

СОВРЕМЕННЫЙ БЕТОН И ЕГО ТЕХНОЛОГИИ



Сведения об авторе

Ушеров-Маршак Александр Владимирович,

доктор технических наук, профессор Харьковского государственного технического университета строительства и архитектуры. Лауреат премии имени акад. Н. С. Курнакова АН СССР за выдающиеся достижения в области физико-химического анализа неорганических материалов (1986 г.) и Государственной премии Украины в области науки и техники (1993 г.), заслуженный деятель науки и техники Украины (1994 г.), заслуженный инженер России (2007 г.). Автор более 300 публикаций, в т. ч. монографий «Тепловыделение при твердении вяжущих веществ и бетонов» (1984 г.), «Калориметрия цемента и бетона» (2002 г.), «Шлакопортландцемент и бетон» (2004 г.); научный редактор ряда книг, в т. ч. «Химические и минеральные добавки в бетон» (2005 г.), «Товарный бетон. Новые возможности в строительных технологиях» (2008 г.) и др., а также автор нескольких сборников стихотворений.

Ретроспективно рассмотрена ситуация в развитии бетоноведения и технология бетона к началу III тысячелетия. Отмечены значительные достижения в создании материалов нового поколения, с высокими показателями технологичности, прочности, плотности и др. Анализируется роль компонентов, особенно химических, минеральных и комплексных добавок в достижении этих свойств. В связи с возросшей многокомпонентностью акцентируется внимание на проблеме совместимости добавок с цементами. Констатируется рост наукоемкости бетоноведения, обеспечившего возможности коренных изменений в технологиях сборного и монолитного железобетона. Приведены примеры реализации современных технологий ЖБИ и монолитных конструкций в России и Украине. Обсуждаются некоторые аспекты адаптации современного бетона и его технологии к конкретным условиям различных регионов стран СНГ.

Бетон традиционный и нового поколения. Это выражение четко разграничивает ситуацию в науке о бетоне и практике его технологий, сложившуюся к III тысячелетию /1-3/. Реалиями строительной сферы стали здания высотой под 1 км, морские нефтяные платформы, многокилометровые мосты и тоннели из бетона с прочностью, приближающейся к прочности металла и практически неограниченной долговечностью. Бетон, история которого насчитывает почти 6000 лет, окончательно закрепил-

ся в качестве основного строительного материала человечества.

Весьма показательна в этом плане, приводимая в различных источниках и вариантах, ретроспективная схема развития бетона (рис. 1). Отчетливо просматривается тенденция увеличения прочности, снижения значений водоцементного отношения и др. за счет применения высокоэффективных химических и минеральных добавок, фибры. Адекватны значительные системные эффекты в регулировании составов, структуры и свойств бетонной смеси и бетона.

