

# ВНЕДРЕНИЕ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ПРОИЗВОДСТВО БЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ С ЦЕЛЬЮ ЭКОНОМИИ ЭНЕРГИИ И ЦЕМЕНТА

В статье предложен системный анализ проблемы экономии энергии и цемента при производстве бетона с учетом технологических ограничений и возможностей отечественной стройиндустрии. Понятие энергии здесь включает в себя общие потраченные усилия – электричество, горючее, рабочую силу, работоспособность оборудования и использование материалов; даны практические рекомендации по оптимизации затрат цемента и энергии при производстве товарного и конструкционного бетона.

текст: Александр Черниговский  
Заслуженный машиностроитель РФ  
Воскресенский завод ЖБКиИ

«Экономика должна быть экономной»

Л.И.Брежнев

Несмотря на то, что в многочисленных научных публикациях приводятся рекомендации по экономии стройматериалов, в частности цемента, минимальный нормативный расход которого составляет 220 кг на 1 м<sup>3</sup> бетона, на предприятиях реально расходуется 350–550 кг этого материала. Даже лучшие отечественные заводы, работающие на импортном оборудовании, тратят при производстве рядовых бетонов в среднем на 30% цемента больше, чем аналогичные европейские. В чем же причины?

В данной статье автор предлагает системный анализ проблемы экономии цемента и прочих материальных, энергетических и трудовых затрат в производстве товарного и конструкционного бетона с учетом технологических ограничений и возможностей отечественной стройиндустрии. В качестве примера, в статье показан экономический эффект от использования высокоточных цифровых микроволновых датчиков влажности для выдерживания оптимального состава компонента бетонной смеси и получения бетона высокого качества и заданной прочности при производстве жестких и сверхжестких смесей.

## Общее состояние дел и возможности промышленности.

В современной экономической ситуации отечественный строительный комплекс ожидает затяжной период переосмысления – от коррекции долгосрочных инвестиций до полного пересмотра номенклатуры выпускаемой продукции. При этом на рынке строительных материалов выживут те производители, кто, помимо ведения грамотной маркетинговой политики, сможет повысить эффективность и конкурентоспособность своей продукции.

За последние 5-6 лет большинство предприятий стройиндустрии произвело полную или ча-

стичную модернизацию оборудования. Построено несколько крупных заводов по производству строительных материалов, товарного и конструкционного бетона. Однако резкое сокращение объемов финансирования промышленного и гражданского строительства в 2008–2009 гг. привело к острой конкуренции среди производителей стройматериалов, что, в свою очередь, повлекло снижение стоимости стройматериалов и сокращение объемов производства. При этом стоимость цемента, хоть и упала до среднеевропейского уровня, но в ближайшие 2–3 года останется по-прежнему высокой.

Сегодня на многих предприятиях бетонной промышленности проводятся работы по оптимизации производственных затрат, повышению производительности труда и качества продукции. Именно эти направления становятся наиболее важными для сохранения конкурентоспособности предприятия, поскольку в обозримом будущем трудно ожидать серьезных инвестиций в строительную промышленность. Актуально внедрение новых технологий в производство товарного и конструкционного бетона, экономия стройматериалов и, прежде всего, цемента как наиболее дорогостоящего из них.

Полный или частичный отказ от цемента, использование шлакощелочных, сульфатно-шлаковых, шлакоглиноземистых, силикальцитных, зольно-шлаковых, комбинированных гипсовых или песчаных (кремниевых) вяжущих, требует создания современных технологических линий и серьезных капиталовложений, поэтому в данной статье не рассматривается.

Исходя из вышесказанного, думается, будет полезно системно проанализировать вопросы экономии цемента и оптимизации технологического процесса приготовления бетона в их взаимной обусловленности. Особое внимание в статье уделено учету внедрения новых технологий производства литых и самоуплотняющихся бетонов (SCC), а также жестких и сверхжестких бетонных смесей, которые все активнее вытесняют обычные бетоны не только за рубежом, но и у нас в России.

## Основные технологические факторы, влияющие на расход цемента.

1. Цемент: тонкость помола, водопотребление, соответствие применяемой марке, повышение активности, набор прочности, уменьшение потерь при транспортировании, использование цемента с минеральными добавками.
2. Наполнители: выдерживание гранулометрического состава, оптимальная форма зерен, фракционирование заполнителей, доля мелкой фракции, ну и, конечно же, подготовка заполнителей.
3. Минеральные добавки: тонкость помола, реактивность, водопотребление, форма зерен.
4. Химические добавки: эффективность, совместимость, содержание щелочи и хлорида.
5. Наномодификаторы и вода затворения: совместимость, физическая активация воды.
6. Технологические параметры: точность дозирования компонент, способ перемешивания, транспортировка, укладка и уплотнение бетонной смеси и последующая обработка бетона.
7. Оптимизация состава с учетом технологических и нормативных ограничений.

Появление новых технологий производства литых и самоуплотняющихся бетонов, а также жестких и сверхжестких бетонных смесей и нового поколения высокоэффективных пластификаторов на основе эфиров поликарбоксилата и олигофосфонатов – помимо традиционных подходов ведущих к рациональному использованию цемента требуют использования современных подходов к расходованию цемента при производстве бетона.

