

- макроекономічна ситуація;
- природно-ресурсна ситуація.

Чинники визначені з наступної передумови: знаходиться найменший коефіцієнт вагомості, величина якого дорівнює сумі коефіцієнтів вагомості решти чинників менших по величині, ніж даний коефіцієнт вагомості. Тобто, решта чинників відкидається, якщо неістотно впливають на розвиток і надалі, при розрахунку чинники впливу не враховуються:  $(0,036 + 0,015 + 0,072) = 0,123$ .

Дослідження проблематики розвитку підприємств промисловості будівельних матеріалів дає можливість

зрозуміти процеси, що відбуваються на ринку будівельних матеріалів та розробити організаційно-економічні механізми їх розвитку.

#### **ЛІТЕРАТУРА:**

1. Кейнс Дж. Общая теория занятости, процента и денег / Кейнс Дж. – М.: Эксмопресс, 1978. – 306 с.
2. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Саати Т. – М.: Радио и связь, 1993. – 316 с.

УДК 666.97

*Дворкин Л.И., доктор техн. наук, профессор;*

*Дворкин О.Л., доктор техн. наук, профессор;*

*Черная И.В., аспирант, Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ровно*

## **КОМПОЗИЦИОННОЕ ВЯЖУЩЕЕ НИЗКОЙ ВОДОПОТРЕБНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЫЛИ-УНОСА КЛИНКЕРООБЖИГАТЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ**

Общее количество улавливаемой пыли на цементных заводах достигает до 30 % всего объема выпускаемой продукции. До 80 % всего количества пыли выбрасывается с газами из вращающихся клинкерообжигательных печей. Пыль, выносимая из печей, является полидисперсным порошком, содержащим при мокром способе производства 40...70, а при сухом – до 80 % фракций размером менее 20 мкм. Минералогическими исследованиями определено, что в составе пыли содержится до 20 % клинкерных минералов; из них двухкальциевого силиката  $\beta$ - и  $\gamma$ -модификаций – 8...10, двухкальциевого феррита и четырехкальциевого алюмоферрита – 10...12, свободного оксида кальция – 2...14, щелочей – 1...8 %. Основная масса пыли состоит из смеси обожженной глины и неразложившегося известняка. Состав пыли существенно зависит от типа печей, вида и свойств применяемого сырья, а также способа улавливания [1, 2].

Повышенное содержание щелочных соединений в пыли объясняется их накоплением в газовой среде вращающихся печей при обжиге сырьевых смесей в результате улетаживания из полевошпатовых и других минералов, входящих в глинистый компонент сырьевой смеси, а при применении каменноугольного топлива, и в золу, остающуюся при его сжигании [3]. При этом, обладая ионным радиусом, близким по величине к ионному радиусу кальция, натрий связан в содержащих его силикатах прочнее и поэтому улетаживается в меньшей мере, чем калий, имеющий больший ионный радиус. Под действием водяного пара в печных газах в клинкере образуются легко улетаживающиеся гидроксиды щелочных металлов. Повышенное содержание в пыли  $SO_3$  обусловлено, в основном, связыванием диоксида серы, образующегося при сжигании топлива.

Наиболее дисперсная и высокощелочная пыль осаждается в электрофильтрах. Удельная поверхность пыли в электрофильтрах достигает 5000...8000  $cm^2/g$ , а пыли в осадительных камерах – 1000...4000  $cm^2/g$  и зависит от природы обжигаемого сырья и режима обжига, в частности температуры и скорости газового потока. Повышенной дисперсности пыли способствует преобладание в сырьевой смеси тонкодисперсного карбонатного компонента – мела и пластичной глины [1].

Основным направлением утилизации пыли, образующейся при обжиге цементного клинкера во вращающихся печах, является использование ее в самом процессе производства цемента. Добавка 5...15 % пыли к сырьевому шламу вызывает его коагуляцию и уменьшение текучести. При повышенном содержании в ней щелочных оксидов снижается качество клинкера. Исследования показали, что лишь при содержании в шламе до 0,7...0,8% щелочных оксидов все количество пыли может подаваться в печь, не влияя существенно на качество клинкера [2].

