

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2019, №3, Том 11 / 2019, No 3, Vol 11 <https://esj.today/issue-3-2019.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/10SAVN319.pdf>

Ссылка для цитирования этой статьи:

Халюшев А.К., Джамбеков Н.А., Джамалдинов С.А., Нажуев М.П., Чернильник А.А., Доценко Н.А.
Оптимизация режимов совместного измельчения композиционного цемента в шаровой планетарной мельнице
// Вестник Евразийской науки, 2019 №3, <https://esj.today/PDF/10SAVN319.pdf> (доступ свободный). Загл. с
экрана. Яз. рус., англ.

For citation:

Khalyushev A.K., Dzhambekov N.A., Dzhamal'dinov S.A., Nazhueva M.P., Chernil'nik A.A., Dotsenko N.A. (2019).
Optimization of modes of joint grinding of composite cement in a spherical planetary mill. *The Eurasian Scientific
Journal*, [online] 3(11). Available at: <https://esj.today/PDF/10SAVN319.pdf> (in Russian)

УДК 691

ГРНТИ 67.09.33

Халюшев Александр Каюмович

ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», Ростов-на-Дону, Россия
Доцент кафедры «Технология вяжущих веществ, бетонов и строительной керамики»
Кандидат технических наук
E-mail: khaljushev@mail.ru

Джамбеков Нурлан Альвиевич

ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», Ростов-на-Дону, Россия
Студент
E-mail: rendelman96@mail.ru

Джамалдинов Сайхан Аптиеви

ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», Ростов-на-Дону, Россия
Студент
E-mail: s.djamal'dinov@mail.ru

Нажуев Мухума Пахрудинович

ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», Ростов-на-Дону, Россия
Магистрант
E-mail: nazhueva17@mail.ru

Чернильник Андрей Александрович

ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», Ростов-на-Дону, Россия
Магистрант
E-mail: chernila_a@mail.ru

Доценко Наталья Александровна

ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», Ростов-на-Дону, Россия
Студент
E-mail: natalya_1998_dotsenko@mail.ru

**Оптимизация режимов совместного
измельчения композиционного цемента
в шаровой планетарной мельнице**

Аннотация. В российском ГОСТ 31108-2016 «Цементы общестроительные. Технические условия» и в европейском стандарте EN 197 композиционный цемент выделен как отдельный тип, согласно требованиям, должен содержать не менее двух видов минеральных добавок различной природы активности в количестве 36–80 %. Если заменить минеральными добавками высокоэнергоемкую клинкерную составляющую в количестве, которое необходимо для получения цементов типа ЦЕМ III, ЦЕМ IV и ЦЕМ V, то будет обеспечена экономия энергии на 21–60 %.

Поскольку процесс помола – один из самых энергоемких и дорогих при производстве цемента, то на практике часто возникают ситуации, когда при производстве многокомпонентных композиционных цементов увеличивается время помола из-за низкой удельной поверхности ($S_{y\partial} = 2500 \text{ см}^2/\text{г}$ и ниже).

В качестве помольного агрегата при проведении настоящих исследований авторами принята шаровая планетарная мельница «Активатор-4М». Анализ способов помола цемента показал, что наибольший эффект диспергации получается при мокром помоле, то есть в водной среде. Это связано с расклинивающим эффектом молекул воды, попадающих в поры и трещины твердого вещества. В то же время мокрый помол хорошо применять для инертных материалов, что же касается вяжущих, то лучше осуществлять сухое измельчение.

Авторами в данной статье методом математического планирования эксперимента проведена оптимизация режима измельчения композиционного цемента типа ЦЕМ V/A в шаровой планетарной мельнице. По результатам проведенного эксперимента был получен оптимальный режим, по которому рекомендуется проводить измельчение композиционного цемента типа ЦЕМ V/A при следующих параметрах: время помола в пределах $\tau = 2$ мин при частоте вращения ротора $\nu_r = 35$ Гц. При этом наиболее существенным фактором, влияющим на увеличение удельной поверхности, является частота вращения ротора. В статье отмечается, что активность композиционного цемента типа ЦЕМ V/A, определенная по ускоренной методике с помощью прибора «Цемент Прогноз», составляет 40,4 МПа.

Вклад авторов.

Халюшев Александр Каюмович – собрал, проанализировал и интерпретировал основные тезисы.