С учетом сегодняшних реалий подробно остановимся только на факторах, не требующих серьезных капиталовложений. Рассмотрим последовательно влияние перечисленных факторов.

### 1. Повышение активности цемента.

В настоящее время мировая тенденция такова, что на смену традиционным чистым портландцементам приходят цементы с высоким содержанием (больше 35%) минеральных добавок. Таких как доменный шлак, микрокремнезем, летучая зола,

известняковая мука, природный и искусственный пуццолан. Целесообразность увеличения доли минеральных добавок в цементах не вызывает сомнений для цементных заводов, в то же время для потребителей цемента она не всегда однозначна.

Благодаря сепаратным технологиям измельчения отдельных компонентов и последующего гомогенного смешивания стало возможным целенаправленно регулировать гранулометрический состав цемента, получать цементы с оптимальной дисперсностью. В качестве примера можно привести цементы Nanodur CEM II/B-S 52,5 N немецкой компании Dyrckhoff AG, получаемого с использованием до 60% тонкомолотого кварцевого песка с добавлением синтезированного на наноуровне синтетического кремнезема без использования дорогого микрокремнезема /1/. Новый ГОСТ на цемент допускает ввод минеральных добавок с сохранением клинкерной части 35-40 % для цементов типа ЦЕМ III и ЦЕМ V. Будем ждать от наших цементников цементов такого же качества. А пока хорошо, если удастся работать с одним и тем же надежным поставщиком и цементом соответствующим Европейским стандартам. А получить сертификат на поставляемый цемент с фактическими характеристиками по активности, насыпной плотности, дисперсности и другими параметрами, а не разбросом, допускаемым ГОСТом – весьма затруднительно. Поэтому применять минеральные добавки, например доменные шлаки с оптимальной дисперсностью, имеющие функциональную зависимость от дисперсности цемента могут позволить себе только крупные предприятия, имеющие хорошо оснащенные лаборатории.

Эффективность цемента можно повысить (следовательно, снизить его расход), увеличив тонкость его помола. 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 кристаллов алита и белита, наличием тех или иных добавок, но и, в большей степени, тонкостью помола продукта, его гранулометрическим составом, а также формой частичек порошка.

На предприятиях сборного железобетона для

того, чтобы бетон как можно скорее достиг распалубочной прочности, часто идут на завышение марки бетона путем увеличения расхода цемента. Можно избежать этого, если использовать вяжущее более тонкого помола: на таком вяжущем твердение бетона в раннем возрасте происходит быстрее. Можно сэкономить цемент и другим путем: ввести в цемент песок, известняк, золу или какой-либо другой наполнитель и с ним осуществить помол цемента. Однако, как показывают исследования /2/, при этом марка вяжущего снижается, хотя и не совсем в прямой пропорции от количества введенного заполнителя. Для получения бетона марок до 200 и выше такое вяжущее вполне приемлемо. В зависимости от количества введенного заполнителя (30-50%) можно сэкономить до 30 % цемента.

Так, например, тульские производители дезинтеграторов заверяют /3/, что совместный помол товарного цемента с известняковым порошком и пластифицирующей добавкой, повышает прочность образцов в начальные сроки твердения, не менее чем на 46 %, а при замещении одной пятой части цемента микронаполняющей добавкой, прирост прочности в возрасте 3 суток составит более 90 %. Однако надо осторожно относиться к таким заявлениям.



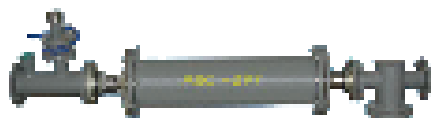
| Дезинтегратор ДЕЗИ-18

Можно поверить в эти цифры для долго хранящегося цемента, с тонкостью помола 2000–2500 см<sup>2</sup>/г и очень плохой гранулометрией цементных зерен, но для цементов с тонкостью помола 3500–4000 см<sup>2</sup>/г - сомнительно, особенно для цементов с минеральными добавками. Однако, для получения высокоактивного быстротвердеющего цемента необходимо увеличение тонкости помола с обычных 2000–3000 см<sup>2</sup>/г до 3500–4500 см<sup>2</sup>/г, в то же время увеличение удельной поверхности цементного порошка сверх 6000 см<sup>2</sup>/г нецелесообразно.

Измельчение цемента с добавками приобрело характер эпидемии /4/. Качество добавок не контролируется – золы нестабильны и содержат несгоревший уголь.

В США стандартом установлен предельный уровень содержания несгоревшего угля в золе для ее утилизации в бетон – 3.5%. При использовании золы вводят дополнительно органические добавки, уменьшающие захват воздуха в бетон угольными частицами. Очевидно, что у нас этого не делают. Высокое качество цемента подразумевает целый набор свойств, а не только 28 суточную прочность на сжатие кубиков. Действительно, тонкий помол увеличивает скорость гидратации и быстрый набор прочности, уменьшает долю непрореагировавшего клинкера в бетоне (в основном C2S). Но в то же время реология цемента сильно меняется и он может уже не иметь свойств, которые позволяют транспортировать его в силоса и далее подавать питателем в бетоносмеситель. Более того, быстрая гидратация может создать проблемы быстрого схватывания.