Известны различные способы использования цементной пыли [1]. Высокая дисперсность пыли позволяет использовать ее в качестве порошкообразного наполнителя асфальтовых бетонов. Минеральный порошок совместно с битумом образует асфальтовое вяжущее вещество, в значительной мере обуславливающее прочность асфальтовых бетонов, их плотность и теплоустойчивость. Качество пыли как минерального порошка снижается с увеличением содержания в ней водорастворимых соединений. Следует учитывать также высокую внутреннюю пористость цементной пыли, вызывающую ускоренное старение асфальтовых смесей и ухудшение их деформативной способности вследствие избирательной адсорбции масел и смол на внутренней поверхности пор. Практически не

Химический состав пыли, сырьевого шлама и клинкера

Наименование материала	Содержание оксидов, %									
	п.п.п.	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	CaO <sub>св</sub>
Пыль электро-фильтров	24,07	12,22	3,41	2,05	49,01	0,84	5,29	2,78	0,55	3,10
Сырьевой шлам		20,80	5,25	4,113	67,95	0,54	0,59			
Клинкер		21,80	5,32	4,11	66,80	0,95	0,63	0,54	0,42	

реализуется и предложение использовать цементную пыль в производстве автоклавных материалов, учитывая ее невысокую активность и, в то же время, необходимость гашения и длительного выдерживания пыли до полной гидратации оксида кальция. Использование пыли в качестве удобрения в сельском хозяйстве также малоэффективно из-за относительно низкого содержания в ней калийных соединений.

К настоящему времени исследован ряд смешанных вяжущих с использованием цементной пыли [2], не нашедших также значительного применения. Использование пыли в составе вяжущих известково-пуццоланового типа предполагает автоклавную обработку изделий и эффективно при содержании щелочных оксидов не более 2...4%. Получение вяжущих шлакощелочного типа, наоборот, реально при высоком содержании щелочей.

В данной статье анализируются результаты исследований по получению композиционных вяжущих низкой водопотребности с использованием пыли вращающихся клинкерообжигательных печей предприятия «Волынь – цемент» (Здолбунровский цементный завод). Предприятие изготавливает цементный клинкер мокрым способом из шлама на основе карбонатного (мелового), глинистого и железистого компонентов в печах 4,5x170 м.

Усредненный химический состав сырьевого шлама, клинкера и пыли печей приведен в табл. 1.

Как следует из данных табл. 1, основное различие между составом шлама, клинкера и пыли состоит в повышенном содержании в последней щелочей, оксида серы и свободного оксида кальция.

Химико-минералогический состав пыли вращающихся клинкерообжигательных печей обусловлен тем, что наибольшее ее количество дымовые газы выносят

из материала в зонах сушки, подогрева и кальцинирования. В большем количестве уносится карбонатный компонент, в меньшем – глинистый и железосодержащий. Общее содержание клинкерных минералов в исследованной пыли составило около 12%.

Щелочные соединения представлены в пыли сульфатами, карбонатами и бикарбонатами, а также силикатами переменного состава. Наряду с сульфатами калия и натрия в пыли имеется и сульфат кальция.

Присутствие в пыли небольшого количества клинкерных минералов придает ей сравнительно невысокую гидравлическую активность (табл. 2). Повышение гидравлической активности пыли наблюдается при добавках гипса и в композиции с доменным гранулированным шлаком. Наилучшее соотношение пыли и шлама составляет примерно 1:1 по массе. Вяжущие свойства системы гипс-пыль-шлак можно объяснить сульфатно-щелочной активизацией доменного гранулированного шлама под действием сульфата кальция, входящего в гипс, а также сульфатов и щелочных соединений, содержащихся в пыли. По нашим данным при применении низкоглиноземистых (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 6...8%) шлаков Криворожского металлургического завода и пыли, образуемой при обжиге сырьевой смеси во вращающихся печах предприятия «Волынь-цемент», с использованием добавки фосфогипса можно получить бесклинкерное вяжущее марок 100...150. Повышение прочности бесклинкерного сульфатного пылешлакового вяжущего до 15...20 МПа возможно при его домоле до S<sub>уд</sub> = 450...500 м<sup>2</sup>/кг и введении суперпластификатора. Б.С. Баталиным [4] получено при использовании высокоглиноземистых шлаков Урала, пыли Ново-Пашийского цементного завода бесклинкерное вяжущее прочность которого в 28 сут. возрасте на образцах жесткой консистенции превысила 40 МПа.

