

В данной статье рассматриваются рациональные технологии получения высокоактивных быстротвердеющих цементов, основанные на принципах ударного измельчения. Выявлена зависимость наиболее рационального и наименее энергозатратного способа измельчения от исходного размера материала. Установлено влияние типа помольного механизма на гранулометрический состав и форму частиц продукта измельчения.

УДАРНАЯ АКТИВАЦИЯ ИЛИ НАИБОЛЕЕ ЭНЕРГОПРОДУКТИВНЫЕ СПОСОБЫ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ СЫРЬЕВЫХ РЕСУРСОВ

А.Б. ЛИПИЛИН, гл. инженер ООО «СтройМеханика», руководитель ИТП «ТехПрибор»,

Н.В. КОРЕНЮГИНА, инженер-технолог ООО «СтройМеханика»,

М.В. ВЕКСЛЕР, инженер, ведущий специалист ИТП «ТехПрибор» (г.Тула)

Вопросы экономии, рационального использования энергетических и материальных ресурсов, снижения издержек производства в настоящее время приобретают особую актуальность и требуют своего грамотного решения.

Сегодня строительная индустрия является одной из крупнейших отраслей народного хозяйства, соответственно проблемы экономии ресурсов представлены здесь

бетона является цемент. И хотя цемент – это дорогой и дефицитный материал, его перерасход в строительстве поистине огромен. Нехватка качественных заполнителей для бетона, несоответствие фактической и заявленной марки цемента, низкая культура производства бетонных изделий, пренебрежительное отношение к правилам подбора состава бетонной смеси, грубые нарушения правил транспортировки и хранения цемен-

та являются факторами, влияющими на качество и себестоимость бетона. И хотя цемент – это дорогой и дефицитный материал, его перерасход в строительстве поистине огромен. Нехватка качественных заполнителей для бетона, несоответствие фактической и заявленной марки цемента, низкая культура производства бетонных изделий, пренебрежительное отношение к правилам подбора состава бетонной смеси, грубые нарушения правил транспортировки и хранения цемен-

та является факторами, влияющими на качество и себестоимость бетона. И хотя цемент – это дорогой и дефицитный материал, его перерасход в строительстве поистине огромен. Нехватка качественных заполнителей для бетона, несоответствие фактической и заявленной марки цемента, низкая культура производства бетонных изделий, пренебрежительное отношение к правилам подбора состава бетонной смеси, грубые нарушения правил транспортировки и хранения цемен-

Основные свойства цемента, в том числе его активность и скорость твердения, определяются не только химическим и минералогическим составом клинкера, но и, в большей степени, тонкостью помола продукта, его гранулометрическим составом, а также формой частичек порошка

особенно остро. Следствием сложившейся ситуации является высокое материалопотребление отечественного строительства, его высокая себестоимость и зачастую низкое качество.

Вместе с тем существующие методы интенсификации производства материалов строительного назначения позволяют обеспечить существенный рост объемов полезных результатов на фоне относительной стабильности материальных затрат.

Бетонные изделия и железобетонные конструкции являются в буквальном смысле основой современного строительства. Бетон прочно занимает ведущее положение по сравнению с другими строительными материалами.

Надежность и долговечность бетонных и железобетонных конструкций, стойкость к воздействию агрессивных сред, относительно простая технология производства, возможность регулирования основных технико-эксплуатационных показателей и физико-механических характеристик, наконец, практически неисчерпаемая сырьевая база для производства вяжущих материалов и заполнителей объясняет широкое распространение этого материала и позволяет рассматривать бетон как основной компонент капитального строительства не только настоящего, но и будущего.

И все же, несмотря на многие замечательные качества и доступность сырьевых компонентов, бетон относится к весьма энергоемким строительным материалам. При этом наиболее дорогостоящим компонентом

та – все эти факторы самым негативным образом влияют на качество и себестоимость бетона.