Для того чтобы обычные заводы смогли внедрить эти технологии, нужны готовые небольшие технологические линии, а не отдельные агрегаты. Некоторые ученые считают выгодным поставлять



| Аппарат вихревого слоя ABC- 297

на заводы цемента в виде клинкера. Помольные отделения обеспечивают наиболее экономичный расход вяжущих, позволяют в качестве минеральных добавок применять местное сырье, в том числе отходы, позволяют вести мокрый домол. Для организации помола могут быть использованы малогабаритные устройства, располагаемые в бетоносмесительных цехах между дозировочным и смесительным отделениями. В России имеются единичные экземпляры удачных установок, таких как электромагнитный классификатор (ЭМК), разработки В.В.Зырянова, (ABC) Аппарат Вихревого Слоя на постоянных магнитах или с использованием переменного электромагнитного поля для активации цемента и наполнителей, дезинтеграторы мокрого помола.

При применении ЭМК, понятие «плохая зола» утрачивает смысл, поскольку ЭМК классифицирует золу по размеру и массе частиц. То есть можно отдельно «вырезать» не сгоревший уголь, или разделить золу на пять фракций. Максимальный экономический эффект от внедрения механической активации в технологию производства бетонов, достигается только при правильном сочетании таких параметров обработки, как избирательность домола товарного цемента, оптимальной энергонапряженности процесса смешивания и доступности сырьевых компонентов. Процесс активации цемента это не только получение оптимальной гранулометрии, формы и поверхности цементного зерна, но и обеспечение его полной гидратации.

К сожалению, мне неизвестны организации, которые занимаются внедрением таких технологий, а для мобильных заводов, число которых за последние годы резко увеличилось, подходят только технологии использования активированного на цементных заводах цемента.

## 2. Качество наполнителей

Можно сократить расход цемента (и при этом повысить качество и долговечность конструкций), если делать бетон из чистых фракционированных наполнителей. Организация производства таких наполнителей потребует значительных капита-

ловложений, но для народного хозяйства это значительно выгоднее по сравнению с затратами на ремонты и замену железобетонных конструкций, часто выходящих из строя значительно раньше сроков, на которые рассчитана их эксплуатация. В зарубежной строительной практике ни одна фирма не производит бетон на заполнителях одной фракции 5 - 20 мм. Например, в Финляндии он готовится на двух - четырех фракциях чистого крупного заполнителя и двух фракциях мелкого.

У нас же это редкость. Вставить в технологическую цепочку рассев с классификацией можно (и нужно) это даст существенную прибавку по эффективности процесса изготовления изделий. Т.е. затраты на рассев с лихвой окупаются на итоге состава смеси и конечной прочности изделий. Это не помол или сушка - это всего лишь обвязка вокруг вибросита. Это самый малозатратный способ поднятия качества производства бетона и по оборудованию и по энергозатратам. Аналогично желательно иметь классификатор крупных фракций.



| Классификатор песка

Так, использование песчано-гравийных смесей без корректировки фракционного состава вызывает перерасход цемента до 100 кг/м<sup>3</sup>. Только при таком расходе цемента удаётся получить запроектированную марку бетона по прочности и обеспечить нужную пластичность бетонной смеси. В Москве на ЖБИ-17, ЖБИ-18 и на некоторых других

заводах имеется классификация крупного наполнителя по фракциям. Щебень у них идет четко по фракциям, все, что меньше 5 мм и больше 20 мм, в производство не поступает, что позволяет им делать высокомарочный бетон. Однако, на том же ЖБИ -17 не могут одновременно использовать 2 фракции песка, что затрудняет им получение хорошего гранулометрического состава бетонной смеси. Желательно, чтобы на всех заводах была классификация хотя бы щебня, потому что в нем, часто бывает слишком много пыли, много больше разрешенных 1 – 2 %. К сожалению, в настоящее время проблему чистоты и фракционирования заполнителей, по большей части, предлагают решать самим заводам, а не производителям сырья.

### 3. Использование минеральных добавок

Минеральные добавки становятся в последнее время почти обязательным компонентом бетона, обеспечивающим улучшение его технических свойств. Они вводятся в больших количествах (50-150 кг/м<sup>3</sup> и более) и в сравнении с другими видами добавок оказывают наиболее многоаспектное воздействие на структуру и свойства бетона. Влияние высокодисперсных добавок, наряду с другими аспектами получения высококачественных бетонов, рассмотрены во многих исследованиях. Но для обычных бетонов дополнительное измельчение минеральных добавок или какие-либо способы выделения из них тонкодисперсных частиц нежелательны, т.к. приводят к заметному их удорожанию. Тем более, что при обычной дисперсности они могут улучшать комплекс свойств бетона при одновременном экономическом эффекте за счет снижения не только расхода цемента, но и заполнителей. Кроме того, они могут изменять водопотребность бетонных смесей. В первом приближении целесообразность введения минеральных добавок в бетон можно объяснить, исходя из практики получения бетонов различной прочности на цементе одной марки. Это приводит к расходу цемента от 200 до 500 кг/м<sup>3</sup>. При низких расходах цемента в бетоне имеет место дефицит мелкодисперсных частиц, который и может быть