Основные исследования были выполнены применительно к вяжущим в системе портландцемент-пыль клинкерообжигательных печей – доменный гранулированный шлак. Доменный шлак в составе этих вяжущих выполняет роль не только активной минеральной добавки, но также и компенсатора негативного влияния щелочей, серного ангидрида и свободного оксида кальция. Указанные компоненты пыли не только поглощаются шлаком, но и способствуют повышению активности последнего [2].

Таблица 2

Прочность бесклинкерных вяжущих с использованием пыли вращающихся печей

Состав вяжущего, %			Прочность при сжатии, МПа			Прочность при изгибе, МПа		
фосфо-гипс	пыль	шлак	7 сут.	28 сут.	3 мес.	7 сут.	28 сут.	3 мес.
-	100	-	2,1	3,5	4,3	0,9	1,4	1,8
5	95	-	2,9	4,1	5,5	1,2	1,8	1,8
5	70	25	3,7	10,5	12,3	1,6	2,5	2,9
5	50	45*	6,8	18,4	21,5	2,1	2,9	3,4

\* при затворении вяжущего использовали добавку – суперпластификатор С-3 в количестве 1% от массы.

Таблица 3

Условия планирования экспериментов

Факторы	Значение факторов *	Уровни варьирования			Интервал варьирования
		-1	0	+1	
$X_1$	(П+Ш), %	10	35	60	25
$X_2$	$\frac{\text{П}}{\text{П+Ш}}$				
0	0,5	1	0,5		
$X_3$	$S_{\text{уд}}$ , м <sup>2</sup> /кг	300	450	600	150
$X_4$	СП, %	0	1,3	3	1,5

\*П – пыль вращающихся печей,  
Ш – доменный гранулированный шлак,  
 $S_{\text{уд}}$  – удельная поверхность,  
СП – суперпластификатор С-3.

Исследовали влияние соотношения портландцемент-пыль вращающихся печей – доменный гранулированный шлак, а также величины удельной поверхности вяжущего, полученного совместным измельчением указанных компонентов в присутствии суперпластификатора С-3. Были использованы портландцемент I типа с прочностью при сжатии через 2 сут. ( $R_2$ ) – 22 МПа и 28 сут. ( $R_{28}$ ) – 51 МПа, а также Криворожский гранулированный шлак. Опыты выполняли с применением математического планирования эксперимента [5]. Был реализован трехуровневый план  $B_4$  и после статистической обработки экспериментальных результатов получены математические модели (1, 2) прочности на сжатие композиционных вяжущих в возрасте 2 ( $y_1$ ) и 28 ( $y_2$ ) сут. в виде полиномиальных уравнений регрессии второго порядка. Условия планирования экспериментов приведены в табл. 3.

$$y_1 = 53,60 - 11,65X_1 - 6,78X_2 + 1,85X_3 + 1,96X_4 + 0,88X_1^2 - 3,12X_2^2 - 3,62X_3^2 - 1,38X_4^2 - 0,88X_1X_2 - 0,75X_1X_3 + 0,13X_1X_4 - 0,13X_2X_3 + 0,25X_2X_4 + 0,38X_3X_4 \quad (1)$$

$$y_2 = 53,60 - 11,65X_1 - 6,78X_2 + 6,22X_3 + 4,03X_4 + 8,82X_1^2 - 9,68X_2^2 - 3,68X_3^2 - 2,18X_4^2 - 5,81X_1X_2 - 0,94X_1X_3 - 1,06X_2X_3 - 0,56X_2X_4 + 0,81X_3X_4 \quad (2)$$

Графики зависимости прочности на сжатие композиционных вяжущих в возрасте 2 и 28 сут. от варьируемых факторов приведены на рис. 1 и 2.

Анализ полиномиальных моделей (рис. 1, 2) позволяет проследить четко выраженный нелинейный характер влияния исследуемых факторов на прочность композиционных вяжущих и найти их оптимальные значения.

Из графиков, приведенных на рис. 2 д, видно, что при содержании доменного шлака в цементе 10%, домолце цемента до удельной поверхности 450 м<sup>2</sup>/кг и введении 1,5% суперпластификатора активность вяжущего превышает 70 МПа, т.е. почти в 1,5 раза активность исходного цемента.