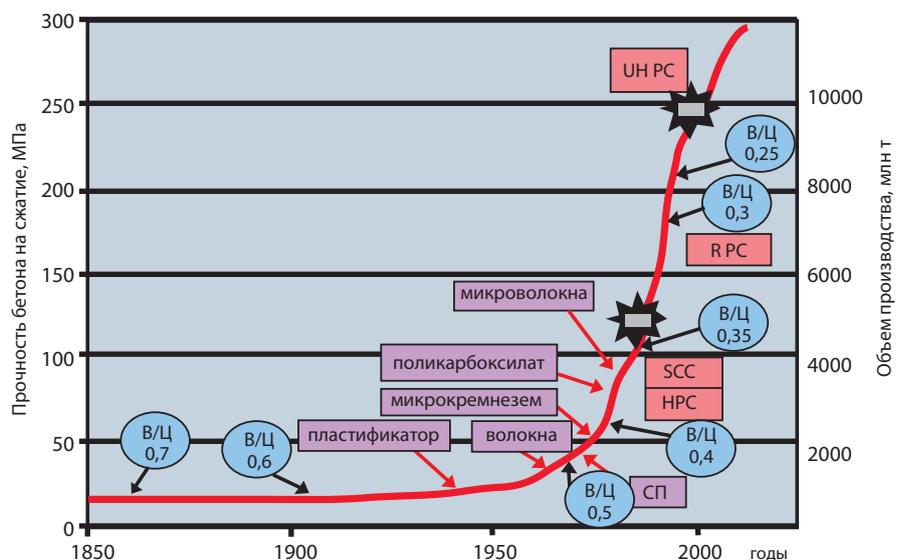


Рис. 1. Ретроспектива развития бетона

Высокие достижения, в свою очередь, революционизируют строительные технологии возведения зданий и сооружений любой степени сложности и архитектурно-художественной выразительности из монолитных и сборных железобетонных конструкций.

Ошибочно, вместе с тем, думать об однозначном решении проблем технологии бетона на многие годы вперед. Несмотря на рост наукоёмкости бетоноведения, предстоит рассмотреть и решить много-аспектные задачи общего и региональных планов, в т. ч. адаптации специфических, местных компонентов к новым технологическим возможностям. Образно выражение корифея науки о бетоне сэра В. Невилля: «Хороший и плохой бетон могут быть получены из одних и тех же компонентов»/1/. В общем, процесс освоения бетонов нового поколения (БНП) удачно стартовал, хотя и традиционные материалы пока никто не отвергал.

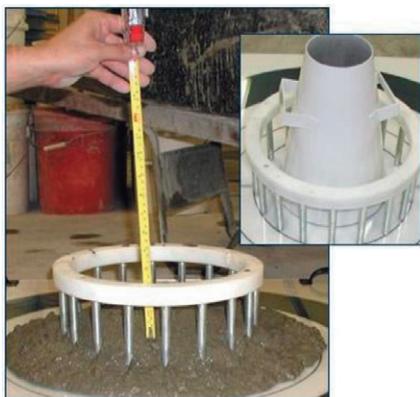


Рис. 2. Испытание бетонной смеси

Бетоны нового поколения — это высокотехнологичные бетонные смеси и бетоны с добавками, приобретающие и сохраняющие требуемые свойства при твердении и службе в любых эксплуатационных условиях. Вчера ещё новые, пришедшие из-за рубежа, термины восприняты сегодня наукой и производством:

- high performance concrete (HPC) — высокофункциональный бетон (ВФБ);
- self-compacting concrete (SCC) — самоуплотняющийся бетон (СУБ);
- reactive powder concrete (RPC) — реакционно-порошковый бетон (РПБ);
- macrodefect free concrete (MDFC) — бездефектный бетон (БДБ) и др.

Наглядный пример воистину революционных разработок — самоуплотняющийся бетон предложен в конце XX века японскими технологами. Сам термин прост до гениальности. Он означает способность бетонных смесей с низким В/Т к самоуплотнению при укладке без приложения механических (вибрационных) воздействий за счет гравитационных сил с одновременным вытеснением вовлеченного воздуха. Применение

СУБ органично решает задачи достижения высоких показателей технологичности, прочности, плотности и качества бетона, снижения энерго- и трудозатрат. Бетонная смесь не просто «самоуплотняется», но за счет уникальных реологических свойств преодолевает препятствия при укладке в виде арматурных элементов. Кстати, эти особенности обусловили появление новых методов испытаний взамен стандартного конуса Абрамса — основного прибора 150-летней давности. На смену пришли разного рода воронки, блокировочные кольца, V- и L-образные приборы для оценки свойств самоуплотняющейся бетонной смеси, в т. ч. и преодоления препятствий.

Другая разновидность БНП французского происхождения не без основания названа реакционно-порошковым бетоном. Здесь нет крупного заполнителя, а значит устранена опасность разрушения по зоне контакта «заполнитель цементный камень». Эффективными в технологии РПБ оказались пресушающие усилия в комбинации с повышенными до 100...200°C температурами. Бетоны в изделиях типа «мостовых досок» достигают прочности до 200 МПа и выше!

