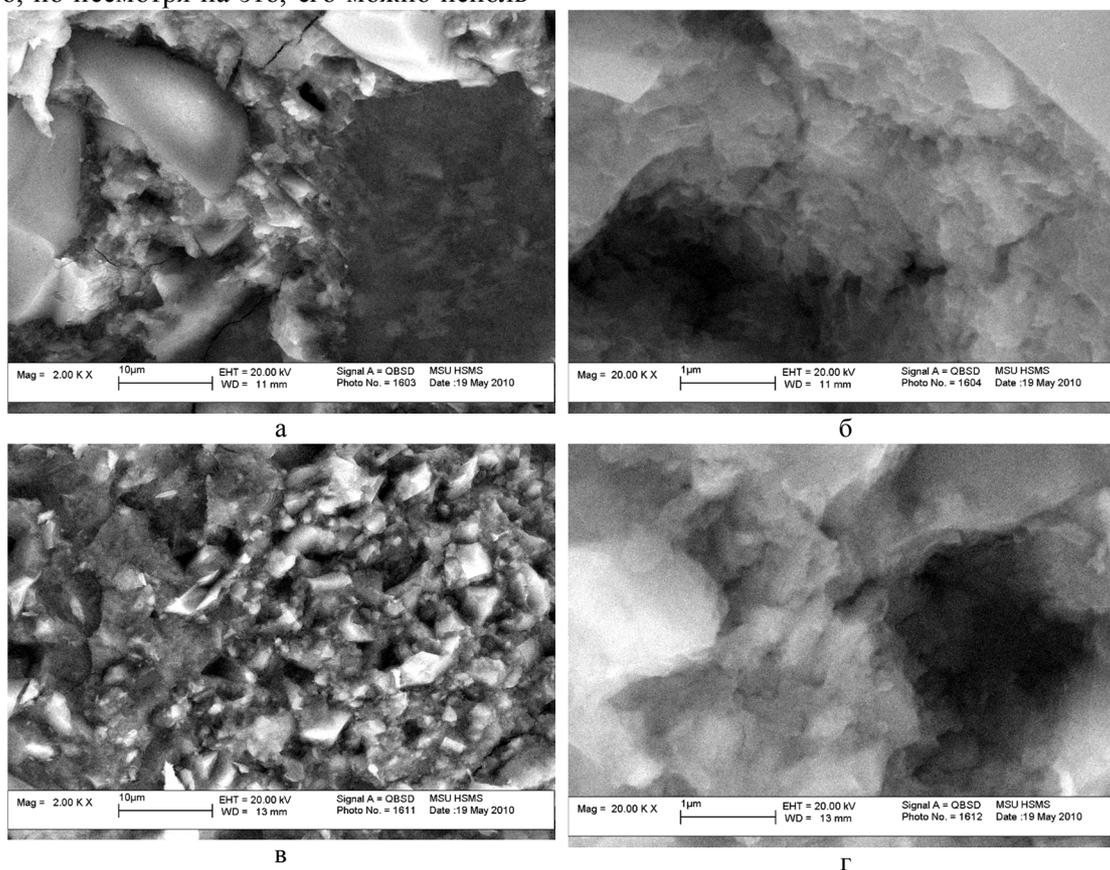


Рис. 3. Микроструктура цементного камня ВНВ нормального твердения в возрасте 28 сут с содержанием кремнеземного компонента: а, б – 50 %; в, г – 30 %

Анализ микроструктуры цементного камня с различным содержанием кремнеземного компонента в виде песка Эсского месторождения (рис. 3), позволяет сделать вывод, что формируемая матрица в затвердевшем вяжущем с большим содержанием цемента является более однородной с преобладанием зерен кварца неболь-

шого размера до 6–7 мкм (рис. 3, в), в то время как в материале на ВНВ-50 размер частиц до 25 мкм (рис. 3, а). Это объясняет более высокие прочностные показатели на ВНВ-70. Несмотря на различия в размере частиц, характер новообразований цементного камня существенно не меняется (рис. 3, б, г). Наличие скрытокристал-

лических гидросиликатов кальция, растущих во всех направлениях, способствует уплотнению цементной матрицы, снижению ее пористости и омоноличиванию структуры в целом.