Повышение содержания суперпластификатора до 3% и удельной поверхности вяжущего до 600 м<sup>2</sup>/кг приводит к сравнительно невысокому дополнительному приросту активности.

Наполнение вяжущего минеральной добавкой закономерно приводит к падению прочности цемента (рис. 1 а, в, рис. 2 а, д). Наиболее интенсивное падение прочности цемента имеет место в том случае, когда минеральная добавка включает лишь пыль вращающихся клинкерообжигательных печей. При введении 60% пыли вращающихся печей активность цемента снижается почти в 3,5 раза – от 51 до 15 МПа. Домол наполненного пылью цемента и введение добавки суперпластификатора позволяет повысить прочность вяжущего до 30 МПа.

Резкое падение прочности цемента, наполненного пылью, в значительной мере объясняется увеличением водопотребности цемента по мере повышения содержания пыли. Если нормальная плотность исходного цемента составляла 25,5%, то наполнение цемента 35% пыли увеличила ее до 32%, а 60% до 38%. Наличие в пыли значительного количества свободной извести и  $SO_3$  может вызвать также неравномерность изменения объема цемента, а щелочей – появление высолов.

Эффект снижения прочности при наполнении цемента доменным шлаком и композицией шлака и пыли является существенно меньшим чем только

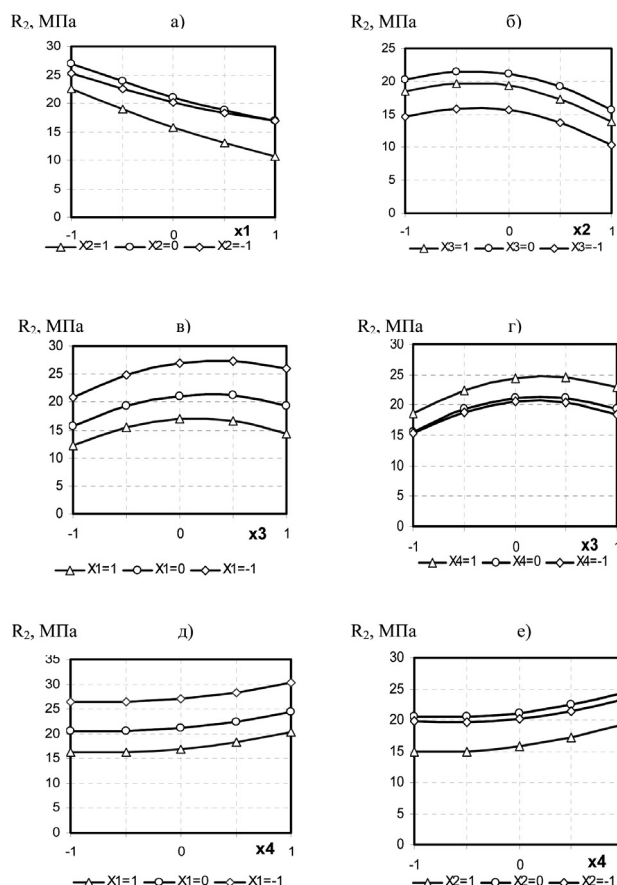


Рис. 1. Зависимость прочности на сжатие композиционного вяжущего в возрасте 2 сут. ( $R_2$ ) в зависимости от варьируемых факторов (табл. 3): а –  $X_1$  и  $X_2$ ; б –  $X_2$  и  $X_3$ ; в –  $X_1$  и  $X_3$ ; г –  $X_3$  и  $X_4$ ; д –  $X_1$  и  $X_4$ ; е –  $X_2$  и  $X_4$ .

Примечание: факторы, учитываемые в табл. 3, влияние которых не рассматривается на рис. 1 находятся на основном (нулевом) уровне

