

**Г.А. Гурьянов, Е.А. Клименко, О.Ю. Васильева**

Восточно-Казахстанский государственный технический университет  
им. Д. Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан

## **УЛУЧШЕНИЕ ПРОЦЕССА ПРИГОТОВЛЕНИЯ И КАЧЕСТВА БЕТОНА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА СПОСОБОВ АКТИВАЦИИ ЦЕМЕНТА**

Рассмотрены основные факторы, снижающие эффективность процесса взаимодействия частиц цемента с водой: большая доля крупнодисперсных частиц, флокуляция, неравномерное распределение цемента в объеме смеси, длительное хранение цемента до его использования. Определена актуальность работы – поиск способов повышения реакционной способности цементов, в том числе путем совершенствования активации цемента. Проанализированы способы активации цемента, дана краткая характеристика каждого способа, указаны их недостатки; установлено, что наиболее простым и доступным способом активации является механическая. Проанализированы способы механической активации, выявлены преимущества и недостатки мокрого и сухого способов. Установлено, что более эффективным и рациональным является способ сухой активации цемента свободным ударом. Проведены экспериментальные исследования процесса активации цемента свободным ударом. Выявлено, что такая активация дает увеличение удельной поверхности цемента и прочности бетона; определена положительная роль классификации материала на выходе из активатора. Установлено, что наибольшего эффекта можно достичь за счет применения сухой активации цемента свободным ударом, его классификации на выходе из активатора и последующего турбулентного смешивания с водой затворения. Представлена технология активации цемента. Предложено использовать отдельную технологию приготовления бетона с применением разработанной схемы активации непосредственно перед его применением на бетонном заводе.

**Ключевые слова:** бетон, цемент, активация, удельная поверхность, дезинтегратор, дисперсность, вибромельница, гидратация, смешивание, гранулометрия, агломерация, флокуляция, прочность, удар.

**G.A. Gur'ianov, E.A. Klimenko, O.Iu. Vasil'eva**

D. Serikbayev East Kazakhstan State Technical University,  
Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

## **IMPROVING THE CONCRETE PREPARATION PROCESS AND ITS QUALITY ON THE BASIS OF ACTIVATION METHODS ANALYSIS OF CEMENT**

Main factors that reduce the interaction effectiveness between cement particles with water – a large proportion of coarse particles, flocculation, an uneven distribution of cement in the mix volume, long-term storage of cement prior to use; determine the relevance of work – to find ways to increase the cement reactivity by improving the cement activation; analyzed ways to activate the cement, the brief description of each method are given, shortcomings are indentified; found that the easiest and most affordable activation way is mechanical way; mechanical activation methods are analyzed, advantages and disadvantages of both wet and dry methods are revealed; found that the most effective and efficient

way to dry is activated cement by free hit; experimental studies of the cement activation process with the free hit are carried out, it was found that this activation results increases specific surface of cement and concrete strength; the positive role of material classification at the activator exit is proposed; found that the greatest effect can be achieved by use of dry cement activation and free hit, its classification at the activator exit and its subsequent turbulent mixing with the mixing water are proposed; the technology of activation of cement is proposed; the separate preparation technology of concrete using the developed scheme activation immediately before use in the concrete plant is developed.

**Keywords:** concrete, cement, activation, specific surface area, disintegrator, dispersion, vibration mill, hydration, mixing, particle size, agglomeration, flocculation, strength, hit.

## Введение

Современное строительство немислимо без бетона, который в настоящее время является основным материалом для изготовления строительных конструкций и изделий и широко применяется в строительной, дорожной, горнодобывающей и других отраслях.

Одной из важнейших составных частей бетона является цемент, который определяет его качество. Активность цемента является ключевым фактором для получения бетона, соответствующего марке применяемого цемента. Активность цемента зависит от качества его изготовления на заводе, длительности транспортирования и хранения цемента перед приготовлением бетона. Цемент, получаемый с цементных заводов, как правило, содержит большое количество крупных фракций (60–100 мкм и более), и при затворении цемента водой в раствор переходят преимущественно мелкие фракции (0–60 мкм), а более крупные фракции остаются в цементном тесте в виде инертного наполнителя. Другими словами, 100%-ное использование вяжущих свойств цементов за счет полного взаимодействия частиц с водой затворения до сих пор не достигнуто, поскольку при существующих в настоящее время способах подготовки цемента и организации его дальнейшего взаимодействия с водой (введения и перемешивания) это невозможно из-за недостаточной реакционной способности зерен цемента, а также неудовлетворительного его распределения по объему смеси.

Реакционная способность цемента определяется в основном удельной площадью поверхности его частиц. Анализ показывает, что можно предположить существование трех факторов, снижающих эффективность взаимодействия цемента с водой:

1. Большая доля крупнодисперсных частиц, так как крупные частицы участвуют в процессе реакционного взаимодействия не полностью, т.е. значительная часть цемента фактически не является вяжущим материалом.

2. Флокуляция (слипание) частиц цемента. В результате флокуляции реальная площадь реакционной поверхности значительно меньше расчетной.