**Выводы.** Установлено оптимальное количество пластифицирующей добавки Полипласт СП-1 для различных композиционных вяжущих, необходимое для достижения требуемой подвижности.

Установлено влияние состава кремнеземного компонента на гранулометрию композиционного вяжущего. Присутствие в составе полиминерального песка полевых шпатов, которые обладают спайностью и более низкой твердостью, по сравнению с кварцем, приводит: к улучшению размолоспособности вяжущего, а, следовательно, снижению энергозатрат на помол; полимодальному распределению частиц по размерам и созданию более плотной упаковки частиц ВНВ; снижению микропористости цементного камня мелкозернистого бетона.

Получены математические модели зависимости предела прочности при сжатии и при изгибе, а также средней плотности композиционного вяжущего от соотношения кварцсодержащего и пластифицирующего компонентов в его составе, позволяющие определить оптимальное соотношение системы «кремнеземный компонент – цемент – пластифицирующая добавка» для получения требуемых характеристик вяжущего при минимальных материальных затратах.

Структура образцов КВ с меньшим содержанием кремнеземного компонента обладает значительно большей однородностью, плотностью и меньшей пористостью, что объясняет более высокие прочностные показатели данного вяжущего.

*\*Работы выполнены при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 14-43-08020.*

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лесовик В.С., Сулейманова Л.А., Кара К.А. Энергоэффективные газобетоны на композиционных вяжущих для монолитного строительства // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2012. №3. С. 10–20
2. Сулейманова Л.А., Лесовик В.С., Хархардин А.Н. Топологические свойства полидисперсных композиционных вяжущих для неавтоклавных ячеистых бетонов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2013. № 2. С. 46–50.
3. Агеева М.С., Алфимова Н.И. Эффективные композиционные вяжущие на основе техногенного сырья. Saarbrücken, 2015. 75 с.
4. Алфимова Н.И., Лесовик В.С., Савин А.В., Шадский Е.Е. Перспективы применения композиционных вяжущих при производстве железобетонных изделий // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2014. № 5 (88). С. 95–99.
5. Лесовик В.С., Савин А.В., Алфимова Н.И. Гинзбург А.В. Оценка защитных свойств бетонов на композиционных вяжущих по отношению к стальной арматуре // Строительные материалы. 2013. №7 С. 56–58.
6. Алфимова Н.И., Вишневская Я.Ю., Трунов П.В. Композиционные вяжущие и изделия с использованием техногенного сырья: монография. Saarbrücken. Изд-во LAP. 2013. 127 с.
7. Лесовик В.С., Агеева М.С., Иванов А.В. Гранулированные шлаки в производстве композиционных вяжущих // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2011. № 3. С. 29.
8. Алфимова Н.И., Трунов П.В., Шадский Е.Е. Модифицированные вяжущие с использованием вулканического сырья: монография. Saarbrücken: Изд-во LAP LAMBERT Academic Publishing. 2015. 133 с.
9. Лесовик В.С., Савин А.В., Алфимова Н.И. Степень гидратации композиционных вяжущих как фактор коррозии арматуры в бетоне // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2013. № 1 (649). С. 28–33.
10. Лесовик В.С., Вишневская Я.Ю., Алфимова Н.И., Савин А.В. Влияние гидротермальной обработки и давления на структурообразование композиционных вяжущих // Технологии бетонов. 2013. № 10 (87). С. 38–39.
11. Кара К.А. Газобетоны на композиционных вяжущих для монолитного строительства: автореф. ... канд. техн. наук. Белгород, 2011. 25 с.
12. Сулейманова Л.А., Кара К.А. Газобетоны на композиционных вяжущих для монолитного строительства. Белгород, 2011. 150 с.
13. Лесовик Р.В., Жерновский И.В. Выбор кремнеземсодержащего компонента композиционных вяжущих веществ // Строительные материалы. 2008. № 8. С. 78–79.
14. Lesovik V.S., Alfimova N.I., Trunov P.V. Reduction of energy consumption in manufacturing the fine ground cement // Research Journal of Applied Sciences. 2014. Т. 9. № 11. С. 745–748.
15. Lesovik V.S., Urkhanova L.A., Gridchin A.M., Lkhasaranov S.A. Composite binders on the basis of perlite raw material of Transbaikalia // Research Journal of Applied Sciences. 2014. Т. 9 №12. С. 1016–1020.