компенсирован введением минеральных добавок. При определении их количества можно исходить из того факта, что наилучшее использование цемента (оцениваемое расходом на единицу прочности бетона) достигается при его содержании 400 - 500 кг/м<sup>3</sup> бетона. Учитывая нежелательные последствия высокого расхода цемента (рост тепловыделения, усадки), за оптимум можно принять 400 кг/м<sup>3</sup>. Для бетонов с минеральными добавками суммарное содержание дисперсных частиц, обеспечивающее наилучшее использование цемента независимо от его расхода, также составило 400-480 кг/м<sup>3</sup>, что позволяет уже говорить об оптимальном содержании дисперсных частиц в бетоне /5/. Эффективные способы введения значительного количества минеральных добавок в бетонные смеси могут быть реализованы через технологию вяжущих низкой водопотребности (ВНВ), тонкомолотых многокомпонентных цементов (ТМЦ), интенсивной раздельной технологии (ИРТ). Если, например, при обычном способе введения золы-уноса в бетонные смеси достигается экономия клинкера до 20%, то введение ее с ТМЦ при изготовлении бетонов с суперпластификаторами позволяет сэкономить клинкер и соответственно увеличивать эффективность использования цементного клинкера в 1,5 раза /2/. Принимая во внимание, что эффект заполнения пустот, уплотнение структуры, как и эффект раздвижки мельчайших цементных зерен – являются чисто физическими факторами, которые не зависят от гидравлической активности наполнителя, происхождение ультрадисперсного материала не принципиально и определяется, прежде всего доступностью и стоимостью компонентов. При этом надо обязательно контролировать качество наполнителей.

Широкое внедрение мелкодисперсных наполнителей сдерживает их высокая отпыливаемость, особенно наполнителей с добавлением микрокремнезема. Применение микрокремнезема особенно эффективно для высокомарочных и жестких бетонов, в частности при вибропрессовании мелкоштучных изделий. В последнее время в качестве добавок-уплотнителей предлагаются более деше-

вые, хотя и несколько менее эффективные, чем микрокремнезем, тонкодисперсные добавки: метакаолин, зола рисовой соломки, специально переработанные отходы производства силикатного кирпича, газобетона и другие. Наилучшие результаты получаются, если минеральная добавка, например, микрокремнезем или смесь микрокремнезема с золой, смешивается с суперпластификатором заранее и применяется в виде суспензии, что более технологично. Такие смеси получили название органо-минеральных добавок и все шире используются при производстве бетона. Вопрос только в себестоимости такой продукции и возможностей производства использовать такие технологии. В качестве минеральной добавки и вяжущего вещества для бетона наиболее эффективны доменные гранулированные шлаки, обладающие способностью к самостоятельному гидратационному твердению. Как показано в /6/ за счет использования грубодисперсного доменного гранулированного шлака с оптимальной дисперсностью можно снизить расход портландцемента до 40% с одновременным повышением прочности на 8%, а при использовании тонкомолотого (420-470 кв.м / кг) шлака экономится до 60-70% цемента с одновременным повышением прочности бетона до 50%. Но, как уже отмечалось ранее применять доменные шлаки с оптимальной дисперсностью, имеющие функциональную зависимость от дисперсности цемента могут позволить себе только крупные предприятия, имеющие хорошо оснащенные лаборатории.

### 4. Химические добавки.

Современная технология бетона предлагает широкое использование разнообразных добавок для направленного изменения его свойств и экономии основных ресурсов.

Наибольший интерес вызвало появление с начала века на отечественном рынке высокоэффективных пластификаторов на основе эфиров поликарбоксилата (РСЕ), которые благодаря отличным свойствам уменьшения расхода воды позволяют улучшить такие характеристики бетона как распыл конуса, увеличение времени удобоукладываемости

при раннем наборе прочности, в особенности, в бетонах с низким водоцементным отношением. Поликарбоксилаты наряду с эффектами сульфатов нафталина и меламины, обладают дополнительным преимуществом: структуры макромолекул полимера, которые скапливаются на поверхности частицы - фактически берут на себя функции распорок. В данном случае речь идет о пространственной (стерической) стабилизации. В настоящее время на Российском рынке в основном преобладают добавки полимеров поликарбоксилата таких фирм, как BASF, Sika, российско – немецкая MC-Bauchemie и некоторые другие. Кроме того, ряд Российских фирм наладило производство добавок на основе сухого PCE, в основном китайского производства, качество и стабильность которых оставляет желать лучшего. Ограничивает их применение высокая цена, во многих случаях выгоднее применять модификаторы серии МБ. Кроме того, цементы с низким содержанием сульфатов менее чувствительны к действию поликарбоксилатов.

В последние годы на рынке появилась интересная добавка Ярославских ученых ПКФ-70 - поликарбоксилат, модифицированный олигофосфонатом.

Олигофосфонат - это водный раствор соли олигофосфоновой кислоты с большим количеством пигмент-афинных групп действие, которого основано на дефлокуляция пигментов (пептизации цемента) методом электростатической стабилизации. На олигофосфонатах удается создать добавки, приводящие к увеличению площади поверхности цемента, за счет его химического диспергирования, без водоредуцирующего эффекта. Можно получить увеличение прочности до 40% - при том же расходе воды. Основное действие фосфоната заключается в комплексообразовании с кальцием. Благодаря чему изменяется «активность» цемента, находящегося в растворе с фосфонатом. Из-за улучшения структуры цементной матрицы отрицательное влияние излишка воды ослабляется. В отличие от поликарбоксилатов добавка позволяет получить экономию цемента на полусухих смесях и рядовых бетонах.

