

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-8-8-16

Лесовик В.С., *Толыпин Д.А., Лесовик Р.В., Ряпухин А.Н.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: tolypin.daniil@yandex.ru

ЭФФЕКТИВНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МИНЕРАЛЬНЫХ ДОБАВОК ДЛЯ ЭКОНОМИИ РАСХОДА ВЯЖУЩЕГО

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы экономии портландцемента в бетонах путем замещения минеральной добавкой части вяжущего и мелкого заполнителя. Исследования проводили на бетонных смесях различного состава, моделирующих разный расход вяжущего ($\approx 250, 350$ и 450 кг/м^3) и мелкого заполнителя. Установлено закономерное влияние количества минеральной добавки на прочность бетона при сжатии в зависимости от содержания вяжущего и обусловленную этим экономию последнего. Установлено, что в бетонах с низким расходом вяжущего ($190\text{--}230 \text{ кг/м}^3$) наибольшая прочность и удельная экономия портландцемента $\mathcal{E}_\text{ц}=58,8 \%$ наблюдается при вводе максимальной дозировки минеральной добавки (70 %), в то время как в бетонах с высоким содержанием цемента ($430\text{--}390 \text{ кг/м}^3$) максимальная прочность и удельная экономия цемента $\mathcal{E}_\text{ц}=42,8 \%$ наблюдалась при минимальной дозировке добавки (40 %). Превышение прочности при сжатии модифицированных образцов бетона по сравнению с контрольными составами указывает на наличие резерва экономии цемента. Показано, что сочетание крупности мелкого заполнителя и тонкодисперсной добавки оказывает большое влияние на прочность бетона. Результаты исследований могут быть полезны при проектировании составов бетонов различных классов прочности, что имеет принципиальное значение в условиях ресурсосбережения и снижения экологической нагрузки стройиндустрии.

Ключевые слова: бетон, расход цемента, минеральная добавка, суперпластификатор, экономия вяжущего.

Введение. В РФ последнее время наблюдается дефицит цемента. Хотя в 2024 году было изготовлено 64,9 млн. т. портландцемента, это количество не удовлетворило возросшую потребность в 66,7 млн. т. [1]. Это связано с тем, что темпы роста объемов производства бетона превышают объемы производства портландцемента, что особенно актуально в связи с необходимостью восстановления разрушенного жилья в течение 2022-2026 годов на территории РФ. Выполнение требований по объему выпуска бетона можно обеспечить за счет снижения расхода цемента, благодаря использованию цементосберегающих технологий. К ним относятся: применение добавок пластифицирующего действия, минеральных наполнителей, эффективных методов приготовления бетонных смесей и др. Наилучший результат достигается путем сочетания нескольких технологических приемов [2–4].

Применение минеральных добавок, вводимых в бетонные смеси, оказывает существенное влияние на комплекс свойств: способность разжижаться или снижать водопотребность бетонной смеси при помощи суперпластификаторов, кинетику твердения и структурообразование бетона, состав гидратных фаз, что в итоге оказывает влияние на технологию изготовления железобетонных изделий и области их использования [5–8]. Ввод минеральных добавок может проис-

ходить либо в процессе производства смешанных цементов, либо отдельно при приготовлении бетонных смесей [9–13]. Второй вариант обладает рядом преимуществ, так как дает возможность выбирать добавки по экономическим или технологическим показателям, использовать местное сырье, в том числе и отходы производства, осуществлять оптимальное дозирование в зависимости от ряда параметров: прочности бетона, вида и дисперсности наполнителей, условий твердения и др. [14–15].

С точки зрения экономии портландцемента посредством применения минеральных наполнителей известны два подхода. Первый основан на замещении части портландцемента на равное количество минеральной добавки, что чаще всего сопровождается снижением прочности при относительно несущественном уменьшении водопотребности. Второй заключается в замещении минеральной добавкой не только доли портландцемента, но и частично мелкого заполнителя, что является более эффективным способом в плане экономии цемента и обеспечения требуемых прочностных характеристик [16–17]. Применение минеральных добавок в бетонах характеризуется закономерным проявлением свойств композита, обусловленных расходом вяжущего, В/Ц, дозировками добавок и т.д. [15, 18]

В этой связи целью данной работы является исследовать закономерности влияния расхода

портландцемента и крупности мелкого заполнителя на эффективность минеральных добавок и возможность экономии вяжущего.