3. Сухой тонкодисперсный цемент не успевает равномерно распределиться в объеме жидкой фазы, в результате создается неоднородность смеси.

Кроме того, транспортирование и хранение цемента с высокой удельной поверхностью зерен ведет к потере части его активности.

Низкие показатели активности цемента заставляют увеличивать его расход для получения качественного бетона, что повышает себестоимость бетона, а в случае подачи в смесь нормативного количества цемента ухудшаются характеристики бетона.

В связи с этим актуальна работа по поиску способов повышения степени использования вяжущих свойств цементов, в том числе путем активации цемента, позволяющих повысить качество и снизить стоимость бетона. В настоящее время для повышения эффективности использования цементов применяется метод их активации.

Правильный выбор способа активации цемента может повысить качество бетона и послужить основой для улучшения экономических показателей процесса его приготовления, например за счет экономии цемента. Для совершенствования процесса активации целесообразно будет обратиться к опыту, накопленному в этой области [1–5].

## **1. Анализ способов активации цемента**

Анализ эффектов, имеющих место при использовании цементов, показывает, что исходные компоненты цементов, являясь дискретными дисперсными телами с обширной гранулометрией, обладают различной поверхностной энергией и по-разному проявляют ее, взаимодействуя с водой. Поэтому при приготовлении бетона проявляются эффекты, обеспечивающие химическое взаимодействие мелкодисперсной фазы с водой и вовлечение цемента в химическое взаимодействие, которое будет тем сильнее, чем большую вскрытую пробужденную активную поверхность он имеет. Для этого применяют обработку, способствующую наиболее полному возможному на данный момент разрушению зерен цемента, флокуляционных структур, образованию свежих развитых и химически активных поверхностей цемента с высокой реакционной способностью и называемую *активацией*.

В современной технологической практике применяют три базовых способа активации: химический, физический и механический [6–8].

Химическая активация основана на использовании различных поверхностно-активных веществ (ПАВ) в качестве добавок к цементам, способствующих их самопроизвольному диспергированию в растворах, что повышает активность взаимодействия цементов с водой. Основным недостатком ПАВ – их стоимость и влияние на окружающую среду.

Физическая активация осуществляется путем воздействия на среду различными физическими эффектами (тепловыми, магнитными, электрическими и т.п.).

Тепловая обработка может являться средством регулирования процесса взаимодействия воды и цемента. Повышение температуры увеличивает проникающую способность молекул воды, конденсирующихся на частицах цемента, и создает условия для их разрушения по наиболее слабым местам в результате адсорбционного понижения прочности и создания новых поверхностей. Ограничивает применение данного способа активации низкая скорость его протекания.

Предположительно, при действии электрического тока на активируемые вещества каждая частица может рассматриваться как электрический конденсатор, на поверхности которого ассоциируются пакеты возбужденных молекул воды. Изменение «емкостей» микроконденсаторов должно способствовать повышению интенсивности взаимодействия цемента с водой. Применение данного способа активации ограничивается слабой изученностью данного процесса применительно к цементам.

При магнитной активации водосодержащей дисперсной системы предполагаются процессы, аналогичные вышеописанным. Наложение магнитного поля улучшает адгезионные свойства системы. Однако существует мнение, что эффект магнитной обработки не всегда положителен и зависит как от состава воды, так и от магнитного поля Земли.

Механическая активация – один из наиболее действенных и доступных способов обработки веществ. Процессы механоактивации можно разделить на два уровня [6, 8]. Первый – макроуровень, характеризуется взаимодействием рабочего органа аппарата со средой и вносимыми им возмущениями, способствующими массообменным процессам, обеспечению напряженно-деформированного состояния среды, диспергированию твердой фазы и другим эффектам. Второй –

микроуровень – изменение энтропии сплошной и дисперсной фаз, наличие механоэмиссии и механоактивации, структурных преобразований в микрообъемах и других эффектов, изменяющих состояние обрабатываемого вещества.

Все способы активации можно разделить на мокрую и сухую активацию. При этом как мокрая, так и сухая активация имеет в своей основе измельчение в том или ином виде.

Осуществление мокрой активации [2–4, 6–8] значительно облегчается явлениями адсорбционного и химического диспергирования. При мокрой активации вода глубоко проникает в зерна цемента, с зерен механически удаляются верхние слои, благодаря чему обнажаются свежие поверхности зерен и существенно увеличивается общая площадь реакционной поверхности. При этом вода равномерно распределяется вокруг зерен цемента, что интенсифицирует процесс их взаимодействия. Мокрая активация может осуществляться на бегунах, в шаровых и вибромельницах с мелющими телами и в других механизмах.

Цемент при его обработке на бегунах, в шаровых или вибрационных мельницах будет подвергаться более или менее интенсивному истиранию. Более эффективной считается обработка в вибромельнице с мелющими телами [9], эффект активации в которой повышается благодаря высоким градиентам скорости и явлениям «вибрационного модифицирования» кристаллов цемента. Однако эффективность этого процесса зависит от количественного соотношения воды и цемента, химико-минералогического состава цемента, температуры и др. Считается, что с увеличением количества воды эффект активации повышается, а при ее недостатке и образовании вязкой массы условия для измельчения ухудшаются из-за значительного гашения кинетической энергии мелющих тел.