Так, использование песчано-гравийных смесей без корректировки фракционного состава вызывает перерасход цемента до 100 кг/м³. Только при таком расходе цемента удастся получить запроектированную марку бетона по прочности и обеспечить нужную пластичность бетонной смеси. Зачастую только для ускорения набора распалубочной прочности бетона на предприятиях ЖБИИК расход цемента увеличивают на 20-25 % от количества, достаточного для получения материала заданной прочности. Низкая изначальная активность цемента либо ее катастрофическое снижение в результате неправильного складирования, небрежного транспортирования и частых перегрузок также вызывает его перерасход.

Принимая во внимание, что на фоне настоятельной необходимости снижения удельного расхода дорогостоящих компонентов современное строительство особенно остро нуждается в высокопрочных быстротвердеющих бетонах, становится совершенно очевидно, что практическое воплощение ресурсосберегающих технологий невозможно без проведения целого комплекса работ по увеличению активности цемента и снижению его расхода в строительстве.

Хорошо известно, что основные свойства цемента, в том числе его активность и скорость твердения, определяются не только химическим и минералогическим составом клинкера, формой и размерами

проведено советскими учеными в 50-60-х годах прошлого века. Тогда же был заложен фундамент сегодняшних знаний о теории и практике увеличения полезных свойств минеральных вяжущих веществ. Были исчерпывающе полно изучены особенности производства и применения цементов повышенной активности, разработаны рекомендации для их изготовления, с учетом минералогического состава цементного клинкера, оптимальных дозировок гипса, необходимой тонкости помола, возможности введения минеральных добавок и целого ряда других параметров.

Вопросами производства и промышленного применения активированных цементов занимались такие известные советские ученые, как Б.Г. Скрамтаев, В.Н. Юнг, С.М. Рояк, Ю.М. Бутт, А.Е. Шейкин, Г.М. Рушук, М.И. Стрелков и многие другие. Несмотря на то что результаты работ отдельных ученых и целых научных школ несколько отличались друг от друга, в обобщенном виде их можно представить следующим образом. Клинкер для производства высокоактивных цементов должен содержать повышенное количество быстротвердеющих клинкерных минералов. Оптимальная дозировка гипса зависит от минералогического состава клинкера, тонкости его помола, содержания стекловидной фазы и т.д. Тонкость помола быстротвердеющих высокоактивных цементов должна быть выше, нежели у рядовых цементов.

На основе теоретических изысканий и натуральных экспериментов были сделаны

выводы о том, что увеличение тонкости помола цемента сказывается на его прочности и скорости твердения гораздо сильнее всех остальных рассматриваемых мероприятий, поэтому для получения высокоактивного быстротвердеющего цемента необходимо увеличение тонкости помола с обычных 2000-3000 $\text{см}^2/\text{г}$ до 3500-4500 $\text{см}^2/\text{г}$. Также отмечалось, что увеличение удельной поверхности цементного порошка сверх 6000 $\text{см}^2/\text{г}$ нецелесообразно. Изменяя показатели удельной поверхности рядового цементного порошка, возможно получение цемента марок 600, 700 и 700 БТЦ, при этом минералогия и химический состав клинкера остаются неизменными.

На основании полученных результатов в короткое время было разработано необходимое технологическое оборудование средней и малой мощности, предназначенное для помола рядового цемента. Началось активное внедрение технологии активации на предприятиях по выпуску бетонных изделий и конструкций. Количество вибропомольных узлов стремительно росло, но спустя короткое время интерес к активации цемента постепенно начал угасать вплоть до практически полного забвения. Более того, тема изготовления быстротвердеющих высокоактивных вяжущих материалов на заводах ЖБИ, то есть в

результатам, так как эффект повышения вяжущих свойств цемента не покрывал расходов на ее осуществление.