Методика. Исследования проводили на образцах мелкозернистого бетона $3 \times 3 \times 3$ см, моделирующих составы с расходом цемента 190–450 кг/м³, и цементного камня. Тонкодисперсный кварц вводили в количестве 40 и 70 % от массы портландцемента взамен доли мелкого заполнителя (≈ 7 –14 %). Для регулирования содержания кварцевого песка вводили дробленый гранит (2,5–5 мм). Суперпластификатор (СП) вводили в количестве 0,4 % от массы порошковой части (ПЦ+МД) бетонной смеси, так как дисперсный наполнитель является компонентом цементного теста и значительно адсорбирует воду по сравнению с крупным и мелким заполнителем. Водотвердое отношение подбирали по ГОСТ 310.4-81, при сохранении равной подвижности бетонных смесей. Образцы после изготовления твердели в лабораторной пропарочной камере КУП-1А по режиму 2+3+8+остывание ($t=80$ °C). Испытания на прочность проводили на лабораторном гидравлическом прессе ПГМ-100 МГ4 по 6 образцов каждого состава (ГОСТ 10180–2012). Образцы цементного камня $3 \times 3 \times 3$ см изготавливали из теста нормальной густоты (310.3-76). В работе использовали: кварцевый песок «Формматериалы» ($M_{кр}=1,62$ и $2,15$; ГОСТ 8736-2014) г. Воронеж; гранит 2,5–5 мм Павловского карьера (Воронежская обл.); тонкодисперсный кварц ($S_{уд} = 170, 250, 380, 550$ кг/м²), тонкодисперсный кварцито-песчаник ($S_{уд} = 400, 500$ и 600 кг/м²) Лебединского ГОКа, портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н ЗАО «Осколцемент» ($\tau_{н.схв}=230$ мин; НГ=26 %, $C_3S=61,59$ %, $C_2S=14,2$ %, $C_3A=6,83$ %, $C_4AF=3,73$ %); суперпластификатор «Полипласт ПК тип S» (30 %-й р-р, ТУ 20.59.59-098-58042865-2022, ГОСТ 24211). Гранулометрию тонкодисперсных компонентов определяли с помощью прибора MicroSizer 201.

Основная часть. Для исследования возможности экономии портландцемента использовали подход, при котором минеральная добавка (МД) заменяет часть мелкого заполнителя и часть портландцемента. В качестве контрольных выбрали составы с соотношением Ц:Гр:П:Дм (Цемент: Гранит: Песок: Добавка минеральная) – 1:3,9:3,8:0; 1:2,7:2,6:0 и 1:2,0:1,9:0; моделирующие расход вяжущего приблизительно 250, 350 и 450 кг/м³ и содержание мелкого заполнителя в реальных бетонных смесях. Бетонные смеси характеризовались нормальной консистенцией по ГОСТ 310.4-76 ($R_K=106$ –115 мм). В табл. 1 и на рис.1 приведены результаты испытаний.

Результаты исследований показали, что применение минерального наполнителя взамен части цемента и мелкого заполнителя, обуславливает эффективное снижение водопотребности на 35–40 %, благодаря увеличению объема цементного теста и концентрации частиц (ПЦ+МД). При этом повышается однородность структуры бетона и уплотнение цементной матрицы. Указанный эффект проявляется в разной степени при различном содержании вяжущего. В смесях, отличающихся низким расходом цемента, повышение объема смешанной цементной дисперсии путем ввода МД усилило водоредуцирующее действие суперпластификатора на 35 %. С дальнейшим ростом содержания цемента и дисперсной фазы эффективность водоредуцирующего действия суперпластификатора возросла до 40 %.

В качестве показателя эффективности минерального наполнителя использовали удельную экономию портландцемента $\mathcal{E}_ц$ на единицу прочности бетона контрольного состава [17]:

$$\mathcal{E}_ц = \frac{Ц_к/R_к - Ц_i/R_i}{Ц_к/R_к} \cdot 100\% \quad (1)$$

где $Ц_к$, $R_к$ – расход цемента и прочность бетона контрольного состава;

$Ц_i$, R_i – расход цемента и прочность бетона с различным содержанием МД.

Применение показателя удельной экономии цемента $\mathcal{E}_ц$ позволяет оценить эффективность применения минеральной добавки в бетонах. Установлены характерные зависимости $\mathcal{E}_ц$ от расхода вяжущего и дозировок МД. Полученные данные (табл. 1) свидетельствуют о том, что при низком содержании вяжущего (составы № 1-8), целесообразно вводить максимальное количество добавки (70 %). При этом обеспечивается повышение прочности (на 12–55 %) по сравнению с контрольным составом. Достижение удельной экономии портландцемента до 33,4–58,8 % (в абсолютных единицах 20–60 кг/м³) свидетельствует о наличии резерва экономии цемента с сохранением требуемой прочности.

При снижении расхода портландцемента от 350 до 330–310–290 кг/м³ (составы 2.1-2.8), микронаполняющий эффект МД варьировался в зависимости от дозировки. Наблюдалось повышение $\mathcal{E}_ц$ от 10,2 до 27,8 % (при МД=70 %) и снижение $\mathcal{E}_ц$ от 32,7 до -2,8 % (при МД=40 %) по мере снижения расхода вяжущего от 330 до 290 кг/м³. При минимальном содержании цемента (290 кг/м³) и наибольшем содержании МД (70%) прочность бетона не только не уступала контрольному составу, но и заметно превосходила на 25 %.

В бетонах с высоким содержанием цемента (составы 3.1-3.8) (450–390 кг/м³) наблюдается

снижение оптимального количества микронаполнителей, целесообразно использовать 40 % МД. При этом обеспечивается увеличение прочности на 30,5–39,3 % при одновременной удельной экономии цемента $\Delta_{\text{ц}}=24,3\text{--}42,8\%$. Расчет сокращения выбросов CO_2 производили с учетом

того, что объем выделяемого углекислого газа при производстве 1 т портландцемента составляет 0,83 т [18]. При экономии портландцемента 20–60 кг/м³ выбросы CO_2 снижаются на 16–50 кг на 1 м³ бетона.