Вибромельницы позволяют выполнять интенсивную обработку, но их применение в производстве, в отличие от лабораторных условий, относительно затруднено.

Одними из наиболее эффективных устройств для мокрой активации являются роликовые активаторы, в которых смесь обрабатывается в малом коаксиальном зазоре между вращающимся ротором и корпусом, что приводит к интенсивному истиранию и снятию поверхностных слоев с зерен материала, увеличению площади реакционной поверхности. Основной недостаток – большие затраты мощности на трение в малом зазоре.

Считается, что высокий эффект от мокрой активации достигается за счет приложения высоких касательных напряжений к обрабатываемой среде [2, 4, 7, 8]. Эффект обеспечивается созданием высоких градиентов скоростей, которые, в свою очередь, создают силы трения и тангенциальные напряжения. Возникает интенсивное истирание зерен цемента. При этом зерна, как правило, имеют округлую форму и относительно сглаженную поверхность, что, как будет отмечено далее, не является положительным фактором и может снизить реакционную способность цемента. Также мокрая активация имеет ограничения по применению, а именно: она эффективна при активации смесей с В/Ц  $\geq 0,4$ , что при росте применения жестких смесей становится существенным недостатком.

Этого можно избежать при использовании сухой активации.

Известно, что порошок цемента неоднороден по своему гранулометрическому составу, и степень неоднородности могут во многом определяться его технологические свойства [4]. В связи с этим активность цемента можно характеризовать не только удельной поверхностью порошка, как это принято сейчас, но и зерновым составом и формой зерен. Можно предположить зависимость между содержанием зерен определенного размера и качеством готового бетона. Так, сверхмелкодисперсные частицы смогут оказывать влияние на твердение бетона на первом этапе, среднedisперсные частицы – на твердение в более поздние сроки. Другими словами, измельчая один и тот же цемент и соответственно изменяя долю тех или иных частиц в общей массе, можно получать разную скорость твердения бетона и его конечную прочность.

Считается, что активации легко добиться простым увеличением дисперсности порошка. Однако при этом имеет место нелинейное увеличение расхода энергии на получение материалов с высокой дисперсностью, поскольку чем меньше размер частицы, тем выше ее прочность. При высоких степенях измельчения происходит агломерация тончайших частиц, и дальнейший прирост удельной поверхности сопровождается повышенным расходом энергии и выделением тепла. Кроме того, в результате переизмельчения одних зерен цемента и недоизмельчения других можно получить весьма неравномерный во времени и неудовлетворительный по качеству процесс твердения бетона.

Таким образом, можно предположить, что для повышения активности цемента либо обеспечения возможности регулирования скорости

твердения бетона и его свойств в разные периоды времени необходимо изменять долю частиц определенного размера в общей массе цемента. Увеличение процентного содержания частиц нужных размеров необходимо осуществлять за счет измельчения крупных зерен, чтобы неактивные зерна в результате измельчения переходили в активную среднюю фракцию, оказывающую основное влияние на скорость и качество твердения бетона [4].

Чтобы уменьшить себестоимость активации цемента, необходимо прежде всего снизить затраты энергии на разрушение зерна [4]. Этому способствует, во-первых, помол относительно крупных зерен, который требует меньших затрат энергии, а значит, его себестоимость, относительно помола тонких частиц, невелика. Во-вторых, значительное уменьшение затрат энергии могут дать те способы, при которых материалы, имеющие прочность на сжатие большую, чем прочность на растяжение, измельчались бы под влиянием разрывающего сдвига со смещением, а не в результате сжимающих с двух сторон сил. Исходя из этого, более целесообразным и предпочтительным является метод разрушения свободным ударом, который основан на деформации одностороннего сжатия.

Большинство аппаратов мокрой активации, измельчающих частицы методом истирания и/или стесненного удара, не являются с этих позиций оптимальными. Как известно, прочность на сжатие в 6–12 раз превосходит прочность на растяжение. Поэтому разрушение деформацией сжатия менее выгодно, чем деформацией сдвига со смещением. В вибромельницах, роликовых активаторах и других аналогичных устройствах реализуется в основном разрушение деформацией сжатия и истирания, поэтому их КПД составляет не более 10 % всей подводимой энергии, а частицы измельченного продукта имеют продолговатую, лещадную либо округлую форму, что ухудшает реакционную способность материала. Кроме того, при мокрой активации практически отсутствует возможность повлиять на гранулометрический состав цемента, тогда как есть мнение, что активность цемента в большей степени зависит не от его дисперсности, а от его гранулометрического состава [1, 4]. На основании работ А.Н. Иванова-Городова было установлено, что равномерное и быстрое твердение цемента достигается при следующих зерновых составах: зерен < 5 мкм – не более 20 %, зерен 5–20 мкм – около 40–45 %, зерен 20–40 мкм – 20–25 %, а зерен > 40 мкм – 15–20 %.