Для того чтобы понять, насколько практическая эффективность активации цемента зависит от требуемой дисперсности продукта и выбранного типа помольного механизма, необходимо коротко остановиться на основных способах измельчения твердых тел.

Итак, под измельчением твердых тел мы понимаем направленное уменьшение их первоначальных размеров в результате механического или иного воздействия. В производстве цемента применяется измельчение или диспергирование (от лат. *dispergo* – рассеиваю, рассыпаю) твердых тел, приводящее к образованию дисперсных систем или порошков. Разрушение твердых тел может производиться различными способами, наиболее распространенные из них представлены на рисунке 1.

Обычно в размольных машинах или мельницах разрушение твердого тела происходит несколькими способами в результате комбинированного воздействия, но преобладающим является один или два способа. Исходя из физических свойств твердого тела, соответственно выбирается и наиболее оптимальный способ его разрушения. Однако помимо физических свойств материала

мельницы, дезинтеграторы). Исходя из вышесказанного, напрашивается вывод, что при неизменных физических свойствах твердого тела наиболее оптимальный способ разрушения может меняться в зависимости от размера измельчаемых частиц. Если один способ измельчения оправдан при получении частиц относительно большого размера, совершенно неочевидно, что этот же способ окажется эффективным при ее дальнейшем разрушении. Напротив, практика использования помольно-дробильного оборудования в различных областях производственной деятельности показывает, что для максимально эффективного измельчения при минимальном расходе энергии с изменением объема или линейных размеров частицы необходима и смена самого способа измельчения.

Существует четкая зависимость между размером частицы и расходом энергии на ее разрушение. Измельчение требует затрат энергии тем больше, чем выше требуемая степень измельчения. Данная зависимость приобретает особую наглядность при работе с высокодисперсными системами, к которым относится и цементный порошок.

Все твердые материалы характеризуются присущим им сопротивлением разрушению, причем на разных ступенях тонкого измельчения сопротивление разрушению

Все твердые материалы, характеризуются присущим им сопротивлением разрушению, причем на разных ступенях тонкого измельчения сопротивление разрушению может существенно различаться

непосредственной близости от места изготовления бетона, была закрыта настолько плотно, что несколько десятилетий академическая наука к ней серьезно не возвращалась.

Но как могло случиться, что перспективнейшее направление, обещающее многомиллионную экономию и кардинальное улучшение основных характеристик цемента, после того как были получены впечатляющие результаты, наложен промышленный выпуск оборудования, запущены экспериментальные участки и крупнотоннажные производства, было совершенно забыто?

Причина этого, казалось бы, парадоксального факта, на наш взгляд заключается в экономической несостоятельности предлагаемого метода активации, которая обусловлена неверно выбранным способом измельчения цементного зерна. Или, иными словами, многочисленные попытки внедрения активации цемента на местах его использования не привели к желаемым

результатам, так как эффект повышения вяжущих свойств цемента не покрывал расходов на ее осуществление.

Именно требования к дисперсности продукта имеют определяющее значение при выборе типа помольного оборудования и, соответственно, способа измельчения.

Для примера, иллюстрирующего зависимость наиболее рационального, а значит и наименее энергос затратного способа измельчения, от исходного размера материала, можно привести следующую зависимость: для среднего и крупного измельчения твердых тел используется раздавливание, раскалывание, изгиб, реже удар (дробилки конусные, щековые, валковые, роторные). В то время как для тонкого измельчения преимущественно используется истирание и удар, либо комбинация этих двух способов (шаровые мельницы различного способа побуждения мелющих тел, струйные

может существенно различаться. Так, при помоле цемента в шаровой мельнице до удельной поверхности 3000-3500 $\text{см}^2/\text{г}$ ее прирост практически пропорционален затраченной работе. Однако при более высоких степенях измельчения дальнейший прирост удельной поверхности сопровождается повышенным расходом энергии, эффективность измельчения снижается.