Таблица 1

Составы и свойства бетонов с различным расходом вяжущего и МД

№ сост.	Ц:Гр:П:Дм	В/Т	Ц, кг/м ³	Ц+Дм, кг/м ³	R _{сж} ^{тв} , МПа	Э, кг/м ³ /%	Э _ц , %
1	1:3,8:3,7:0	0,76	250	250	4,8	-	-
2К	1:3,9:3,8:0	0,71	250	250	6,5	-	-
3	1:4,2:3,9:0,4	0,51	230	322	4,6	20/4,4	-29,1
4	1:4,2:3,6:0,7	0,42	230	391	14,5	20/4,4	58,8
5	1:4,6:4,5:0,4	0,54	210	294	5,1	40/8,8	-6,5
6	1:4,6:4,2:0,7	0,43	210	357	9,8	40/8,8	44,6
7	1:5,1:5,1:0,4	0,57	190	266	3,1	60/13,3	-19,3
8	1:5,1:4,8:0,7	0,46	190	323	7,4	60/13,3	33,4
2.1	1:2,6:2,6:0	0,55	350	350	16,8	—	—
2.2К	1:2,7:2,6:0	0,50	350	350	17,7	—	—
2.3	1:2,9:2,5:0,4	0,36	330	462	24,8	20/4,4	32,7
2.4	1:2,9:2,2:0,7	0,29	330	561	18,6	20/4,4	10,2
2.5	1:3,0:2,8:0,4	0,36	310	434	18,4	40/8,8	14,8
2.6	1:3,0:2,5:0,7	0,29	310	527	21,7	40/8,8	27,7
2.7	1:3,3:3,0:0,4	0,37	290	406	12,1	60/13,3	-2,8
2.8	1:3,3:2,8:0,7	0,30	290	493	23,6	60/13,3	27,8
3.1	1:1,9:1,9:0	0,38	450	450	16,0	—	—
3.2К	1:2,0:1,9:0	0,33	450	450	21,3	—	—
3.3	1:2,1:1,7:0,4	0,24	430	602	35,6	20/4,4	42,8
3.4	1:2,1:1,4:0,7	0,22	430	731	22,7	20/4,4	10,3
3.5	1:2,2:1,9:0,4	0,24	410	574	31,4	40/8,8	61,8
3.6	1:2,2:1,6:0,7	0,22	410	697	17,8	40/8,8	-9,1
3.7	1:2,3:2,1:0,4	0,25	390	546	24,4	60/13,3	24,3
3.8	1:2,3:1,8:0,7	0,21	390	663	21,8	60/13,3	15,3

Анализ полученных результатов (рис. 1) свидетельствует о закономерном влиянии количества минеральной добавки на прочность бетона при сжатии в зависимости от содержания цемента. Отчетливо выражено уменьшение рационального содержания минеральной добавки по мере роста расхода вяжущего, характеризующееся нелинейной зависимостью. Прочность бетонов с низким расходом вяжущего (190–230 кг/м³) повышается при введении МД в наибольшей дозировке (70 %). В этом случае микронаполняющий эффект с ростом дозировки возрастает, добавка эффективно компенсирует недостаток цемента, что способствует уплотнению структуры цементной матрицы. В то время как в области высокого расхода цемента (390–430 кг/м³) характерна тенденция к снижению оптимального содержания МД и достигаемого эффекта. С повышением расхода цемента положительный микронаполняющий эффект ослабевает, так как увеличение содержания добавки приводит к разбавлению цемента, препятствует формированию непо-

средственных контактов между частицами цемента, что ослабляет цементную матрицу, прочность при этом уменьшается. Однако, следует учитывать, что влияние МД сводится не только к структурообразованию и прочностным показателям, но и значительно модифицирует взаимодействие компонентов цементных систем на микроуровне, включая процессы гидратации. В области среднего расхода вяжущего (290–330 кг/м³) наблюдается вариабельность оптимальных дозировок.

Приведенный анализ показывает, что оптимальное количество добавки является откликом системы «цемент+минеральная добавка» на структурирование дисперсионной среды в бетоне, при ее оптимальном насыщении. Оптимальное количество минеральной добавки в бетоне может увеличиваться по мере снижения расхода вяжущего. В бетонах с низким расходом вяжущего (<В15–В22,5) минеральные добавки дают наилучший эффект, при этом экономия цемента может достигать 60 кг/м³ и выше.