Сухую активацию можно проводить методом свободного удара в дезинтеграторах, центробежных, струйных мельницах и др. Гранулометрия продукта в этом случае зависит от скорости удара, подбирая которую, можно получить частицы с определенной, достаточно узкой гранулометрией и таким образом повысить активность цемента наиболее рациональным способом.

Применение активаторов ударного действия позволяет влиять на форму и шероховатость частиц. Различные исследования [1, 4, 5, 8, 10] показывают, что помольные агрегаты, использующие модель разрушения истиранием, сжатием и стесненным ударом, производят частицы шарообразной формы, в то время как измельчение свободным ударом дает почти кубообразную форму частиц. Поскольку площадь шара примерно в половину меньше площади куба, то удельная поверхность цемента, получаемого методом дезинтеграции, значительно больше при одинаковых линейных размерах частиц. Частицы кубообразной формы с острыми углами и сильно развитой конфигурацией, получаемые в результате свободного удара, будут интенсивнее взаимодействовать с водой, что приведет к более высоким характеристикам готового бетона.

Еще одним методом снижения энергетических затрат является перевод работы активатора на замкнутый цикл: активированный материал поступает в классификатор, где из него выделяются частицы тех размеров, какие требуются для готового продукта, а более крупные зерна направляются снова в активатор на дополнительное измельчение. Благодаря такому циклу производительность активаторных установок может возрасти на 20–30 %, а расход энергии снизиться на 15–20 %.

Таким образом, замещение мокрой активации сухой активацией в более энергетически выгодных измельчительных аппаратах ударного действия с одновременным применением снижающей классификации позволит ускорить прогресс в этой области.

Эффективность использования сухой активации цементов свободным ударом косвенно подтверждается результатами исследований [10], которые выявили, что на увеличение теплоты смачивания, которая пропорционально характеризует степень активности материала, влияют как скорость разрушения, так и модель разрушения. Так, для свободного удара величина повышения теплоты смачивания почти прямо пропорциональна увеличению скорости разрушения. При стесненном ударе увеличение скорости разрушения очень мало влияет на повышение теплоты смачивания. Кроме того, измельчение цементов ударом приво-

дит к значительному росту водопотребности материалов, что свидетельствует о том, что активность цемента увеличивается. Поэтому именно помольные агрегаты свободного удара способны в наиболее полной мере реализовать потенциал механоактивации.

С помощью сухой активации можно «оживлять» цемент после долгого хранения, измельчать его крупные агломераты, использовать в производстве бетонов золы и шлаки – отходы энергетической и металлургической промышленности и т.д. Кроме того, сухой активированный цемент допускает большее разнообразие возможностей его использования [11–14].

## 2. Экспериментальные исследования по активации цемента

Для механоактивации свободным ударом рекомендуется применять два основных вида машин: дезинтеграторы и струйные мельницы. При этом можно отметить, что энергозатраты на тонкое измельчение в струйных мельницах существенно больше, чем в дезинтеграторах. С другой стороны, наиболее распространенным видом машин для сухой активации считаются вибрационные мельницы. Нами на основании анализа различных источников, а также собственных экспериментов, проведенных в ходе выполнения работы по договору № 84–210–13 с МОН РК, произведено сравнение вибрационной мельницы и дезинтегратора с точки зрения энергозатрат и эффективности активации. Влияние скорости удара на прочность цементного камня на сжатие представлено в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Влияние скорости удара на прочность цементного камня на сжатие

Параметры измельчения	Влияние скорости удара, м/с, на прочность цементного камня, кг/см <sup>2</sup>	
	25 м/с	50 м/с
Свободный удар (дезинтегратор)	33	40
Стесненный удар (вибромельница)	7	9

Результаты сравнения показывают, что дезинтеграция является более эффективным методом активации цемента и, кроме того, обладает большей энергоэффективностью. Однако в процессе исследований

были выявлены и недостатки дезинтеграторов: большая масса и габариты, низкий коэффициент использования внутреннего объема, трудность регулировки гранулометрического состава готового продукта и др., что свидетельствует о необходимости совершенствования подобных машин.

На основе результатов анализа и экспериментального сравнения процесса активации в дезинтеграторе и вибромельнице были проведены экспериментальные исследования изменения удельной поверхности цемента и прочности бетона в результате дезинтеграторной активации. Эксперименты проводились в лаборатории кафедры «Технологические машины и оборудование» («ТМ и О») ВКГТУ на опытном образце активатора-дезинтегратора, разработанного на кафедре «ТМ и О» и отличающегося конструкцией и способом установки пальцев-ударников. Эксперименты по активации лежалого цемента, получению на его основе образцов бетона и дальнейшие их испытания проводились по стандартной методике с использованием прибора ПСХ-10А.

Сначала были определены характеристики исходного цемента – удельная поверхность  $S$  (см<sup>2</sup>/г) и средний диаметр частиц  $d$  (мкм), которые приведены в табл. 2.