Джамбеков Нурлан Альвиевич – автор оказывал участие при оформлении статьи.

Джамалдинов Сайхан Аптиевиич – автор оказывал участие при оформлении статьи.

Нажуев Мухума Пахрудинович – автор осуществил написание статьи.

Чернильник Андрей Александрович – одобрил окончательную версию статьи перед её подачей для публикации.

Доценко Наталья Александровна – автор осуществил написание статьи;

Ключевые слова: композиционный цемент; частота вращения ротора; время помола; удельная поверхность; диспергация; мокрый помол; сухое измельчение

В российском ГОСТ 31108-2016 «Цементы общестроительные. Технические условия» и в европейском стандарте EN 197 композиционный цемент выделен как отдельный тип, согласно требованиям, должен содержать не менее двух видов минеральных добавок различной природы активности в количестве 36–80 %.

Если заменить минеральными добавками высокоэнергоёмкую клинкерную составляющую в количестве, которое необходимо для получения цементов типа ЦЕМ III, ЦЕМ IV и ЦЕМ V, то будет обеспечена экономия энергии на 21–60 % [1].

Известно, что активность цементов зависит от степени их дисперсности. С увеличением удельной поверхности цемента прочностные характеристики его повышаются. Однако при этом растёт и водопотребность, что отрицательно сказывается на прочностных характеристиках вяжущего. При повышении удельной поверхности свыше $S_{y\partial} = 5000 \text{ см}^2/\text{г}$ отрицательное влияние увеличения водопотребности сказывается значительно, что делает нецелесообразным дальнейший помол цемента. При промышленном производстве цемента величину удельной поверхности вяжущего обеспечивают в пределах $S_{y\partial} = 3000 \dots 3500 \text{ см}^2/\text{г}$. Дальнейшее увеличение степени помола считается нецелесообразным, так как приводит к значительному росту энергозатрат (энергозатраты при увеличении $S_{y\partial}$ с 3000 до 4000 $\text{см}^2/\text{г}$ в три раза выше чем при увеличении $S_{y\partial}$ с 2000 до 3000 $\text{см}^2/\text{г}$) [2].

Поскольку процесс помола – один из самых энергоёмких и дорогих при производстве цемента, то на практике часто возникают ситуации, когда при производстве многокомпонентных композиционных цементов увеличивается время помола из-за низкой удельной поверхности ($S_{y\partial} = 2500 \text{ см}^2/\text{г}$ и ниже) [3].

Этот факт является причиной того, что многие предприятия стройиндустрии ставят вопрос о необходимости снижения времени помола многокомпонентных композиционных цементов путем введения в состав добавок-интенсификаторов помола и повышения за счет этого физико-механических свойств цементов, растворов и бетонов на их основе. Однако решение этого вопроса сдерживается отсутствием в промышленном производстве доступных, высокоэффективных помольных агрегатов с низкой энергоёмкостью [4; 5].

Из известных помольных агрегатов чаще всего используются дезинтеграторы (конструкции Хинта), которые отличаются высокой производительностью, непрерывностью процесса помола и малыми габаритами. При этом энергопотребление дезинтеграторов на порядок ниже, чем шаровых мельниц. Однако даже такое низкое энергопотребление приводит к значительным энергозатратам при помолу цемента, что сводит к нулю эффективность самой операции помола [6].

В качестве помольного агрегата при проведении настоящих исследований принята шаровая планетарная мельница «Активатор-4М». Общий вид шаровой планетарной мельницы «Активатор-4М» показан на рисунке 1, а его технические характеристики – в таблице 1.