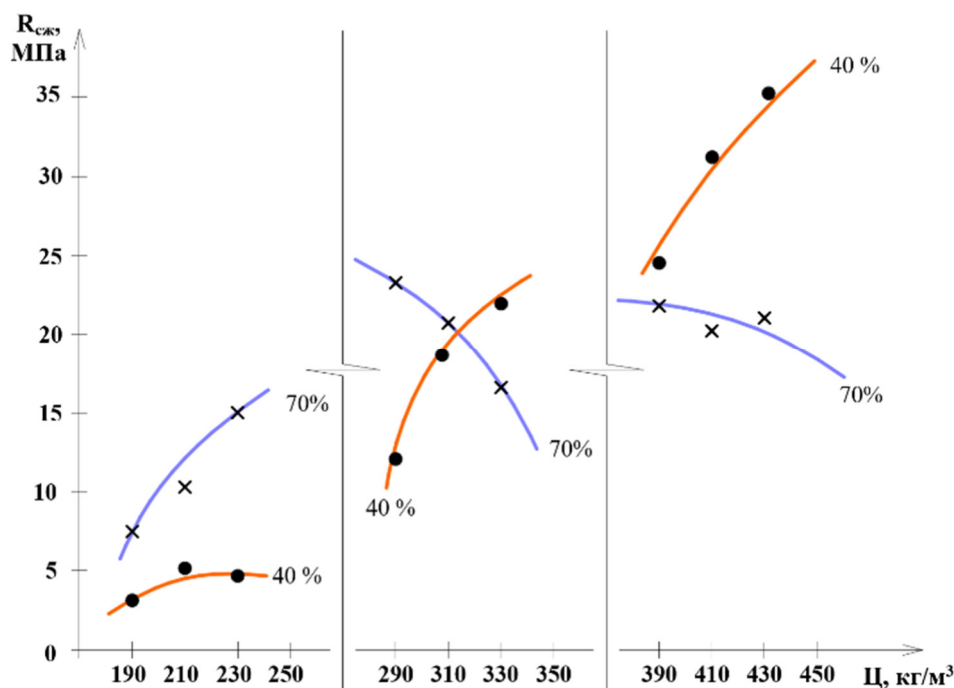
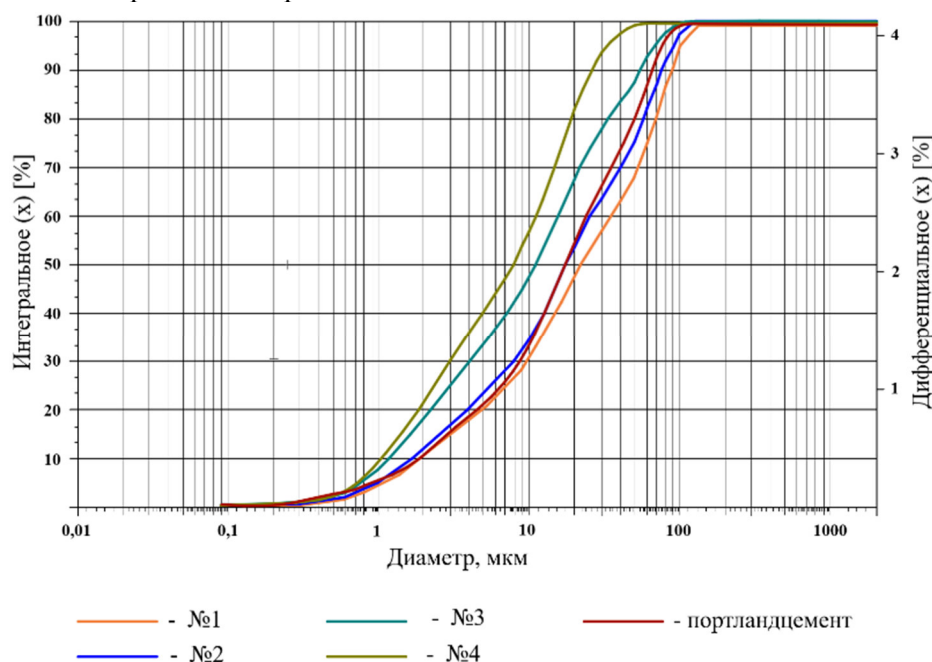


Рис. 1. Зависимость прочности бетона от расхода вяжущего и соотношения ПЦ:МД

Далее исследовали взаимосвязь между удельной поверхностью тонкодисперсной минеральной добавки и крупностью мелкого заполнителя, и их совокупным влиянием на прочность композита. Использовали молотый кварц различной степени измельчения с удельной поверхностью 170, 250, 386 и 550 м²/кг. В качестве мелкого заполнителя применяли кварцевый песок: мелкий с модулем крупности $M_{кр}=1,6$ и крупный с $M_{кр}=2,1$. Гранулометрия молотого кварца с различной удельной поверхностью приведена на

рис. 2. С увеличением удельной поверхности тонкодисперсного кварца ($S_{уд} = 380$ и 550 м²/кг) интегральные гранулометрические кривые закономерно смещаются в область более тонких частиц относительно ПЦ (рис. 3, № 3 и 4). Интегральная гранулометрическая кривая кварца с $S_{уд} = 170$ м²/кг отличается наиболее грубодисперсным составом, а гранулометрическая кривая измельченного кварца с $S_{уд} = 250$ м²/кг практически совмещается с кривой ПЦ.

Рис. 2. Интегральные гранулометрические кривые тонкодисперсного кварца (№1-4) и ПЦ (№5): 1) $S_{уд}=170$ м²/кг; 2) $S_{уд}=250$ м²/кг; 3) $S_{уд}=380$ м²/кг; 4) $S_{уд}=550$ м²/кг; 5) 320 м²/кг

Изготавливали образцы бетона состава Ц:Гр:П:Дм=1:3,3:2,8:0,7, моделирующие бетон с расходом цемента 290 кг/м³ и содержанием тонкодисперсного кварца 70 %. Контрольный состав (9К) использован для оценки потенциала экономии цемента, соответствует бетону с расходом

350 кг/м³ без МД. Результаты исследований показали, что сочетание дисперсности мелкого заполнителя и тонкодисперсной добавки оказывает большое влияние на прочность бетона (таблица 2).