Таким образом, с точки зрения оптимального соотношения количества затрачиваемой энергии, способа измельчения и дисперсности получаемого продукта показатель удельной поверхности 2500-3000 $\text{см}^2/\text{г}$ объективно является предпочтительным. Обычно цементный порошок домальвается до означенного размера и не более того. Происходит это потому, что даже с учетом увеличения активности цемента, повышения его марки дальнейший помол с использованием преимущественно истирающего способа измельчения просто экономически невыгоден. ►

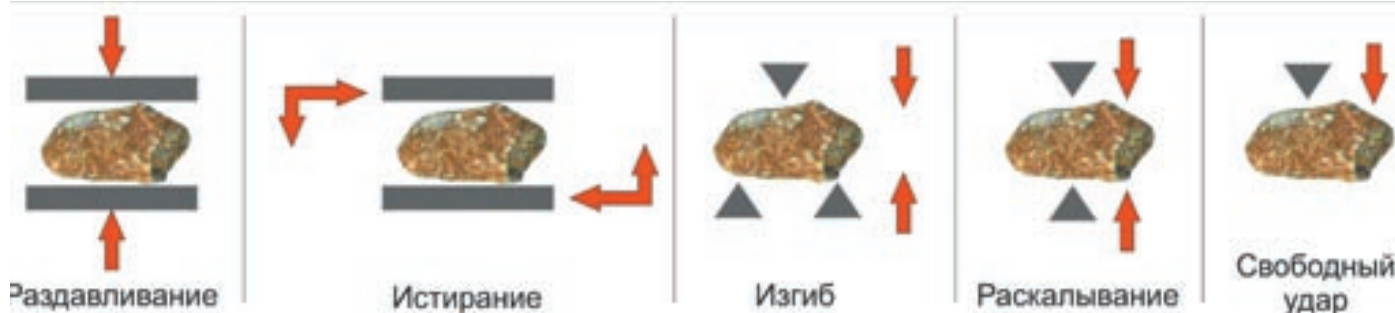


Рис. 1.

В работах по активации цемента путем его домала в основном применяются однокамерные барабанные и вибрационные шаровые мельницы малой и средней мощности. То есть, для активации цемента используется помольное оборудование, энергоэффективность которого значительно уступает многокамерным барабанным мельницам большой производительности, используемым на цементных заводах. Эксплуатация высокопроизводительного помольного оборудования, применение воздушных сепараторов и замкнутого цикла производства цемента, теоретически обоснованное и подтвержденное многолетней практикой «золотое» соотношение между потенциальными возможностями мельниц данного типа, расходом энергии и оптимальной тониной помола позволяют цементным заводам выпускать большие объемы рядового цемента при достаточно высоком уровне рентабельности.

Совершенно иная ситуация наблюдается при попытках провести активацию цемента с использованием однокамерных шаровых или вибрационных мельниц небольшой производительности. Данный класс помольного оборудования в целом характеризуется достаточно низким коэффициентом полезного действия, непосредственно на образование новых поверхностей затрачивается не более 8-10% от всей подводимой энергии.

ее осуществление перспективное направление было закрыто на десятки лет, даже сегодня «классическое» бетоноведение с большой настороженностью относится к вопросу увеличения активности цемента на местах его использования. Так много надежд было связано с «построечной» активацией цемента, что чувство разочарования от ее неудачного внедрения ощущается до сих пор.

Но неверной была вовсе не сама идея активации, а ее исполнение, аппаратное обеспечение и т.д. Результаты исследований высокоактивных цементов, производственная практика изготовления бетона с использованием быстротвердеющего цемента, наконец, сотни научных работ, авторами которых являются наиболее авторитетные представители отечественной науки, доказывают перспективность и даже насущную необходимость продолжения работ в данном направлении, естественно, с учетом прошлого опыта и новых знаний.

Так что же встало на пути перспективной технологии, какие проблемы не удалось решить инженерам и технологам, занятым в работах по активации цемента?