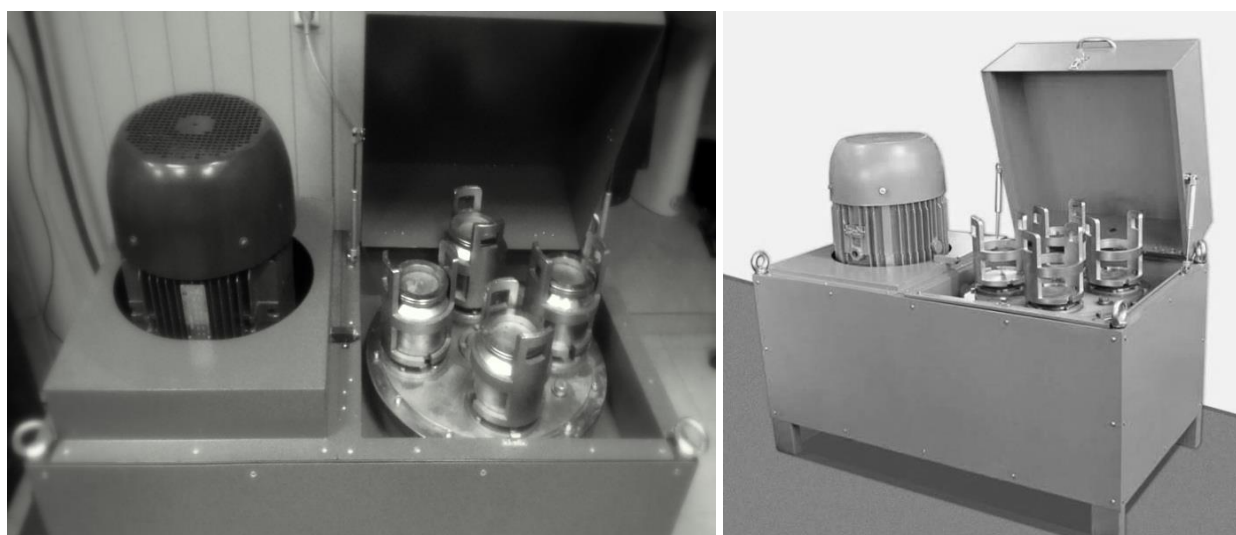


Рисунок 1. Шаровая планетарная мельница «Активатор – 4М» (составлено авторами)

Таблица 1

Технические характеристики

Наименование показателя	Единицы измерения	Показатель
Планетарный диск:	Вт/м·К	0,03–2,0
скорость вращения	об/мин	100–800
эффективный диаметр	мм	400
Скорость вращения барабанов	об/мин	150–1650
Центробежное ускорение	м/с ²	1500
Барабаны	шт	4
Объем барабана	мл	1000
Загрузка шаров	г	600–1400
Загрузка порошка	г	50–400
Материал: шары		ШХ15СГ
барабаны	мм	Ø95×180

Составлено авторами

Анализ способов помола цемента показал, что наибольший эффект диспергации получается при мокром помоле, то есть в водной среде. Это связано с расклинивающим эффектом молекул воды, попадающих в поры и трещины твердого вещества. В то же время мокрый помол хорошо применять для инертных материалов, что же касается вяжущих, то лучше осуществлять сухое измельчение.

При совместном измельчении, по причине различности размалываемости материалов, гранулометрия цемента получается неоптимальной [1].

Целью исследования ставилось оптимизировать режим измельчения композиционного цемента типа ЦЕМ V/A, полученного на основе отходов промышленности.

Был применен метод математического планирования эксперимента (ПФЭ 2^к) [7–9]. Количество и вид минеральных добавок во всех составах композиционного цемента приняты постоянными. В композиционный цемент входили следующие компоненты: клинкер, двуводный гипсовый камень (3,5 % в пересчете на SO₃), доменный гранулированный шлак, зола-унос и пуццолановая добавка в виде вулканического туфа. Содержания компонентов композиционного цемента представлены в таблице 2.

Таблица 2

Содержание композиционного цемента типа ЦЕМ V/A
по ГОСТ 31108-2016 Цементы общестроительные. Технические условия

№	Тип цемента	Содержание композиционного цемента, %				
		Клинкер	Зола-унос	Пуццолана	Шлак доменный гранулированный	Гипсовый камень
1	ЦЕМ V/A	40,0	19,0	11	30,0	3,5

Составлено авторами

Значения и физический смысл факторов варьирования представлены в таблице 3. За функцию отклика были приняты следующие параметры:

- $Y_1 (X_1, X_2)$ – удельная поверхность портландцемента – не менее 3000 см²/г.
- $Y_2 (X_1, X_2)$ – предел прочности при сжатии образцов-кубов – не менее 50 МПа.

В процессе помола композиционного цемента при помощи прибора ПСХ-10М контролировалась величина удельной поверхности. Принцип определения $S_{уд}$ основан на измерении скорости прохождения воздуха через слой материала стандартного объема.