Химических добавок достаточно много. И прежде чем доверять менеджерам малоизвестных

добавок о экономии цемента на 40-60% и более, чтобы избежать негативных явлений, все добавки надо внедрять только после проведения лабораторных исследований и целой серии промышленных пробных испытаний.

### 5. Наномодификаторы и вода затворения

Конец XX столетия ознаменовался появлением в области науки и техники таких понятий, как наноматериалы, наночастицы, наноструктуры и т.п., что предопределило направление дальнейшего развития материаловедения и технологий во всех отраслях, в том числе в строительстве

Рассматривая бетон в качестве композита, сформированного из крупного и мелкого заполнителя, цементного камня, воды и воздушных пор, можно сформулировать основную задачу наномодифицирования, как управление процессом формирования структуры материала снизу вверх (от наноуровня к макроструктуре бетонной смеси) и кинетикой всего спектра химических реакций, сопровождающих процесс твердения. Так, используя нанодисперсный модификатор, причем в концентрациях близких к  $10^{-7}$  (что обусловлено не только экономией, но и агрегативной устойчивостью фуллероидов), возможно управлять кинетикой взаимодействия цемента с водой затворения и добиваться максимальных положительных эффектов на стадиях:

- растворения цементных зерен, получая заданную реологию;
- коллоидации, обеспечивая требуемую сохраняемость подвижности во времени;
- кристаллизации, усиливая гетерофазные границы контактных зон и, таким образом, повышая прочность, водонепроницаемость и морозостойкость бетона /7/.

Так с 2005 г. на кафедре «Технология строительных изделий и конструкций» СПбГАСУ, в содружестве со специалистами других вузов, научных и производственных организаций, проводятся исследования по модифицированию воды затворения углеродными фуллероидными наночастицами.

Если исследования по активацией воды на-

ночастицами проводятся сравнительно недавно, то попытки физической активации воды различными методами: электромагнитная и магнитная активация, термическая, акустическая, разрядно-импульсная и другие проводятся уже достаточно давно. Общими недостатками всех физических методов активации воды являются: трудность определения количественных параметров, характеризующих степень активации водной среды в производственных условиях; необходимость дооснащения технологических линий специальным оборудованием для активации воды; потребность в переработке технологических регламентов и т.п.

Посредством кондиционирования воды затворения, путем воздействия электромагнитных полей часто удается уменьшить показатели вязкости и поверхностного натяжения воды. И хотя уже во многих странах применяются промышленные установки кондиционирования воды, по мнению многих специалистов, успешное внедрение таких систем происходит только при присутствии в воде достаточного количества ионов металлов. Более интересны подходы фирмы BASF по кондиционированию поликарбоксилатов, что по их заверению резко увеличивает скорость химических реакции и повышает прочность бетона на 10%. Правда не очень понятна экономическая составляющая этой технологии.

ОАО «Объединение 45», ООО Бетон и другие крупные предприятия С-Петербурга уже выпускают бетон с наномодификаторами. «При применении наномодифицированных добавок повышается прочность бетона или существенно сокращается расход цемента при сохранении заданной прочности. За счет этого себестоимость бетона снижается на 10-30%», - утверждает Юрий Пухаренко, заведующий кафедрой технологии строительных изделий и конструкций СПб государственного архитектурно-строительного университета.

### 6. Технологические параметры

Добиться высокого качества при производстве современных литых бетонов, жестких смесей, конструктивных бетонов и т.д. на отечественном

сырье (немытый песок, плохо сеяный щебень и т.п.) можно только при наличии автоматизированного бетоносмесительного узла, оптимизированного под такую задачу и автоматизации технологических процессов виброформования и термообработки железобетонных изделий. Проблемы, связанные с автоматизацией БСУ подробно рассмотрены мною в обзоре /8/. Остановлюсь только на наиболее важных аспектах связанных с экономией цемента.

Производство бетона начинают с выполнения подборов номинальных составов в лаборатории. Рабочие составы корректируют непосредственно на заводе в зависимости от влажности инертных, для этого необходим периодический лабораторный анализ влажности или датчик влажности.

В действительности все несколько иначе. На большинстве заводов применяется упрощенная коррекция «по подвижности» - водосодержание бетонной смеси изменяют в зависимости от подвижности смеси на выходе. Из практики - контроль подвижности ведется (если ведется), в основном, визуальный, конус забивать ленятся, да и сам конус не всегда есть в наличии, частенько забывают корректировать выход при изменении влажности. А с эфирами поликарбоксилатов «визуально» работать не получится, смесь более вязкая, для достижения той же осадки конуса нужно большее время - конус «садится» не сразу, визуально такая смесь выглядит менее подвижной - а при измерении может оказаться вообще литой. Вязкость смеси в зависимости от количества добавки и температуры при прочих равных условиях (один и тот же состав, подвижность) может различаться весьма сильно. При использовании поликарбоксилатов очень важно обеспечить последовательное добавление воды и пластификатора, чем достигается высокая степень удобоукладываемости. При одновременном добавлении воды и пластификатора удобоукладываемость бетонной смеси снижается, что характерно для большинства добавок. Можно дополнительно повысить эффективность применения добавок, если обеспечить их мелкодисперсный распыл. К сожалению, немногие заводы могут использовать такой технологический прием.