Проблема первая состоит в том, что однокамерные шаровые мельницы, исполь-

относительно малой прочностью на изгиб. Прочность цементного зерна при сжатии в 6-12 раз больше его же прочности при изгибе, растяжении, сдвиге. В шаровых мельницах зерна цементного порошка подвергаются преимущественно действию сжимающих сил с двух сторон, в результате воздействия сжимающих сил в зернах материала возникают напряжения, приводящие к разрыву с образованием более мелких частиц. Такой способ измельчения реализуется в шаровых мельницах различного способа побуждения мелющих тел. До определенной тонины помола данный способ вполне оправдан, так как площадь новообразованных поверхностей прямо пропорциональна затраченной работе. Но с увеличением удельной поверхности порошка расход энергии возрастает, а прирост удельной поверхности замедляется. После достижения определенной тонины помола способ измельчения цементного зерна методом сжатия-истирания уже не является оптимальным.

С увеличением требований к тонине помола цементного порошка существенное уменьшение затрат энергии могут дать лишь те способы, при которых материалы измельчались бы под влиянием прямых сдвигающих, разрывающих воздействий на них, а не в результате первоначально

Если способ истирающего измельчения по целому ряду причин не подходит для получения большей тонины помола цементного порошка, то нужно применить другой способ измельчения!

Удельная производительность (в кг/час) на 1кВт эффективной мощности многокамерных шаровых мельниц, эксплуатируемых на цементных заводах, существенно выше, нежели у помольного оборудования малой мощности.

Таким образом, основное несоответствие между поставленной задачей и средствами для ее решения становится очевидным. Высокопроизводительное помольное оборудование используется для получения больших объемов цемента средней активности, когда затраты энергии пропорциональны увеличению удельной поверхности порошка. В то же время домол цемента для повышения его активности с применением измельчительного оборудования, характеризующегося крайне низким коэффициентом полезного действия, предполагает увеличение удельной поверхности порошка сверх энергетического оптимума для данного способа измельчения.

Потенциальные возможности энергоэффективного измельчения цементного зерна методом истирания оказываются исчерпаны уже на рубеже удельной поверхности в 3000 см²/г. Получение цементного порошка большей дисперсности с использованием однокамерных шаровых мельниц открытого цикла в условиях действующих предприятий ЖБИ попросту экономически невыгодно, и бесплодные, хотя и многочисленные попытки внедрения данной технологии в производство бетона лишний раз подтверждают это заключение.

Именно из-за несоответствия между результатами активации с затратами на

зуемые в работах по активации цемента, по основным экономическим, эксплуатационным и техническим показателям проигрывают оборудованию аналогичного назначения, но большей мощности.

Для получения высокоактивного быстротвердеющего цемента необходимо, в том числе, увеличить тонину помола рядового цемента. Но используемые в работах по активации шаровые мельницы малой мощности серьезно проигрывали в части себестоимости помола измельчительному оборудованию, эксплуатируемому на цементных заводах. Попытки увеличить показатели удельной поверхности цементного порошка оборачиваются снижением и без того небольшой производительности маломощных мельниц-активаторов и вызывают катастрофический расход энергии на получение продукта заданной дисперсности. Казалось бы, разорвать замкнутый круг невозможно. С одной стороны, дисперсность продукта требуется большая, чем у рядового цемента, а с другой стороны мельницы-активаторы в принципе не могут соперничать с высокопроизводительным оборудованием цементных заводов в плане себестоимости помола. Но выход из создавшейся ситуации все же есть. Если способ истирающего измельчения, реализуемого шаровыми мельницами, по целому ряду причин не подходит для получения большей тонины помола цементного порошка, то нужно применить другой способ измельчения!