Таблица 2

Влияние комбинирования дисперсности мелкого заполнителя и наполнителя на прочность

№	Ц, кг/м ³	МД, кг/ м ³ (%)	S _{уд} МД, м ² /кг	М _{кр} песка	СП, %	В/Т	R _{сж} , МПа (ТВО)	ΔR _{сж} , %
1	290	203 (70)	170	2,15	0,6	0,27	25,4	+30,3
2	290	203 (70)	250	2,15	0,6	0,27	15,1	-17,2
3	290	203 (70)	380	2,15	0,6	0,27	22,4	+20,9
4	290	203 (70)	550	2,15	0,6	0,27	22,8	+22,4
5	290	203 (70)	170	1,62	0,6	0,3	13,6	-30,1
6	290	203 (70)	250	1,62	0,6	0,3	13,8	-28,3
7	290	203 (70)	380	1,62	0,6	0,3	23,6	+25,0
8	290	203 (70)	550	1,62	0,6	0,3	23,4	+24,4
9К	350	-	-	1,62	0,6	0,3	17,7	-

Исследования показали, что первостепенное значение играет степень совмещения гранулометрии МД с гранулометрией портландцемента (рис. 3). Если их гранулометрический состав достаточно близок, то крупность применяемого мелкого заполнителя не играет существенной роли (составы № 2 и 6). При этом ввод наполнителя (70 %) не повышает прочность композита, и, соответственно, не дает экономии вяжущего. Если используется наполнитель с низкой удельной поверхностью 170 м²/кг (состав №1 и 5), у которого гранулометрия заметно смещается в

сторону грубодисперсных фракций, то необходимо использовать крупный песок (М_{кр}=2,1). В комбинации с мелким кварцевым песком (М_{кр}=1,62) прочность резко снижается, так как происходит перенасыщение системы мелкими частицами песка и наполнителя, размерность которых может совпадать. Наполнитель с высокой степенью дисперсности – 380 и 550 см²/г, у которого гранулометрия смещена в область более мелких фракций (рис. 3), хорошо сочетается как с мелким, так и крупным песком. С мелким песком прочность несколько выше, приблизительно на 5,4 %.

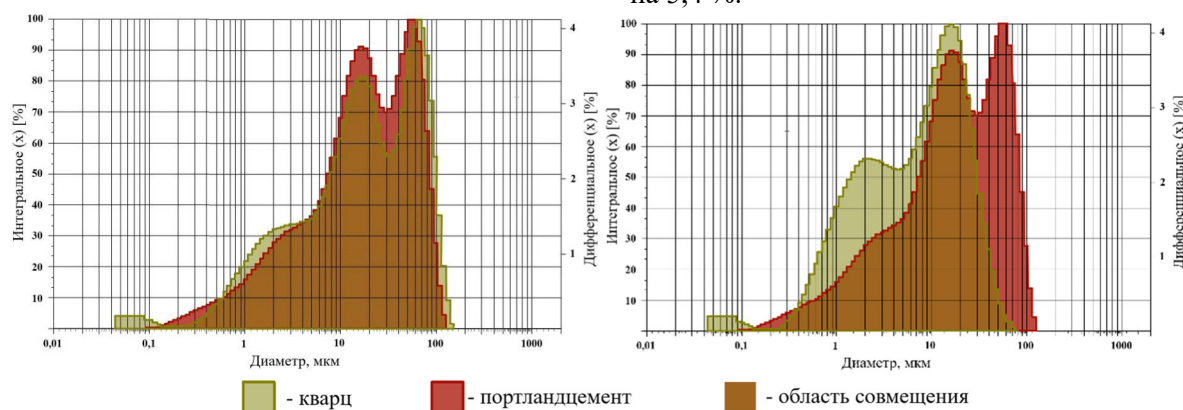


Рис. 3. Гранулометрия портландцемента и тонкодисперсного кварца с S_{уд}:
а) 250 м²/кг, б) 550 м²/кг

Ценным практическим выводом является то, что можно эффективно использовать грубодисперсный наполнитель в сочетании с крупным кварцевым песком для обеспечения требуемой прочности при экономии портландцемента, что дает существенную экономию энергетических

затрат на помол наполнителя. При этом необходимо осуществлять рациональный выбор кварцевых песков по крупности.