Таблица 3

Значение факторов варьирования ПФЭ 2^к

№ п/п	Код фактора	Физический смысл фактора	Ед. измерения	Интервал варьирования	Уровни фактора		
					-1	0	+1
1	X ₁	время измельчения	мин	±1	1	2	3
2	X ₂	частота вращения ротора	Гц	±10	25	35	45

Составлено авторами

Из цементной пасты заформованы образцы кубической формы с размером ребра 5x5 см с В/Ц = 0,25. Предел их прочности при сжатии определялся после пропаривания при температуре изотермического прогрева 80±5 °С в режиме τ = 12 (3 + 6 + 3). Математическая обработка результатов оптимизации выполнена в программе «MATHcad» [8–11].

План эксперимента и результаты параметров оптимизации приведены в таблице 4.

Таблица 4

План эксперимента и результаты параметров оптимизации

№	Кодирование переменных		Натуральные значения		Значения параметров оптимизации	
	X ₁	X ₂	X ₁	X ₂	S _{уд} , см ² /г	R _{сж} , МПа
1	-1	-1	1	25	3086	38,4
2	-1	0	1	35	4015	45,3
3	-1	+1	1	45	4344	42,9
4	0	-1	2	25	3644	46,0
5	0	0	2	35	4579	52,4
6	0	+1	2	45	4752	47,7
7	+1	-1	3	25	4230	49,0
8	+1	0	3	35	4886	55,6
9	+1	+1	3	45	5123	47,3

Составлено авторами

По результатам исследования методом наименьших квадратов получены базовые уравнения регрессии – полиномы 2-й степени:

$$Y(X_1, X_2) = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + B_3X_1 \cdot X_2 + B_4X_1^2 + B_5X_2^2 \quad (1)$$

Уравнения регрессии оценены по трем критериям:

- однородность дисперсий;
- значимость коэффициентов;
- адекватность, оцениваемая по критерию Фишера.

В нулевой точке определены по экспериментальным данным:

- среднеарифметическое значение параметра (\bar{Y}_0);
- дисперсия (S_0^2);
- среднеквадратическое отклонение (S_0);
- среднеквадратическая ошибка в определении коэффициентов (S_{bi}) (таблица 5).

Таблица 5

Статистические критерии оптимизации

Композиционный цемент типа ЦЕМ V/A	Параметр			
	F	D_0^2	S_0	ξ
предел прочности при сжатии, МПа	24,991	3,043	1,744	3,025
удельная поверхность, см ² /г	7,842	4,617·10 ³	67,95	117,83

Составлено авторами

По критерию Стьюдента установлена значимость коэффициентов уравнений:

$$t_p = \frac{|b_i|}{S_{(bi)}} > t_T (f = n_0 - 1; q = 5\%; t_T = 4,3) \quad (2)$$

Значения полученных коэффициентов сведены в таблицу 6.

Таблица 6

Расчетные коэффициенты уравнений регрессии

Композиционный цемент ЦЕМ V/A	Коэффициенты уравнений					
	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5
предел прочности при сжатии, МПа	43,91	-0,53	-1,351	2,606	2,274	1,129
удельная поверхность, см ² /г	4520	482,1	535,0	-42,2	-270,3	-49,2

Составлено авторами

Получены следующие уравнения регрессии для составов, в которых в качестве дополнительной минеральной добавки были приняты молотый известняк и зола-унос:

$$Y(X_1, X_2) = 43,91 - 0,53X_1 - 1,351X_2 + 2,606X_1X_2 + 2,274X_1^2 + 1,129X_2^2 \quad (3)$$

$$Y(X_1, X_2) = 4520 + 482,1X_1 + 535,0X_2 - 42,2X_1X_2 - 270,3X_1^2 - 49,2X_2^2 \quad (4)$$

Графическая интерпретация математических зависимостей представлена на рисунках 2 и 3.