Таблица 2

Характеристики исходного (лежалого) цемента

Номер испытания	Плотность цемента, г/см <sup>3</sup>	Масса навески, г	Высота слоя материала в кювете, мм	Удельная поверхность $S$ , см <sup>2</sup> /г	Средний диаметр частиц $d$ , мкм
1	3,0	10	13,3	3725	5,4
2	3,0	10	12,9	3574	5,6
3	3,0	10	12,5	3777	5,3

После замеров навеска исходного цемента подверглась обработке в активаторе-дезинтеграторе. Измерения, проведенные после активации, дали следующие результаты:

– после однократного прохождения через активатор:  $S = 4069$  см<sup>2</sup>/г,  $d = 4,9$  мкм.

– после двухкратного прохождения:  $S = 4444$  см<sup>2</sup>/г,  $d = 4,5$  мкм.

– после трехкратного прохождения:  $S = 4878$  см<sup>2</sup>/г,  $d = 4,1$  мкм.

– после четырехкратного прохождения:  $S = 5030$  см<sup>2</sup>/г,  $d = 4,0$  мкм.

– после пятикратного прохождения:  $S = 5089$  см<sup>2</sup>/г,  $d = 3,9$  мкм.

Шестое и последующие прохождения показали, что удельная поверхность и средний диаметр частиц цемента практически не изменяются, повышается только энергоемкость процесса. Поэтому было сделано заключение о нецелесообразности дальнейшей активации при данных параметрах и режимах работы активатора. В целом можно отметить, что в результате активации в разработанном активаторе-дезинтеграторе получена удельная поверхность, которая для портландцементов считается оптимальной (5000–6000  $\text{см}^2/\text{г}$ ). Обобщенные результаты экспериментов показаны в виде графиков на рис. 1.

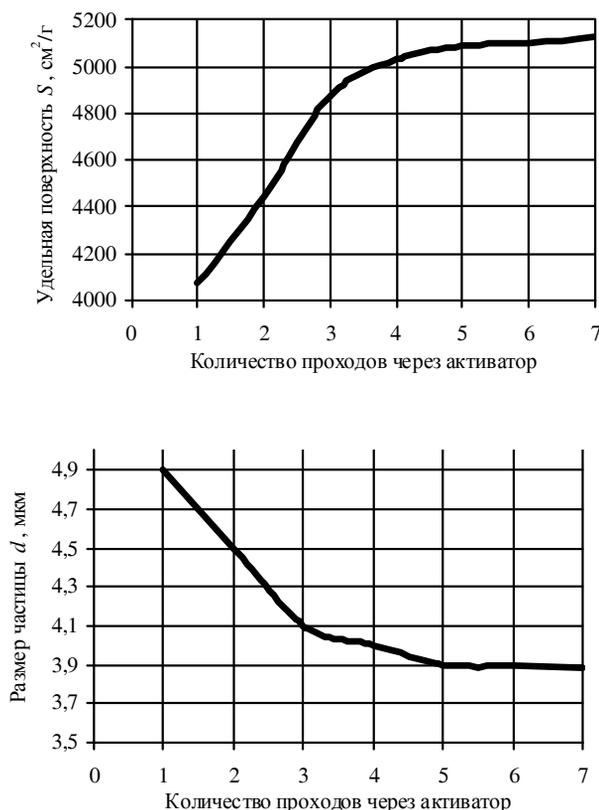


Рис. 1. Графики кинетики активации цемента в активаторе-дезинтеграторе

На основе активированного цемента были изготовлены образцы бетона при В/Ц = 0,3. Для приготовления образцов использовался цемент: в исходном состоянии, активированный до удельной поверхности около 4500  $\text{см}^2/\text{г}$  и активированный до удельной поверхности около 5089  $\text{см}^2/\text{г}$ . Из полученного бетона формовали образцы-кубики

размером 12×12 см, которые выдерживали до 28 сут во влажных условиях. Через 7, 14 и 28 сут определяли предел прочности кубиков при сжатии по стандартной методике. Результаты исследований, представленные в табл. 3 и на рис. 2, свидетельствуют о росте прочности цементного камня при увеличении степени активации цемента.

Таблица 3

Зависимость прочности бетона от степени активации цемента

Параметры	Прочность бетона $\sigma$ , кг/см <sup>2</sup> , замеренная в возрасте		
	7 сут	14 сут	28 сут
Исходный цемент без активации	140	250	320
Активированный цемент – $S = 4500 \text{ см}^2/\text{г}$	280	330	460
Активированный цемент – $S = 5089 \text{ см}^2/\text{г}$	350	510	620