В качестве альтернативного варианта исследовали эффективность применения минеральных добавок путем замещения части вяжущего. Для этого применяли минеральные наполнители на основе отсева дробления кварцитопесчаника

(ОДКВП) Лебединского ГОКа. Минеральную добавку ОДКВП предварительно измельчали до удельной поверхности 400, 500 и 600 м²/кг (таблица 3). Композиционное вяжущее (КВ) получали путем ввода 20 и 50 % минеральной добавки в предварительно размолотый цемент ($S_{уд} = 400$ и 600 м²/кг). Изготавливали образцы 3×3×3 см с различным содержанием МД из теста нормальной густоты, которые твердели 28 сут в нормальных условиях. В качестве контрольных использовали образцы чистого цементного камня (состав № 5). Установлено, что наибольший прирост прочности наблюдался у цементного камня на основе КВ с заменой 20 % цемента на минеральную добавку ОДКВП: $\Delta R_{сж} = 33,9$ и 38,0 % (при $S_{уд}$ ПЦ=400 и 600 м²/кг). Анализ показателей прочности композиционных вяжущих с 20 и 50 % МД показал, что увеличение удельной поверхности МД до 600 м²/кг является нецелесообразным, так как не приводит к существенному повышению прочности, при этом значительно повышаются энергетические затраты на помол. Приоритетную роль играет степень измельчения вяжущего.

Таблица 3

Прочность композиционного вяжущего

№ п/п	Состав	S _{уд} , м ² /кг		R ²⁸ _{сж} , МПа	ΔR _{сж} , %
		ПЦ	ОДКВП		
1	КВ20	400	400	51,8	-5,8
			500	83,0	+33,9
			600	72,4	+24,3
2		600	400	59,8	+8,4
			500	88,4	+38,0
			600	78,2	+29,9
3	КВ50	400	400	46,8	-17,1
			500	71,4	+23,2
			600	66,0	+16,9
4		600	400	53,1	-3,2
			500	78,0	+29,7
			600	69,8	+21,5
5	ПЦ	330	-	54,8	-

Примечание: КВ20 (50) – замена цемента на 20 и 50 % МД.

Полученные результаты исследований подтверждают, что оптимальные дозировки зависят от степени дисперсности: чем выше удельная поверхность МД, тем меньше ее оптимальное содержание. При высокой степени измельчения МД увеличивается содержание пылевидных фракций, повышающих водопотребность бетонной смеси, усиливается агрегирование частиц наполнителя, приводящее к увеличению числа «сухих» контактов между ними и несбалансированному распределению в цементной системе.

Это существенно сказывается на структуре, микрорпористости и физико-механических свойствах композита.

Выводы

1. Подтверждено, что оптимальное количество минеральной добавки определенной дисперсности зависит от расхода вяжущего в бетоне, что согласуется с законом оптимального насыщения системы минеральным дисперсным компонентом. Учет этого фактора дает возможность целенаправленно модифицировать цементные композиты, эффективно снижать водопотребность, обеспечивая тем самым повышение прочности системы или существенную экономию вяжущего.

2. Установлено, что ввод МД (70 %) взамен мелкого заполнителя и цемента в бетонных смесях с низким содержанием вяжущего (190–230 кг/м³) позволил повысить прочность на 12–55 % по сравнению с контрольным составом при удельной экономии $\mathcal{E}_ц$ 33,4–58,8 %, что указывает на наличие резерва экономии цемента. С повышением расхода портландцемента от 290 до 330 кг/м³ наблюдалось повышение $\mathcal{E}_ц$ от 10,2 до 27,8 % (при МД=70 %) и снижение $\mathcal{E}_ц$ от 32,7 до -2,8 % (при МД=40 %). В бетонах с высоким содержанием цемента (430–390 кг/м³) увеличение прочности на 39,3–30,5 % при одновременной экономии цемента $\mathcal{E}_ц=24,3$ –42,8 % наблюдалось при дозировке МД 40 %.

3. Если удельные поверхности МД и ПЦ достаточно схожи и при этом гранулометрия наполнителя почти совпадает с гранулометрией цемента, то ввод наполнителя не повышает прочность и, соответственно, не гарантирует экономию вяжущего. Высокодисперсный наполнитель можно использовать как с мелкими, так и крупными песками. Грубодисперсный наполнитель хорошо совмещается с крупным песком.

4. Результаты исследований могут быть использованы при проектировании составов бетонов различного назначения, что имеет принципиальное значение в условиях ресурсосбережения и снижения экологической нагрузки стройиндустрии.

Источник финансирования. Грант Российского научного фонда (проект № 25-19-00866) с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гузь В.А., Высоцкий Е.В., Черников А.В. Российская цементная промышленность в 2024 году // Цемент и его применение. 2025. №1. С. 18–21.