Дозирование заполнителей обычно проводится без учета их влажности, даже для новых заводов большинство фирм предлагает датчики влажности, как опцию. Например, при влажности песка 10% вместо 1000кг фактически будет отвешено 900кг песка и на 100кг больше воды. Многие небольшие фирмы даже забывают о такой мелочи (подумаешь погрешность по песку 10%), а ведь это ведет к существенному перерасходу цемента, не говоря уже о качестве бетона и подвижности смеси.

Другим немаловажным фактором, определяющим качество приготовления бетонной смеси, особенно для самоуплотняющихся (СУБ), жестких и сверхжестких смесей, является однородность перемешивания воды и обеспечение постоянного и точного водоцементного отношения (в/ц). Сразу следует сказать, что понимание этого вопроса у современных бетонщиков, далеко от идеального. Дело в том, что при увеличении влажности в подвижных бетонах растет их подвижность, а, следовательно, и легкость перемешивания. Действительно глуповато бы выглядел вопрос: «в вашем товарном бетоне вода хорошо перемешана?» совсем другое дело СУБ, жесткая, а тем более сверхжесткая смесь. Неравномерное распределение воды в смеси здесь очень даже распространенное явление. Так как в жестких смесях (в/ц ниже 0,4) содержание воды недостаточно для обеспечения полноценной гидратации цемента в результате усадки уже в первые дни после бетонирования могут возникнуть сильные напряжения на растяжение, что ведет к трещинообразованию. По существу качество перемешивания воды в сверхжесткой смеси следует измерять, так же как и качество, промесса любого другого компонента. В СУБ избыток воды приводит к расслаиванию смеси и снижению прочности бетона, недостаток воды отрицательно сказывается на подвижности. Как утверждают авторы статьи /9/ уровень точности 0.2% от суммарной влажности гарантирует производство кондиционной смеси СУБ. Помимо качества конструкционного бетона неплохо немножко взглянуть на экономические аспекты.

**Возьмем в качестве примера состав для приготовления 1 куба пескобетона.**

1. Цемент 495 кг, влажность расчетная 0%;  
влажность фактическая 0%;  
2. Песок 1530 кг, влажность расчетная 2%;  
влажность фактическая 5%;  
3. Вода расчетная 170 л;  
Расчетное  $w/c = (170) \text{ кг} / 500 = 0,34$ ,  
плотность 2,2тн/куб.м.

**Фактически с учетом влажности песка мы получаем следующий состав:**

1. Цемент 495 кг;  
2. Песок 1454 кг;  
3. Вода (170+46) л = 216 л.  
 $w/c = 216/500 = 0,43$ .

Теперь, чтобы выдержать заданную прочность (при  $w/c$  соотношении равном 0,43 прочность упадет более чем на 30% по сравнению с расчетным  $w/c = 0,34$ ) оператору, чтобы получить  $w/c = 0,34$  потребуется, добавить (46 кг/0,34) 135кг цемента. Если добавить меньше – потеряет в прочности. Уменьшить воду на 46 литров сразу решится не каждый оператор.

Даже минимальная ошибка в дозировании воды в 10л - ведет к потере 30кг цемента, если сохранять заданную прочность ( $w/c$ ). Хотя погрешность в 1% составляет 15л воды и перерасход 44кг цемента соответственно. Если же  $w/c$  еще меньше, например 0,26, то вы получите, для 10л – 38кг цемента на 1 куб. Сколько получится за год – вы легко можете посчитать сами. Хотя 10л составляет погрешность всего 0,6%. А погрешность в 1% влажности проконтролировать без датчиков невозможно, даже если Вы берете пробы через, каждые 2 часа. Хотелось бы увидеть, на каком заводе делают это - хотя бы с влажностью песка, не говоря уже о крупном заполнителе. Поэтому перерасход цемента без использования датчиков влажности по 30-40кг на 1куб бетонной смеси в России в порядке вещей, особенно осенью и весной.

Те кто умеет считать деньги – ставят датчики влажности. Плохой датчик естественно лучше не ставить. Поэтому очень важно использовать наиболее точные цифровые датчики влажности.

Из доступных на Российском рынке – наименьшую погрешность (порядка 0,1%) имеют цифровые датчики английской фирмы Hydronix.



| Цифровые датчики фирмы Hydronix HM - 06 и HP-02 этой же фирмы, измеряющие влажность сыпучих материалов при установке на конвейере.