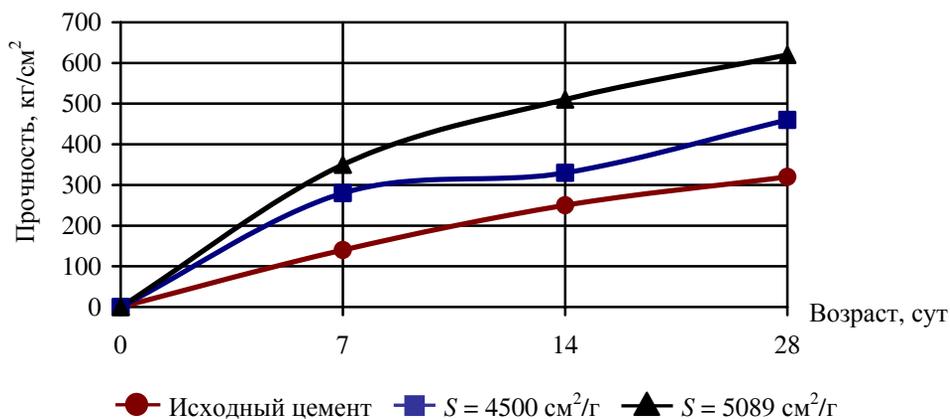


Рис. 2. Зависимость прочности бетона от степени активации цемента

### 3. Предложения по улучшению технологии приготовления бетонов

При классической схеме производства бетона инертные заполнители смешиваются с цементом, затем вводятся вода и добавки. Все эти компоненты перемешиваются, в результате чего после твердения получается искусственный каменный материал.

На качество цемента влияют условия его хранения и транспортировки. Качество ухудшается от воздействия не только присутствующей в окружающей среде влаги, но и содержащегося в атмосфере углекислого газа. Поскольку со времени производства цемента до момента его использования может проходить значительное время, можно рекомендовать активаторы цемента применять непосредственно на бетонных заводах и узлах, находящихся вдали от цементных заводов. Это позволяет говорить об использовании для приготовления бетона так называемой раздельной технологии, при которой цемент сначала активируется и смешивается с водой с помощью специальных устройств, а затем полученное цементное тесто смешивается с крупным и мелким заполнителями, образуя бетонную смесь [15, 16].

Учитывая вышесказанное и исходя из того, что технология активации цемента должна опираться на следующие основные положения: использование сухой активации свободным ударом; использование классификации продукта измельчения; использование замкнутой схемы измельчения; использование активированного порошка цемента сразу после активации, – можно дать общее описание предлагаемого метода активации.

Цемент низкой активности подается в агрегат измельчения ударного действия со скоростью соударения, обеспечивающей преимущественно переход частиц из крупного класса в средний, в результате чего грубая фракция цементного порошка получает прирост удельной поверхности. Далее порошок из активатора попадает в классификатор, где из общей массы материала извлекается фракция частиц крупнее граничного размера. Изменяя граничную крупность разделения частиц, можно варьировать количество извлекаемых частиц. После классификации недоизмельченные частицы цемента отправляются обратно в измельчитель, а готовая фракция должна сразу использоваться для приготовления бетона.

При использовании раздельной технологии приготовления бетона можно применять следующие общие схемы на основе различных способов активации:

- 1) схема с мокрой активацией цементного теста;
- 2) схема с сухой активацией цемента свободным ударом;
- 3) схема с комплексной активацией путем совмещения сухой ударной активации цемента с последующим интенсивным смешиванием активированного цемента с водой.

Смешивание активированного цемента с водой рекомендуется проводить вибротурбулентным способом. Это позволяет достичь равномерного распределения цемента по объему цементного теста и высокой степени однородности смеси, разобращения слипшихся зерен цемента (дефлокуляция), повышения реакционной способности системы за счет введения дополнительной энергии турбулизации. Длительность вибротурбулентного смешивания сравнительно меньше обычных способов (например, в мешалке), а достаточная однородность смеси обеспечивается уже при одноступенчатой турбулентной обработке.

Основной проблемой при внедрении отдельной технологии в существующие технологические линии является то, что включение активатора в технологическую цепь приготовления бетонных смесей требует изменения компоновки оборудования.

### **Полученные результаты (выводы)**

1. В настоящее время достичь 100%-ного использования вяжущих свойств цементов невозможно.

2. Для повышения степени использования свойств цементов целесообразно применять их механоактивацию путем измельчения для увеличения площади контакта с водой затворения непосредственно перед применением, что позволит повысить качество бетона и снизить стоимость процесса, например за счет экономии цемента.

3. Сухая активация методом свободного удара имеет преимущества перед мокрой активацией, как по технологической, так и по экономической эффективности процесса. Активация в дезинтеграторе является более эффективной, чем активация в вибомельнице. В результате экспериментальных исследований процесса активации цемента в дезинтеграторе получено увеличение удельной поверхности цемента и прочности бетона в 1,5–2 раза.

4. Необходимо вести работу по совершенствованию аппаратов для сухой активации свободным ударом в направлении снижения энергоемкости процесса, расширения возможности регулирующего воздействия на гранулометрический состав готового продукта, повышения коэффициента использования внутреннего объема активатора и т.д.

5. Поскольку цемент теряет свою активность преимущественно при транспортировании и длительном хранении, то активацию цемента рекомендуется применять непосредственно на бетонных заводах перед его использованием. При этом для приготовления бетона рекомендует-

ся использовать отдельную технологию, предусматривающую активацию цемента и смешивание его с водой с получением цементного теста, которое затем смешивается с заполнителями с образованием бетонной смеси.