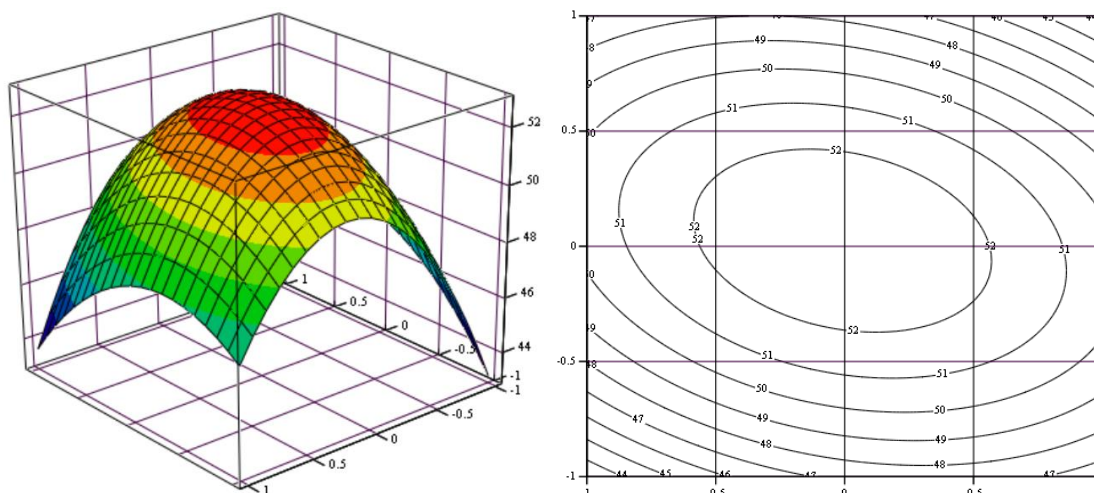


Рисунок 2. Зависимость предела прочности при сжатии композиционного цемента от времени измельчения (x_1) и частоты вращения ротора (x_2) (составлено авторами)

По полученным уравнениям регрессии установлено: на показатель прочности в наибольшей степени влияет удельная поверхность (B_0), возрастающая при сочетании следующих параметров: время помола и частота вращения.

Вместе с тем незначительное влияние на предел прочности при сжатии оказывает изменение скорости вращения ($V_2 \cdot X_2$). Оптимальный режим помола композиционного цемента рекомендуется проводить при следующих параметрах (время помола в пределах $\tau = 2$ мин при частоте вращения ротора $v_p = 35$ Гц [2]).

По результатам проведенного эксперимента получен оптимальный режим помола композиционного цемента типа ЦЕМ V/A с общим содержанием минеральных добавок более 60 %. При этом наиболее существенным фактором, влияющим на увеличение удельной поверхности, является частота вращения ротора.

Следует также отметить, что увеличение удельной поверхности повышает водопотребность композиционного цемента и снижает предел прочности при сжатии. Вместе с тем при доведении композиционного цемента до предельного измельчения гранулометрический состав выравнивается и предел прочности при сжатии снова возрастает [12–15].

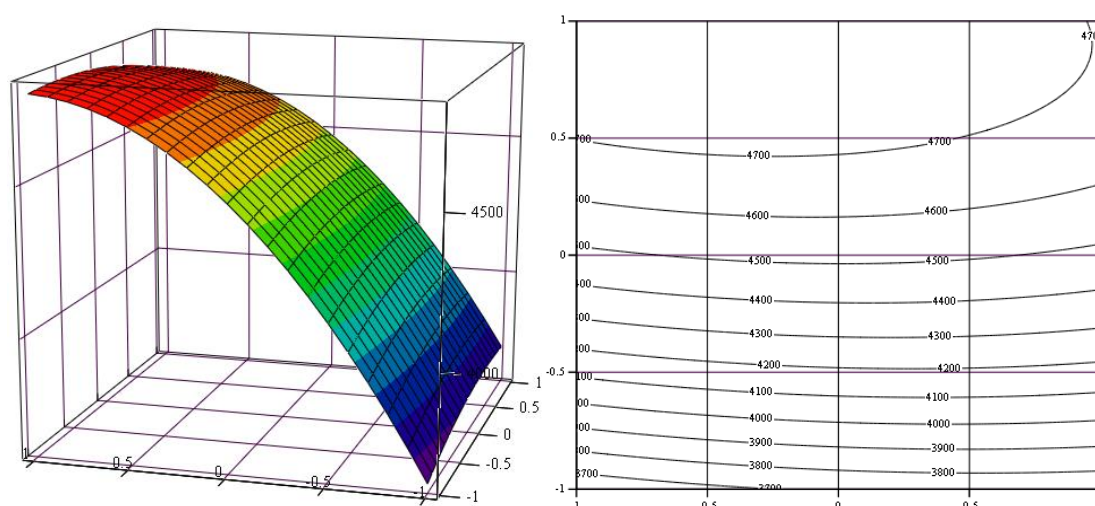


Рисунок 3. Зависимость удельной поверхности композиционного цемента от времени измельчения (x_1) и частоты вращения ротора (x_2) (составлено авторами)

Для полученного при оптимальном режиме помола композиционного цемента типа ЦЕМ V/A определяли его активность по ускоренной методике с помощью прибора «Цемент Прогноз». Результаты измерений показаны на рисунке 4.