Для производства жесткой бетонной смеси необходимо круговое впрыскивание воды в смеситель и автоматическая коррекция рецепта при изменении влажности песка и щебня с контролем в реальном времени температуры и влажности смеси. Это не предусмотрено в наиболее распространенных в России бетоносмесителях типа СБ-138. Поэтому их приходится дорабатывать перед установкой в бетоносмесительный узел, что умеют делать всего несколько фирм. Вызывает удивление позиция заводов, которые более 30 лет выпускают бетоносмесители устаревшей конструкции и ничего не предпринимают для их усовершенствования. Установка центробежной форсунки в смесителе СБ-138Б позволяет осуществлять последовательное добавление воды и пластификатора.



| Центробежная форсунка

Если для производства жестких смесей еще можно использовать доработанные бетоносмесители СБ-138 или аналогичные, то как показали исследования проведенные профессором Университета Карлсруэ Харольдом Бейтцелем /10/, что для производства СУБ необходимо, чтобы смесители относились к категории «высокопроизводительное оборудование», в соответствии со стандартом RILEM TC 150-ECM, а также отвечали всем требованиям норм DIN 459. Согласно им однородность бетонной смеси измеряется вариациями в любых компонентах бетона или макроскопическими свойствами бетона. К этим параметрам относятся содержания воздуха, воды, и крупного наполнителя в макрообъемах смеси, распределение воздушных пор и наличие агломератов цемента или песка. В таких смесителях обеспечивается максимальное быстродействие при высокой однородности смеси.



| Установка HM-VI в днище СБ-138.

Кроме того, для производства СУБ, жестких и сверхжестких смесей, считается обязательным контроль за готовностью (гомогенностью) смеси по высокоточному СВЧ датчику, особенно для интенсивных смесителей. Так как при слишком высокой интенсивности перемешивания температура и вязкость смеси могут значительно увеличиваться, что ведет к образованию агломератов и повышенному воздухоовлечению. Для каждого интенсивного смесителя имеется оптимальное время перемешивания, которое зависит от многих факторов и поэтому желательно контролировать по датчику готовность смеси. При выборе смесителя для про-

изводства СУБ (одновальных, двухвальных или планетарных противоточных) основным фактором, кроме соответствия этим требованиям являются технико-экономические показатели. К сожалению, во многих публикациях в нашей печати ошибочно утверждалось, что для жестких смесей годятся только 2-х вальные смесители.

Будущие разработки смесителей для производства СУБ должны быть направлены на решение специфических проблем, связанных с самоуплотняющимся бетоном. Сегодня смесители работают только с одной скоростью вращения. С точки зрения реологии бетоносмеситель может измерять явную вязкость (постоянная скорость вращения - скорость сдвига, сопротивление – сила сдвига). Если бы бетоносмеситель работал на двух или трех скоростях, он мог бы регулировать пластичность и пластичную вязкость. В результате точность расчета удобоукладываемости была бы значительно выше /11/.

Для производства высокопрочного бетона и СУБ (желательно и для жестких смесей) в современных отечественных БСУ обязательно должны применяться алгоритмы обратной связи по влажности и температуре смеси, работающие в реальном времени с использованием оптимальных схем введения цемента, заполнителей, химических добавок и с распылом воды и добавок в смесителе. Соответствие этим критериям даёт возможность конкурировать с ведущими западными фирмами. В конечном итоге, способность вести равную конкурентную борьбу с лидерами мирового рынка уже является главным показателем уровня фирмы и качества производимой продукции.

## 7. Оптимизация составов бетонных смесей

Основная задача при оптимизации состава бетона – найти такое соотношение между его компонентами, которое обеспечит заданные свойства смеси и бетона при минимуме расхода цемента (в самой общей постановке задача сводится к обеспечению наименьшей стоимости 1 м<sup>3</sup> бетона или всего изделия). Для предприятий по производству бетонных изделий и товарной бетонной смеси является актуальной задача стабилизации качества бетона,

уменьшения коэффициента вариации, снижения стоимости бетонной смеси при обеспечении проектных требований к бетону с достаточно высоким уровнем надежности. Разработано много способов и методик по определению и оптимизации состава бетонов, однако, физико-математическое обоснование и экономичность получаемых составов существенно отличаются. Для обычных бетонов был разработан ряд методов проектирования состава и имеются официальные руководства, облегчающие решение этой задачи. Предложено несколько методик проектирования СУБ, однако для жестких и сверхжестких смесей дело обстоит хуже. Рецептуры бетона подбираются в зависимости от имеющегося оборудования (экструдеры, камнеформовочные машины и т.п.) на отдельных заводах и требуемых свойств продукции. Регулирующих предписаний или вариантов оптимизации нет до сих пор.

Современный жесткий бетон с учетом применения различных добавок и эффективных наполнителей превратился в пятикомпонентную систему. Благодаря этому появились новые возможности по оптимизации его состава. Проблему можно рассматривать в двух частях: оптимизация состава заполнителей с целью уменьшения количества пустот, и оптимизация состава цементного теста. Из наиболее известных отечественных подходов можно отметить предложенную Л.И.Дворкиным и др. /12/ методику многопараметрической оптимизации состава бетонов с использованием многофакторных методов планирования экспериментов и линейной оптимизации. Для решения указанной задачи ими была разработана компьютерная система управления составами бетонной смеси (КСУБС). В состав системы входит проектирование базовых составов, статистический контроль качества бетона с построением технологической карты и корректирование составов бетона при изменении характеристик исходных материалов, существенном увеличении коэффициента вариации при выходе прочности бетона за предупредительные границы, а также недопустимых колебаниях подвижности смеси. Решение о корректировании составов принимается после общего технологического анализа возможных отклонений параметров производственного процесса от установленных регламентом, состоянии оборудования и др.