Главное, что, несмотря на кажущийся начальный рост стоимости компонентов, в т. ч. добавок, производство и применение БНП оправдано с любых позиций для инвесторов, производителей и потребителей (строителей).

Принципиально важна корректная трактовка новых терминов и понятий. Так, например, высокофункциональный бетон в странах СНГ называют по-разному: высококачественным, высокотехнологичным и даже высокодолговечным. Но в английском варианте названия нет слов — качество, технология, долговечность. И, что немаловажно, любые, даже низкопрочные, бетоны не могут не быть высокого, нормального качества. Создатели этого вида БНП /3/ подразумевали высокую функциональность и универсальность свойств бетонной смеси и бетона, недостижимых ранее при использовании традиционных подходов к выбору компонентов, проектированию составов, методов смешения, формования и твердения.

Понятия «функция» и «функциональность» обычно относят к прямому назначению или роли компонентов, допустим, добавок в бетоны. Технологически оправдано — ускоритель, замедлитель, порообразователь

и т. п. Укоренилось понятие «полифункциональные» добавки, часто заменяющее «комплексные» добавки. Но «монофункциональных» добавок нет! Любые из них, определяя основную технологический эффект, вызывают дополнительные, побочные, одновременно влияя на интенсивность твердения, структуру и свойства бетона.

С физико-химических позиций, понятие «функция» следует относить к взаимозменяющимся свойствам и явлениям в ходе гидратационного взаимодействия. Яркий пример — суперпластификаторы, которые вследствие механизмов действия и состава цемента замедляют начальную гидратацию, ускоряя последующие стадии за счет снижения В/Ц. Изменение функциональности во времени нельзя не учитывать в технологии бетона еще на стадии выбора компонентов. Функциональность присуща даже воде затворения. Ведь помимо известных функций гидратационного реагента и реологического компонента, вода — активный растворитель химических добавок и активный участник поверхностных явлений типа адсорбции, смачивания и пр.

Многокомпонентность — суть БНП. Многокомпонентны цемента, содержание в которых разнообразных минеральных дисперсных компонентов (МДК), не считая клинкера, может достигать 60–80%. 2-3-фракционны мелкий и крупный заполнители, комплексны химические и минеральные добавки, называемые даже мультикомпонентными; комбинации полимерной и стальной фибры — прямые свидетельства растущей многокомпонентности бетонов.

Данные рис. 3 иллюстрируют это положение/4/. Нельзя не заметить на диаграмме

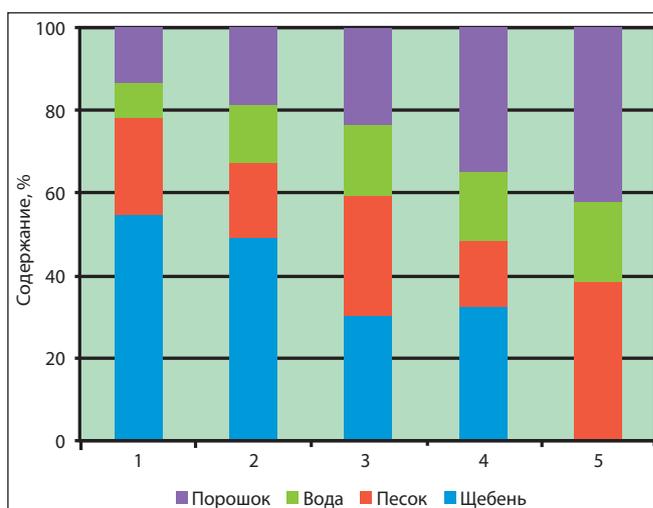


Рис. 3. Объемы компонентов в БНП
 1 — традиционный;
 2 — высокофункциональный HPC;
 3 — самоуплотняющийся SCC;
 4 — ультравысокофункциональный UHPC;
 5 — реакционно-порошковый RPC

ме тенденцию к снижению доли и, следовательно, роли крупного заполнителя при одновременном увеличении содержания и значимости МДК в обеспечении высоких свойств бетона.