Параметры испытания	
Масса цемента в стакане S_0 , г	672
Длительность, ч:м	3:0
Период, с	5
Ожидаемая марка	M-400
$\Delta\Delta V$, мл (поставщик)	1,30
Длительность твердения, сут	28
Результаты испытания	
Контракция ΔV_{C03} , мл	1,10
Контракция ΔV_{IK3} , мл	1,64
Торможение	есть
Поправка на торможение $\Delta\Delta V$, мл	1,30
Средняя температура $T_{ср}$, °C	20,5
Поправка на температуру ΔV_T , мл	0,00
Итоговая контракция ΔV_0 , мл	2,94
Активность R, МПа	40,4
Удельная контракция ΔV , мл	0,034

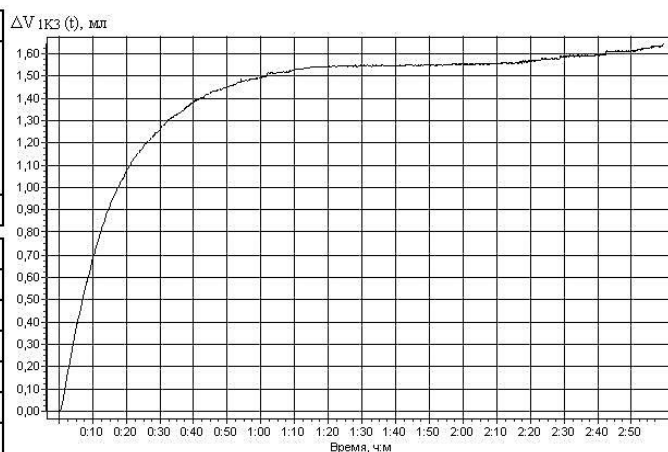


Рисунок 4. Изменение контракции портландцемента типа ЦЕМ V/A (составлено авторами)

Установлено, что активность композиционного цемента типа ЦЕМ V/A, определенная по ускоренной методике с помощью прибора «Цемент Прогноз», составляет 40,4 МПа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Shah S.P. Development of «Green» cement for sustainable concrete using cement kiln dust and fly ash // Intern. Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology, 20-21 May 2004: Proc. Beijing (Chine), 2004. P. 15–24.
2. Кунцевич О.В., Махинин Б.В., Шангина Н.Н. Структура цементного камня с добавками суеперпластификатора и микрокремнезема // Цемент. 1992. №6. С. 30–36.
3. Высоцкий С.А., Бруссер М.И., Смиронов В.П., Царик А.М. Оптимизация состава бетона с дисперсными минеральными добавками // Бетон и железобетон. 1990. №2. С. 7–9.
4. Зоткин А. Г. Микронаполняющий эффект минеральных добавок в бетоне // Бетон и железобетон. 1994. №3. С. 7–9.
5. Соломатов В. И., Кононова О. В. Особенности формирования свойств цементных композиций при различной дисперсности цементов и наполнителей // Строительство и архитектура. Сер. Изв. вузов. 1991. №8. С. 50–53.
6. Баженов Ю.М. Современная технология бетона // Технологии бетонов. 2005. №1. С. 6.
7. Халюшев А.К., Прудников В.В., Стельмах С.А., Щербань Е.М., Нажуев М.П. Оценка эффективности комбинирования минеральных добавок в мелкозернистом бетоне // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 9, №5 (2017) <https://naukovedenie.ru/PDF/25TVN517.pdf>.
8. Маилян Л.Р., Стельмах С.А., Халюшев А.К., Холодняк М.Г., Щербань Е.М., Нажуев М.П. Совершенствование режимов формования центрифугированных бетонных изделий кольцеобразного сечения // Инженерный вестник Дона, 2018, № 2 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/4832.
9. Маилян Л.Р., Стельмах С.А., Халюшев А.К., Щербань Е.М., Холодняк М.Г., Нажуев М.П. Оптимизация параметров центрифугированных изделий кольцевого сечения на стадии уплотнения // Инженерный вестник Дона, 2018, № 3 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5123.
10. Маилян Л.Р., Стельмах С.А., Халюшев А.К., Щербань Е.М., Холодняк М.Г., Нажуев М.П. Совершенствование расчетных рекомендаций по подбору состава бетона центрифугированных конструкций // Вестник Евразийской науки, 2018, №3 URL: esj.today/PDF/63SAVN318.pdf.
11. Маилян Л.Р., Стельмах С.А., Холодняк М.Г., Халюшев А.К., Щербань Е.М., Нажуев М.П. Рекомендации по учету вариативности при расчете, проектировании и изготовлении центрифугированных конструкций из тяжелого бетона // Вестник Евразийской науки, 2018, №4 URL: esj.today/PDF/07SAVN418.pdf.
12. Кривицкий М.Я., Левин Н.И., Макаричев В.В. Ячеистые бетоны (технология, свойства и конструкции). М.: Стройиздат, 1972. 137 с.
13. Трескина Г.Е., Чистов Ю.Д. Пылевидные отходы – эффективные наполнители для неавтоклавного газобетона // Строительные материалы. 2002. № 5. С. 10–11.
14. Баринов А.А., Боролицкая Р.М., Данилов П.П., Попов В.В. Ячеистые и легкие бетоны из отходов промышленности и изделий на их основе. Киев: Будівельник, 1968. С. 23–65.
15. Мурог В.Ю. Вайтехович П.Е. Влияние домола цемента на прочность бетонных изделий // Строительные материалы. 2004. № 6. С. 36–37.