Сырьевые материалы, используемые при изготовлении цемента, характеризуются высокой прочностью на сжатие и

сжимающих сил. В струйных мельницах и дезинтеграторах цементные зерна измельчаются почти исключительно путем свободного удара о помольные органы и (или) взаимного соударения в воздушном потоке при их движении. Совокупность таких воздействий вызывает быстрое разрушение цементных зерен по местам структурных дефектов и позволяет получать продукт, характеризуемый оптимальным гранулометрическим составом и осколочной формой частиц.

Принимая во внимание, что наиболее перспективным направлением снижения материальных и энергетических затрат при активации цемента является понижение энергоемкости самого процесса измельчения, использование агрегатов свободного удара – дезинтеграторов и струйных мельниц может рассматриваться как практически безальтернативный способ повышения вяжущих свойств и снижения расхода цемента в производстве изделий из бетона. Применение помольного оборудования ударного действия позволяет получать вяжущие вещества и наполнители при минимальных затратах.

Проблема вторая заключается в самой необходимости более тонкого помола цементного порошка. Тонкий помол материала является наиболее энергозатратным, а значит, и дорогостоящим переделом в производстве цемента, до 70% затрат приходится именно на помол. В себестоимости активации помола также является основной статьей расходов.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦЕМЕНТОВ РАЗЛИЧНОГО СПОСОБА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ

Наименование материала	Удельная поверхность, см ² /г	Содержание, %, фракций, мкм								Предел прочности при сжатии, МПа, через 28 суток
		≤5	≤10	≤20	≤30	≤40	≤50	≤60	более 60	
Исходный цемент	2250	11,07	8,25	14,64	17,97	16,66	13,5	9,36	8,55	39,5
Активированный цемент, домолотый на шаровой мельнице	3200	15,32	7,11	12,54	20,51	19,62	15,03	6,52	3,35	50,9
Активированный цемент, домолотый на измельчителе-дизинтеграторе	2800	12,84	15,22	29,67	24,13	10,58	5,37	2,19	-	51,3

Но так ли необходимы высокие показатели удельной поверхности цемента? Имеются ли способы получения высокоактивного цемента без существенного увеличения тонины помола? Такие способы существуют, они хорошо известны и активно применяются уже не один десяток лет.

Выше мы отмечали, что, по данным исследований, повышение тонкости помола – это действенный способ увеличения прочности цемента и скорости его твердения. Но увеличение удельной поверхности цементного порошка, как и его активность, нельзя рассматривать в отрыве от гранулометрических показателей высокодисперсной системы, которой и является цемент.

Так как различные фракции цементного порошка по-разному влияют на прочность цементного камня и на скорость его твердения, целый ряд исследователей рекомендует характеризовать активность цемента не только по

зависит от типа помольного механизма. Готовый продукт, полученный с использованием шаровых мельниц, характеризуется широким зерновым составом, а его частицы имеют окатанную форму. Разнообразный зерновой состав представлен как очень тонкими частицами (размером менее 5 мкм), так и относительно крупными частицами (более 60 мкм), содержание которых, даже в высокомарочных цементах, достаточно высоко. В то же время для ударного измельчения с применением дезинтеграторов и струйных мельниц характерно получение материала узкой гранулометрии, когда зерновой состав цементного порошка близок к оптимальному.

Возможности гранулометрического «обогащения» цементного порошка наглядно демонстрирует представленная таблица. Повышение активности цемента после дезинтеграторного помола, в отличие от мате-

цементы, активность которых на 7.5-15 МПа выше активности цементов той же тонкости помола, но измельченных в шаровой мельнице.

Существующая зависимость формы цементного зерна от типа помольного агрегата позволяет сделать выводы о наиболее предпочтительном способе разрушения цементного зерна, обеспечивающем получение частиц осколочной формы.

Таким образом, ударное измельчение цементного порошка позволяет существенно повысить его физико-химическую активность наиболее рациональным способом, в большей мере за счет корректировки гранулометрического состава, изменения формы зерна.