6. Для получения максимального эффекта от активации цемента можно рекомендовать к применению двухстадийную технологию механоактивации, включающую сухую активацию цемента свободным ударом, классификацию цемента на выходе из активатора и последующее вибротурбулентное перемешивание цемента с водой, что способствует экономии цемента, интенсифицирует процесс приготовления бетона и повышает его качество.

### Список литературы

1. Черниговский А. Внедрение новых технологий в производство бетонных изделий с целью экономии энергии и цемента // Железобетонные изделия и конструкции. – 2010. – № 2. – С. 42–48.

2. Веригин Ю.А. Развитие исследований в области активации дисперсных сред механическими способами // Проблемы НТП и отраслей народного хозяйства: сб. науч. трудов. – Усть-Каменогорск: УКСДИ, 1993. – С. 65–70.

3. Веригин Ю.А. Основные проблемы и направления приоритетных исследований в области приготовления и активации дисперсных сред // Интерстроймех-98: сб. докл. Междунар. науч.-техн. конф. – Воронеж: ГАСА, 1998. – С. 85–91.

4. Аввакумов Е.Г. Механические методы активации в переработке природного и техногенного сырья. – Новосибирск: Акад. изд-во «Гео», 2009. – 155 с.

5. Федоркин С.И. Механоактивация вторичного сырья в производстве строительных материалов. – Симферополь: Таврия, 1997. – 180 с.

6. Веригин Ю.А. Основы теории и совершенствования технологии получения тонкодисперсных сред, машин и оборудования для измельчения материалов // Научные школы и направления АлтГТУ им. И.И. Ползунова: сб. науч. тр. – Новосибирск: Наука, 2003. – С. 138–143.

7. Веригин Ю.А. Технологические принципы измельчения и активации исходного сырья при изготовлении дорожно-строительных материалов // Интерстроймех-2007: материалы Междунар. науч.-техн. конф., 11–14 сентября 2007 г. / СГАСУ. – Самара, 2007. – С. 15–20.

8. Веригин Ю.А. Разработка и создание аппаратов для приготовления стройматериалов на основе анализов процессов активации дисперсных сред: дис. ... д-ра техн. наук. – М., 1990. – 322 с.

9. Морохов И.Д., Трусов Л.И., Лапова В.Н. Физические явления в ультрадисперсных средах. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 224 с.

10. Ружинский С.И. Внешние механические воздействия в технологии бетонов. – СПб., 2005. – 120 с.

11. Веригин Ю.А. О теоретических основах процессов измельчения материалов в наукоемких технологиях. Перспективные строительные конструкции и технологии. – Барнаул: Изд-во Алт. гос. ун-та, 1995. – С. 88–90.

12. Веригин Ю.А. Проблемы расчета виброизмельчения тонких сред // Изв. вузов. Строительство. – 2001. – № 7. – С. 112–115.

13. Mann S. Nanotechnology and Construction // Nanoforum.org. European Nanotechnology Gateway, 2006.

14. Wegner T., Winandy J., Ritter M. Nanotechnology Opportunities in Residential and Non-Residential Construction // Proceeding of International Symposium on Nanotechnology in Construction. – Bilbao, Spain, 2005.

15. Balagura P.N. Nanotechnology and Concrete: Background, Opportunities and Challenges // Applications of Nanotechnology in Concrete Design, Proceeding of the International Conference, University of Dundee Scotland UK. – 2005. – P. 113–122.

16. Sobolev K., Ferrada-Gutierrez V. How Nanotechnology Can Change the Concrete World. Part 2 // American Ceramic Society Bulletin. – 2005. – No. 1. – P. 16–19.

## References

1. Chernigovskii A. Vnedrenie novykh tekhnologii v proizvodstvo betonnykh izdelii s tsel'iu ekonomii energii i tsementa [Implementation of new technologies in the concrete products production in order to save energy and cement]. *Zhelezobetonnye izdeliia i konstrukii*, 2010, no. 2, pp. 42-48.

2. Verigin Iu.A. Razvitie issledovaniy v oblasti aktivatsii dispersnykh sred mekhanicheskimi sposobami [The research development in the field of dispersive substances activation by mechanical methods]. *Sbornik nauchnykh trudov "Problemy NTP i otraslei narodnogo khoziaistva"*. Ust'-Kamenogorsk: UKSDI, 1993, pp. 65-70.

3. Verigin Iu.A. Osnovnye problemy i napravleniia prioritnykh issledovaniy v oblasti prigotovleniia i aktivatsii dispersnykh sred [Main problems and priority areas of research in the field of preparation and activation of dispersed substances]. *Sbornik dokladov Mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii "Interstroimekh-98"*. Voronezh: GASA, 1998, pp. 85-91.

4. Avvakumov E.G. Mekhanicheskie metody aktivatsii v pererabotke prirodnogo i tekhnogenogo syr'ia [Mechanical methods of activation in natural and man-made materials processing]. Novosibirsk: Akademicheskoe izdatel'stvo "Geo", 2009. 155 p.