Khalyushev Aleksandr Kayumovich

Don state technical university, Rostov-on-Don, Russia
E-mail: khaljushev@mail.ru

Dzhambekov Nurlan Al'vievich

Don state technical university, Rostov-on-Don, Russia
E-mail: rendelman96@mail.ru

Dzhamaldinov Saykhan Aptievich

Don state technical university, Rostov-on-Don, Russia
E-mail: s.djamaldinov@mail.ru

Nazhiev Mukhuma Pakhrudinovich

Don state technical university, Rostov-on-Don, Russia
E-mail: nazhiev17@mail.ru

Chernil'nik Andrey Aleksandrovich

Don state technical university, Rostov-on-Don, Russia
E-mail: chernila_a@mail.ru

Dotsenko Natal'ya Aleksandrovna

Don state technical university, Rostov-on-Don, Russia
E-mail: natalya_1998_dotsenko@mail.ru

Optimization of modes of joint grinding of composite cement in a spherical planetary mill

Abstract. In the Russian GOST 31108-2016 "Cements general construction. Technical conditions" and in the European standard EN 197 composite cement is isolated as a separate type, according to the requirements, must contain at least two types of mineral additives of different nature of activity in the amount of 36–80 %. If we replace the mineral additives with a high-energy clinker component in an amount that is necessary to obtain cements of the type CEM III, CEM IV and CEM V, then energy savings of 21–60 % will be achieved.

Since the grinding process is one of the most energy-intensive and expensive in cement production, in practice there are often situations when the production of multicomponent composite cements increases the grinding time due to low specific surface ($Sud = 2500 \text{ cm}^2/\text{g}$ and below).

As a grinding unit when conducting these studies, the authors adopted the ball-bearing planetary mill "Activator-4M". Analysis of cement grinding methods showed that the greatest dispersion effect is obtained with wet grinding, that is, in an aqueous medium. This is due to the wedging effect of water molecules that fall into the pores and cracks of solids. At the same time, wet grinding is good to use for inert materials, as for the binders, it is better to carry out dry grinding.

The authors in this article using the mathematical planning of the experiment have optimized the grinding mode for composite cement of the type CEM V/A in a spherical planetary mill. According to the results of the experiment, an optimal mode was obtained, according to which it is recommended to grind composite cement of the type CEM V/A with the following parameters: grinding time within $\tau = 2 \text{ min}$ with a rotor rotation frequency $\nu_p = 35 \text{ Hz}$. The most significant factor affecting the increase in the specific surface is the rotor speed. The article notes that the activity of composite cement of the type CEM V/A, determined according to an accelerated method using the Cement Prediction instrument, is 40.4 MPa.

Keywords: composite cement; rotor speed; grinding time; specific surface; dispersion; wet grinding; dry grinding