В тоже время за рубежом разработано несколько подобных программ уже с учетом применения гиперпластификаторов и нелинейного моделирования. Основное отличие этих подходов даже не в методе оптимизации, а в использовании непрерывных кривых рассева мелких фракций и получения рецептов с использованием значительно меньшего количества цемента. Так, например, при использовании финской программы /13/, использующей методы нелинейной оптимизации и планирования на основе нейронных сетей, для пустотных плит перекрытия, при расходе цемента (СЕМ I 32,5 R) 250кг/м<sup>3</sup> прочность на 1 день составила 35 МПа, а на 28 суток 65 МПа. Некоторые практические рекомендации без использования математических моделей, таких как экспериментальное получение, оптимальной кривой рассева мелкой фракции можно найти в /14/.

# Hydronix

Основоположник стандарта измерения влажности



## Hydro-Probe II

Датчик для измерения влажности сыпучих материалов в бункерах и на ленточных конвейерах



## Hydro-Mix VII

Датчик, для измерения влажности в неподвижных барабанных и двухвальных смесителях монтируемый заподлицо в днище или боковую стенку.



## Hydro-Probe Orbiter

для смесителей с вращающимся барабаном и планетарных смесителей



## Hydro-Control V

система для управления влажностью в смесителях

ООО ЖБКии Сервис

тел. +7(496 44) 84 975

факс. +7(496 44) 30 684

Современные зарубежные автоматизированные системы включают программы многопараметрического проектирования составов бетона, контроль их качества и коррекцию в реальном времени состава смеси при изменении характеристик исходных материалов (активности цемента, гранулометрического состава и влажности заполнителей и бетонной смеси). В странах СНГ использование таких подходов носит пока единичный характер, а об использовании аппарата адаптивной идентификации моделей в условиях нестационарных производственных процессов говорить пока не приходится.

## 8. Перспективы

Реализация рассмотренных здесь предложений по экономии цемента и энергии во взаимосвязи с многопараметрической оптимизацией составов бетонов помогут нам конкурировать с ведущими зарубежными фирмами. Так, что же реально можно сделать, чтобы получать качественный бетон и экономить цемент?

1. Работать с одним заводом, цемент которого соответствует европейским стандартам, так как применяемые минеральные наполнители и химические добавки чувствительны к составу цемента.
2. По возможности использовать чистые и фракционированные заполнители. Постараться хотя бы установить классификатор на песок и над бункерами заполнителей.
3. Провести оптимизацию основных рецептов производимых бетонов, с учетом наличия, однородности и стоимости сырья и технологических ограничений. Для этого обратиться к ведущим отечественным НИИ или зарубежным фирмам, предлагающим в России свои услуги. Как показывает практика сделать это силами своих заводских лабораторий, могут только отдельные предприятия, которые способны внедрить у себя программы автоматического многопараметрического проектирования составов бетона, контроль их качества и коррекцию в реальном времени состава смеси при

изменении характеристик исходных материалов.

4. Произвести автоматизацию БСУ, которая будет гарантировать Вам точность дозирования всех компонент не хуже требований ГОСТ с установкой датчиков влажности не только в инертные, но и в смеситель, особенно тем, кто использует жесткие и сверхжесткие смеси.

5. Доработать отечественные или приобрести импортные смесители, отвечающие современным требованиям.

6. Внедрять технологические линии позволяющие использовать мелкодисперсные минеральные наполнители и органо-минеральные добавки на основе микрокремнезема.

7. Соблюдать технологическую дисциплину (наверное, это самое трудно выполнимое в России условие).

*По мнению автора, будущее за высокотехнологичными бетонами, с малым расходом цемента, произведенными из литых и самоуплотняющихся, а также жестких и сверхжестких бетонных смесей. Автор будет благодарен читателям за любые критические замечания к данной статье.*

**Список литературы на странице 78.**



Воскресенский завод  
железобетонных конструкций и изделий  
140200, Московская область,  
г. Воскресенск, ул. Гаражная, стр. 5  
www.gbki.ru

## Комментарии

**Д.т.н., проф. НИИЖБ им. Гвоздева А.А.  
Лариса Алексеевна Малинина, 01.04.2010:**

*К числу новых технологий можно отнести наномодификаторы. Информация относительно минеральных добавок, их видов и количества при введении в цемент содержится в действующих ГОСТах 10178-85 и 31108-83, а расходы цемента для бетонов разных классов и удобоукладываемости в СНиП 82-02-95.*

*К сожалению, использование различных минеральных добавок, предусмотренных действующими стандартами не реализуются. В настоящее время резко сокращена номенклатура выпускаемых цемента и основным видом цемента являются портландцементы ПЦ-ДО (бездобавочные) ПЦ-Д20 (марок 100-500). Практически не выпускается шлакопортландцемент, хотя в СССР выпуск его составлял порядка одной трети от общего объема, а суммарный ввод минеральных добавок составлял более 20%. Поэтому вопрос позиций ведения добавок в цементы и бетоны, который предлагается в статье полезен.*