Заключение

Сегодня, когда существующие модели помольного оборудования позволяют реа-

Ударное дезинтеграторное измельчение, оптимизация гранулометрического состава цементного порошка, позитивные изменения формы цементного зерна, являются инструментами экономически оправданной активации

удельной поверхности порошка, но и по зерновому составу. Многочисленные исследования, проводившиеся как в нашей стране, так и за рубежом, позволили установить зависимость между количеством зерен определенного размера, прочностью и скоростью твердения цемента. На основании работ А. Н. Иванова-Городова было установлено, что равномерное и быстрое твердение цемента достигается при следующих зерновых составах: зерен мельче 5 мкм – не более 20 %, зерен размерами 5-20 мкм – около 40-45 %, зерен размерами 20-40 мкм – 20-25 %, а зерен крупнее 40 мкм – 15-20 %. Правильно сформированный гранулометрический состав позволяет получать высокоактивный быстротвердеющий цемент при абсолютно рядовых показателях его удельной поверхности.

Изменение дисперсности цементного порошка при его помоле происходит на фоне изменения и его гранулометрического состава. Однако соотношение различных фракций, близкое к оптимальному, при помоле в шаровой мельнице достигается при получении относительно высоких показателей удельной поверхности, в то время как при использовании дезинтеграторов, струйных мельниц и других агрегатов ударного измельчения оптимизация гранулометрических показателей происходит без существенного изменения дисперсности продукта.

На основании многочисленных исследований было установлено, что гранулометрический состав продукта измельчения

материала, измельченного на шаровой мельнице, достигается при более низких показателях удельной поверхности. Таким образом, тонкий помол с получением цементного порошка высокой дисперсности как наиболее энергонапряженный процесс активации может быть успешно заменен корректировкой гранулометрического состава.

Еще одним действенным способом увеличения активности цемента без существенного изменения его дисперсности является изменение формы цементного зерна при его помоле. В зависимости от типа помольного механизма существенно изменяется форма цементного зерна. Так, форма частиц цемента осколочной «щебеночной» формы с острыми углами и сильно развитой конфигурацией взаимодействует с водой более интенсивно, в отличие от частиц цемента округленной, галькообразной формы.

При равных показателях удельной поверхности, равном содержании частиц цемента размерами 0-20 мкм, одинаковом химическом составе прочность цементного камня, состоящего из частиц осколочной формы, будет выше, нежели прочность цементного камня, состоящего из частиц округлой формы. Соответственно, и скорость твердения портландцемента с осколочной формой частиц выше, чем с округленной формой. Исследования Ю.И. Дешко, В.И. Акунова, В.Л. Панкратова и др. (НИИЦемент) показали, что при измельчении цементного клинкера в струйной мельнице получают

лизовать наиболее энергопродуктивные способы измельчения, идеи активации цемента на предприятиях ЖБИ получают второе рождение. Ударное дезинтеграторное измельчение, оптимизация гранулометрического состава цементного порошка, позитивные изменения формы цементного зерна являются инструментами экономически оправданной активации. Объединение результатов фундаментальных исследований 50-60 годов и современной концепции рационального использования энергоресурсов вполне возможно, если решить две основные проблемы, которые и явились препятствием к реализации технологии активации рядового цемента на местах его использования. ■

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ю.М. БУТТ «Быстротвердеющий портландцемент». Сборник трудов по химии и технологии силикатов. Москва. 1957. С. 199
2. А.В. ВОЛЖЕНСКИЙ «Минеральные вяжущие вещества». Учеб. для вузов. - 4-е изд. Стройиздат. 1986. С. 186-201.
3. И.А. ХИНТ «Основы производства силикатных изделий». Госстройиздат. 1962. С. 503.
4. А.В. ВОЛЖЕНСКИЙ, Л.Н. ПОПОВ «Смешанные портландцементы повторного помола и бетоны на их основе». Государственное издательство литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам. 1961. С. 107.