5. Fedorkin S.I. Mekhanoaktivatsiia vtorichnogo syr'ia v proizvodstve stroitel'nykh materialov [Mechanical activation of secondary raw materials in the building materials manufacture]. Simferopol': Tavriia, 1997. 180 p.

6. Verigin Iu.A. Osnovy teorii i sovershenstvovaniia tekhnologii polucheniia tonkodispersnykh sred, mashin i oborudovaniia dlia izmel'cheniia materialov [Theory basics and technology improving of finely dispersed substances achieve, machinery and equipment for the materials crushing]. *Sbornik nauchnykh trudov "Nauchnye shkoly i napravleniia AltGTU imeni I.I. Polzunova"*. Novosibirsk: Nauka, 2003, pp. 138-143.

7. Verigin Iu.A. Tekhnologicheskie printsipy izmel'cheniia i aktivatsii iskhodnogo syr'ia pri izgotovlenii dorozhno-stroitel'nykh materialov [Technological principles of crushing and raw materials activation the road-building materials manufacture]. *Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii "Interstroimekh-2007"*. Samara: Samarskii gosudarstvennyi arkhitektrno-stroitel'nyi universitet, 2007, pp. 15-20.

8. Verigin Iu.A. Razrabotka i sozdanie apparatov dlia prigotovleniia stroimaterialov na osnove analizov protsessov aktivatsii dispersnykh sred [The design and creation of devices for the materials preparation based on process analysis of dispersed substances activation]. Thesis of Doctor's degree dissertation. Moscow, 1990. 322 p.

9. Morokhov I.D., Trusov L.I., Lapova V.N. Fizicheskie iavleniia v ul'tradispersnykh sredakh [Physical phenomena in ultrafine substances]. Moscow: Energoatomizdat, 1984. 224 p.

10. Ruzhinskii S.I. Vneshnie mekhanicheskie vozdeistviia v tekhnologii betonov [External mechanical impacts in concrete technology]. Saint-Petersburg, 2005. 120 p.

11. Verigin Iu.A. O teoreticheskikh osnovakh protsessov izmel'cheniia materialov v naukoemkikh tekhnologiiakh [About theoretical basis of crushing materials in high technology]. *Perspektivnye stroitel'nye konstruksii i tekhnologii*. Barnaul: AGU, 1995, pp. 88-90.

12. Verigin Iu.A. Problemy rascheta vibroizmel'cheniia tonkikh sred [The problem of calculating the vibro crushing of fine substances]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo*, 2001, no. 7, pp. 112-115.

13. Mann S. Nanotechnology and Construction. *Nanoforum.org. European Nanotechnology Gateway*, 2006.

14. Wegner T., Winandy J., Ritter M. Nanotechnology Opportunities in Residential and Non-Residential Construction. *Proceeding of International Symposium on Nanotechnology in Construction*. Bilbao, Spain, 2005.

15. Balagura P.N. Nanotechnology and Concrete: Background, Opportunities and Challenges. *Applications of Nanotechnology in Concrete Design, Proceeding of the International Conference*. University of Dundee Scotland UK, 2005, pp. 113-122.

16. Sobolev K., Ferrada-Gutierrez V. How Nanotechnology Can Change the Concrete World. Part 2. *American Ceramic Society Bulletin*, 2005, no. 1, pp. 16-19.

Получено 9.03.2015

### Об авторах

**Гурьянов Георгий Александрович** (Усть-Каменогорск, Казахстан) – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Технологические машины и оборудование» Восточно-Казахстанского государственного технического университета им. Д. Серикбаева (070004, г. Усть-Каменогорск, ул. Протозанова, 69, e-mail: gguryanov@mail.ru).

**Клименко Евгений Александрович** (Усть-Каменогорск, Казахстан) – докторант Восточно-Казахстанского государственного технического университета им. Д. Серикбаева (070010, г. Усть-Каменогорск, Протозанова, 69, e-mail: klimenko2307@mail.ru).

**Васильева Ольга Юрьевна** (Усть-Каменогорск, Казахстан) – старший преподаватель кафедры «Безопасность жизнедеятельности и охрана окружающей среды» Восточно-Казахстанского государственного технического университета им. Д. Серикбаева (070004, г. Усть-Каменогорск, Протозанова, 69, e-mail: gguryanov@mail.ru).

### **About the authors**

**Georgii A. Gur'ianov** (Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Professor, Department of Technological Machines and Equipment, D. Serikbayev East Kazakhstan State Technical University (69, Protozanov st., Ust-Kamenogorsk, 070004, Kazakhstan, e-mail: gguryanov@mail.ru).

**Evgenii A. Klimenko** (Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan) – Doctoral student, D. Serikbayev East Kazakhstan State Technical University (69, Protozanov st., Ust-Kamenogorsk, 070004, Kazakhstan, e-mail: klimenko2307@mail.ru).

**Olga Iu. Vasil'eva** (Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan) – Senior Lecturer, Department of Safety and Environmental Protection, D. Serikbayev East Kazakhstan State Technical University (69, Protozanov st., Ust-Kamenogorsk, 070004, Kazakhstan, e-mail: gguryanov@mail.ru).