16. Lesovik R.V., Klyuyev S.V., Klyuyev A.V., Ntrebenko A.V., Kalashnikov N.V. Fiber concrete on composite knitting and industrial sand KMA for bent designs // World Applied Sciences Journal 2014. Т. 30. №8. С. 964–969.

17. Lesovik R.V., Klyuyev S.V., Klyuyev A.V., Ntrebenko A.V., Durachenko A.V. High-strength fiber-reinforced concrete containing technogenic raw materials and composite binders with use of nanodispersed powder // Research Journal of Applied Sciences. 2014. Т 9. №12. С. 1153–1157.

18. Lesovik R.V., Klyuev S.V., Klyuev A.V., Kazlitin S.A., Ntrebenko A.V., Durachenko A.V. Fiber-reinforced concretes made of technogenic raw materials and composite binders for industrial

building floors // International Journal of Applied Engineering Research. 2014. Т 9. №22. С. 16711–16724.

19. Ключев А.В., Лесовик Р.В. Сталефибробетон на композиционных вяжущих и техногенных песках КМА для изгибаемых конструкций // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2012. № 2. С. 14–16.

20. Соловьева Л.Н., Огурцова Ю.Н., Бондаренко А.И., Боцман А.Н. Характеристики песков с учетом их применения в композиционных вяжущих // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2012. № 2. С. 31–33.

---

**Strokova V.V., Nelyubova V.V., Botsman L.N., Ogurtsova Yu.N., Hahaleva E.N.**

### COMPOSITE BINDERS FOR MONOLITHIC CONSTRUCTION IN NORTHERN REGIONS

*The paper demonstrates the possibility of production composite binders of different compositions for monolithic placement of concrete, including at freezing temperatures. Mathematical models of relations of compressive strength and flexural strength, and an average density of composite binder (CB) from the ratio of quartz-bearing and plasticizing components in its composition were stated. Compositions of composite binders based on sand of Essk deposit that allow reduction of cement consumption with constant physical and mechanical characteristics were developed. The influence of the composition of the silica component on the particle-size determination of the composite binder were stated. Rheotechnological characteristics and microstructural features of the cement stone of various compositions were studied.*

**Key words:** composite binders, fine ground cement, plasticizer, silica component, microstructure, hydrated calcium silicate.

---

**Строкова Валерия Валерьевна**, доктор технических наук, профессор, директор Инновационного научно-образовательного и опытно-промышленного центра Наноструктурированных композиционных материалов, зав. кафедрой материаловедения и технологии материалов.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46

E-mail: vvstrokova@gmail.com

**Нелубова Виктория Викторовна**, кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедения и технологии материалов, ст. н. с. НИИ Наносистемы в строительном материаловедении

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46

E-mail: nelubova@list.ru

**Боцман Лариса Николаевна**, кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедения и технологии материалов

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46

E-mail: lora80@list.ru

**Огурцова Юлия Николаевна**, кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедения и технологии материалов

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46

E-mail: ogurtsova.y@yandex.ru

**Хахалева Елена Николаевна**, кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедения и технологии материалов

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46

E-mail: hahaleva@intbel.ru