2. Батраков В.Г. Модификаторы бетона: новые возможности и перспективы // Строительные материалы. 2006. №10. С. 4–8.
3. Калашников В.В., Гуляева Е.В., Володин В.М. Высокоэффективные порошково-активированные бетоны различного функционального назначения с использованием суперпластификаторов // Строительные материалы. 2011. №11. С. 44–47.
4. Айчин П.-К., Уилсон У., Миндесс С. Увеличение прочности бетонов, изготовленных из смешанных цементов // Цемент и его применение. 2018. №9. С. 67–71.
5. Толыпина Н.М., Хахалева Е.Н., Данилов Д.Ю. Влияние микронаполнителей на эффективность суперпластификаторов и прочность бетонов с низким содержанием цемента // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2023. № 6. С. 45–52. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-8-8-15.
6. Хохряков О.В. Композиционные цементы низкой водопотребности. Возможности и перспективы применения в строительных материалах // Строительные материалы. 2022. №1-2. С. 123–133. DOI 10.31659/0585-430X-2022-799-1-2-123-133.
7. Burgos-Montes O., Palacios M., Rivilla P., Puertas F. Compatibility between superplasticizer admixtures and cements with mineral additions // Construction and Building Materials. 2012. Vol. 31. Pp. 300–309. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.12.092.
8. Малинина Л.А. Проблемы производства и применения тонкомолотых многокомпонентных цементов // Бетон и железобетон. 1990. №2. С. 3–6.
9. Бохан Р. Переход к смешанным цементам // Цемент и его применение. 2025. №6. С. 18–21.
10. Зоткин А.Г. Эффекты от минеральных добавок в бетоне // Технологии бетонов. 2007. №4. С. 10–12.
11. Гуляков Е.Г., Хозин В.Г. Роль цементов низкой водопотребности в снижении «углеродного следа» цементной промышленности // Цемент и его применение. 2025. №6. С. 32–38.
12. Явинский А.В., Чулкова И.Л. Кинетика набора прочности смешанного вяжущего // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2023. Т.20. №1 (89). С. 158–166. DOI: 10.26518/2071-7296-2023-20-1-158-166.
13. Yamada K. A summary of important characteristics of cement and superplasticizers // Proc. of Ninth ACI International Conference. Seville, Spain, 2009.
14. Высоцкий С.А., Бруссер М.И., Смирнов В.П., Царик А.М. Оценка эффективности и классификация дисперсных минеральных добавок к цементам и бетонам // Строительные материалы. 1989. №10. С. 7–8.
15. Власов В.К. Закономерности оптимизации состава бетона с дисперсными минеральными добавками // Бетон и железобетон. 1993. №4. С. 10–12.
16. Кривобородов Ю.Р., Тхет Наииг М. Теоретические предпосылки создания композиционных строительных материалов на основе специальных цементов // Техника и технология силикатов. 2022. Т.29. №2. С. 179–188.
17. Высоцкий С.А., Бруссер М.И., Смирнов В.П., Царик А.М. Оптимизация состава бетона с дисперсными минеральными добавками // Бетон и железобетон. 1990. №2. С. 7–9.
18. Гвинн Д., Клайн Д. Условность границы между заполнителем и вяжущим // Цемент и его применение. 2020. №4. С. 54–57.

Информация об авторах

Лесовик Валерий Станиславович, доктор технических наук, профессор кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: naukavs@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Толыпин Даниил Александрович, аспирант кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: tolypin.daniil@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Лесовик Руслан Валерьевич, доктор технических наук, профессор, зав. кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: ruslan_lesovik@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Ряпухин Александр Николаевич, аспирант кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: ryapukhin.an@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 25.05.2026 г.

© Лесовик В.С., Толыпин Д.А., Лесовик Р.В., Ряпухин А.Н., 2026

Lesovik V.S., *Tolypin D.A., Lesovik R.V., Ryapukhin A.N.
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov
*E-mail: tolypin.daniil@yandex.ru

EFFICIENT APPLICATION OF MINERAL ADDITIVES TO REDUCE BINDER CONSUMPTION

Abstract. The paper addresses the issues of Portland cement saving in concretes by replacing part of the binder and fine aggregate with a mineral additive. The studies were carried out on concrete mixtures of various compositions, simulating different binder contents ($\approx 250, 350$ and 450 kg/m^3) and fine aggregate amounts. A regular influence of the mineral additive amount on the compressive strength of concrete was established, depending on the binder content and the resulting saving of the latter. It was found that in concretes with low binder consumption ($190\text{--}230 \text{ kg/m}^3$), the highest strength and specific Portland cement saving ($E_c = 58.8 \%$) are achieved at the maximum dosage of the mineral additive (70 %), whereas in concretes with high cement content ($430\text{--}390 \text{ kg/m}^3$), the maximum strength and specific cement saving ($E_c = 42.8 \%$) were observed at the minimum additive dosage (40 %). The excess compressive strength of the modified concrete specimens compared to the reference mixtures indicates a reserve for cement saving. It is shown that the combination of the fine aggregate particle size and the fine additive has a significant effect on concrete strength. The research results may be useful in designing concrete mixes for different strength classes, which is of fundamental importance under conditions of resource saving and reduction of the environmental load of the construction industry.

Keywords: concrete, cement consumption, mineral additive, superplasticizer, binder saving.