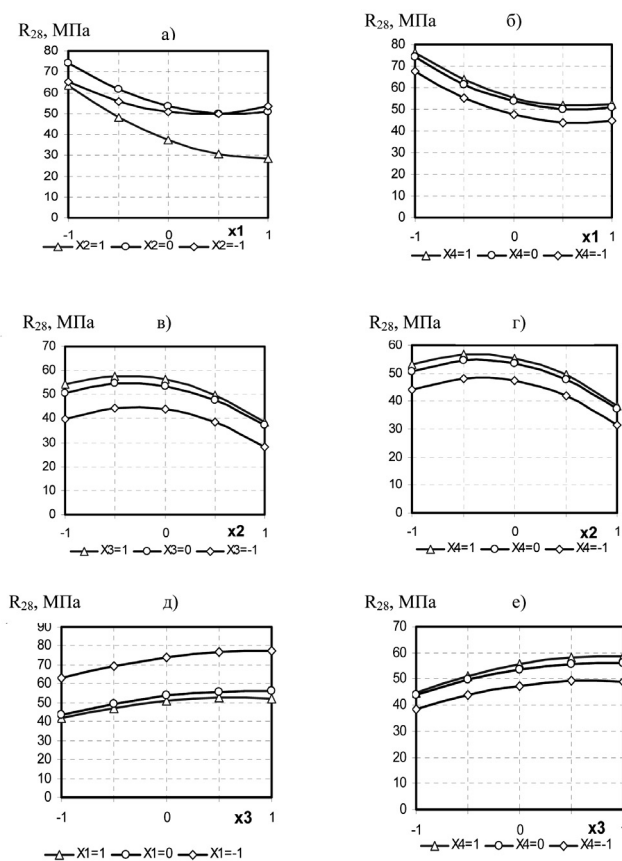


Рис. 2 Зависимость прочности на сжатие композиционного вяжущего в возрасте 28 сут. ( $R_{28}$ ) в зависимости от варьируемых факторов (табл.3): а -  $X_1$  и  $X_2$ ; б -  $X_1$  и  $X_4$ ; в -  $X_2$  и  $X_3$ ; г -  $X_2$  и  $X_4$ ; д -  $X_3$  и  $X_1$ ; е -  $X_3$  и  $X_4$   
Примечание: факторы, учитываемые в табл.3, влияние которых не рассматривается на рис. 2 находятся на основном (нулевом) уровне

пылью особенно при повышении тонкости помола вяжущего и введении добавки суперпластификатора (рис. 2 а, г).

Оптимальное соотношение пыли и шлака в пылешлаковом компоненте вяжущего изменяется в зависимости от его общего содержания в вяжущем. При максимальном содержании композиционной минеральной добавки это соотношение сдвигается в меньшую сторону. При общем содержании композиционной минеральной до-

бавки 50...60% оптимальное соотношение в ней пыли и шлака приближается к единице.

Анализ экспериментальных результатов позволяет утверждать возможность замены до 50% клинкера в портландцементе композиционной минеральной добавкой без снижения активности цемента при его домоле до удельной поверхности 450...500 м<sup>2</sup>/кг и введении суперпластификатора типа С-3 в количестве 1,5...2%. Нормальная густота такого вяжущего находится в пределах 20...22%. Оно характеризуется быстрым нарастанием прочности, которая уже в 2-суточном возрасте достигает 50% марочной (рис. 1 г). Ранняя прочность цемента практически линейно снижается с увеличением содержания в нем пыли. При достижении удельной поверхности вяжущего более 450 м<sup>2</sup>/кг ее влияние на раннюю прочность стабилизируется. Влияние добавки суперпластификатора в наибольшей мере ощущается при дозировках в пределах 1,3...1,5% от массы вяжущего (рис. 1 д).

Таким образом, проведенные исследования позволили экспериментально установить возможность получения композиционных высокопрочных быстротвердеющих вяжущих низкой водопотребности с использованием композиционной добавки, включающей пыль вращающихся печей и доменный гранулированный шлак.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Дворкин Л.И., Дворкин О.Л. Строительные материалы из отходов промышленности. – Ростов н/Д: Феникс, 2007 – 368 с.
2. Бутт Ю.М., Сычев М.М., Тимашев В.В. Химическая технология вяжущих материалов. – М., Высш. шк., 1980. – 472 с.
3. Гус С., Кейль Ф. Поведение щелочей при обжиге цемента // переводов «Цемент». Изд-во иностр. литры. – М., 1962. – С. 37–67
4. Баталин Б.С. Местное вяжущее на основе пыли электрофильтров Ново-Пашийского цементного завода // Вяжущие материалы Сибири и Дальнего востока. Изд-во «Наука», 1970. – С. 283–288.
5. Рекомендации по применению методов математического планирования эксперимента в технологии бетона. – М.: НИИЖБ, 1982 – 103 с.