REFERENCES

1. Guz V.A., Vysotskiy E.V., Chernikov A.V. Russian cement industry in 2024 [Rossijskaya cementnaya promyshlennost' v 2024 godu]. Cement and its Application. 2025. No. 1. Pp. 18–21. (rus)
2. Batrakov V.G. Concrete modifiers: new opportunities and prospects [Modifikatory betona: novye vozmozhnosti i perspektivy]. Construction Materials. 2006. No. 10. Pp. 4–8. (rus)
3. Kalashnikov V.V., Gulyaeva E.V., Volodin V.M. High-performance powder-activated concretes for various functional purposes using superplasticizers [Vysokoeffektivnye poroshkovo-aktivirovannye betony razlichnogo funktsional'nogo naznacheniya s ispol'zovaniem superplastifikatorov]. Construction Materials. 2011. No. 11. Pp. 44–47. (rus)
4. Aychin P.-K., Uilson U., Mindess S. Increasing the strength of concrete made from blended cements [Uvelichenie prochnosti betonov, izgotovlennykh iz smeshannykh cementov]. Cement and its Application. 2018. No. 9. Pp. 67–71. (rus)
5. Tolypina N.M., Khakhaleva E.N., Danilov D.Yu. Influence of microfillers on the efficiency of superplasticizers and strength of concretes with low cement content [Vliyanie mikronapolnitelej na effektivnost' superplastifikatorov i prochnost' betonov s nizkim soderzhaniem cementa]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 6. Pp. 45–52. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-8-15. (rus)
6. Khokhryakov O.V. Composite cements of low water demand. Possibilities and prospects of application in construction materials [Kompozitsionnye cementy nizkoj vodopotrebnosti. Vozmozhnosti i perspektivy primeneniya v stroitel'nykh materialakh]. Construction Materials. 2022. No. 1–2. Pp. 123–133. DOI 10.31659/0585-430X-2022-799-1-2-123-133. (rus)
7. Burgos-Montes O., Palacios M., Rivilla P., Puertas F. Compatibility between superplasticizer admixtures and cements with mineral additions. Construction and Building Materials. 2012. Vol. 31. Pp. 300–309. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.12.092.
8. Malinina L.A. Problems of production and application of finely ground multi-component cements [Problemy proizvodstva i primeneniya tonkomolotyykh mnogokomponentnykh cementov]. Concrete and Reinforced Concrete. 1990. No. 2. Pp. 3–6. (rus)
9. Bohan R. Transition to blended cements [Perehod k smeshannym cementam]. Cement and its Application. 2025. No. 6. Pp. 18–21. (rus)
10. Zotkin A.G. Effects of mineral additives in concrete [Effekty ot mineral'nykh dobavok v betone]. Concrete Technologies. 2007. No. 4. Pp. 10–12. (rus)
11. Gulyakov E.G., Khozin V.G. The role of low-water-demand cements in reducing the carbon footprint of the cement industry [Rol' cementov nizkoj vodopotrebnosti v snizhenii «uglerodnogo sleda» cementnoj promyshlennosti]. Cement and its Application. 2025. No. 6. Pp. 32–38. (rus)
12. Yavinskiy A.V., Chulkova I.L. Kinetics of strength gain of blended binder [Kinetika nabora prochnosti smeshannogo vyazhushchego]. Bulletin of Siberian State Automobile and Highway University. 2023. Vol. 20. No. 1 (89). Pp. 158–166. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1->

158-166. (rus)

13. Yamada K. A summary of important characteristics of cement and superplasticizers. Proc. of Ninth ACI International Conference. Seville, Spain, 2009.

14. Vysotskiy S.A., Brusser M.I., Smirnov V.P., Tsarik A.M. Evaluation of efficiency and classification of dispersed mineral additives for cements and concretes [Ocenka effektivnosti i klassifikaciya dispersnyh mineral'nyh dobavok k cementam i betonam]. Construction Materials. 1989. No. 10. Pp. 7–8. (rus)

15. Vlasov V.K. Regularities of optimization of concrete composition with dispersed mineral additives [Zakonomernosti optimizacii sostava betona s dispersnymi mineral'nymi dobavkami]. Concrete and Reinforced Concrete. 1993. No. 4. Pp. 10–12. (rus)

16. Krivoborodov Yu.R., Tkhet Naiig M. Theoretical prerequisites for the creation of composite building materials based on special cements [Teoreticheskie predposylki sozdaniya kompozicionnyh stroitel'nyh materialov na osnove special'nyh cementov]. Technique and Technology of Silicates. 2022. Vol. 29. No. 2. Pp. 179–188. (rus)

17. Vysotskiy S.A., Brusser M.I., Smirnov V.P., Tsarik A.M. Optimization of concrete composition with dispersed mineral additives [Optimizaciya sostava betona s dispersnymi mineral'nymi dobavkami]. Concrete and Reinforced Concrete. 1990. No. 2. Pp. 7–9. (rus)

18. Gvinn D., Klayn D. Conventionality of the interface between aggregate and binder [Uslovnost' granicy mezhdu zapolnitelem i vyazhushchim]. Cement and its Application. 2020. No. 4. Pp. 54–57. (rus)

Information about the author

Lesovik, Valerii S. Doctor of Technical Sciences, Professor. E-mail: naukavs@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Tolypin, Daniil A. Postgraduate Student. E-mail: tolypin.daniil@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Lesovik, Ruslan V. Doctor of Technical Sciences, Professor. E-mail: ruslan_lesovik@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Ryapukhin, Alexander N. Postgraduate Student E-mail: ryapukhin.an@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 25.05.2026

Для цитирования:

Лесовик В.С., Толыпин Д.А., Лесовик Р.В., Ряпухин А.Н. Эффективное применение минеральных добавок для экономии расхода вяжущего // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 8. С. 8–16. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-8-8-16

For citation:

Lesovik V.S., Tolypin D.A., Lesovik R.V., Ryapukhin A.N. Efficient application of mineral additives to reduce binder consumption. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2026. No. 8. Pp. 8–16. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-8-8-16