Добавки в бетон — ключ к решению технологических задач. Информация рис. 1 убедительно доказывает эффективность разнообразных химических, минеральных и комплексных добавок. Особую роль в БНП играют суперпластификаторы (СП) IV поколения. Это — поверхностно-активные вещества на основе поликарбоксилатов и акрилатов/5, 6/. В отечественных и зарубеж-



Рис. 4. Иллюстрация к консистенции бетонной смеси

ных источниках детально, но гипотетически, обсуждаются сложные, не до конца еще понятые электростатические и стерические механизмы влияния СП этого типа на раннее гидратационное взаимодействие, обеспечивающее значительное (до 30%) водоредуцирование, устойчивые реологические и технологические свойства бетонных смесей — растекаемость, связность, однородность, нерасслаиваемость, длительное сохранение удобоукладываемости, перекачиваемости и пр. Образно сравнение консистенции бетонной смеси с консистенцией меда или хорошей сметаны (рис. 4).

Именно такие СП позволяют транспортировать бетонные смеси до 2 км по горизонтали и 400 м по вертикали. Фантастическая реальность!

Минеральные добавки (МД) исторически — от измельченной обожженной глины (цемянки) и пуццолан до современных высокодисперсных аморфизированных микрокремнезема, метакаолина и др. реакционноспособных (граншлаки, золы-уноса) или химически инертных материалов (кварцевый песок, известняки) — активный и полезный компонент бетона. Именно компонент, минеральный дисперсный компонент (МДК), а не добавка. Часто МДК относят к категории «наполнителей»

цементных систем, что верно лишь отчасти.

К числу достигаемых довольно ощутимых технологических эффектов относят:

- снижение доли клинкерного цемента;
- управляемое регулирование реологии смесей;
- рост прочности, плотности, стойкости и долговечности;
- регулирование экзотермии, линейных и объемных изменений в процессе твердения.

Эти и др. эффекты достигаются за счет:

- реакций пуццоланового типа, связывающих $\text{Ca}(\text{OH})_2$ при взаимодействии с реакционно-способным SiO_2 в низкоосновные гидросиликаты в группы CSH;
- образования растущих в объеме кристаллов этрингита (AF_T — фаза);
- формирования дополнительных центров кристаллизации новообразований на дисперсных частицах (подложках);
- заполнения существенной части свободного объема микроструктуры;
- позитивных изменений в соотношениях капиллярной и гелевой пористости цементного камня;
- устранения опасности разрушительных реакций типа «щелочь — заполнитель» и др.

Наиболее результативно, хотя, на первый взгляд, затратно введение микрокремнезема — SiO_2 в высокодисперсном, аморфизированном, реакционноспособном состоянии/5/. Иллюстрация рис. 5 представляет схему заполнения объема между зернами

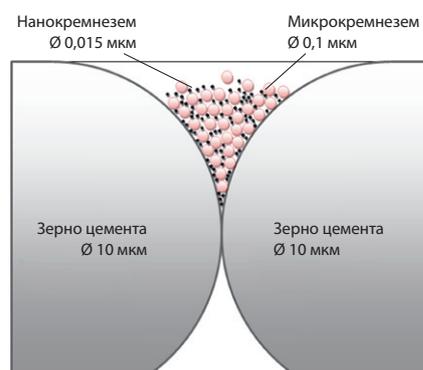


Рис. 5. Заполнение межцементного пространства частицами нано- и микрокремнезема

цемента частицами нано- и микрокремнезема.

Комплексные добавки — химические и минеральные — объединяются в комплексы согласно принципам аддитивности или синергизма для достижения максимальной эффективности в БНП. К примеру, совместное введение СП и МДК нивелирует высокую водопотребность порошкообразного компонента, снижает значение В/Ц без ущерба для реологических свойств смесей и темпа нарастания ранней прочности. Сочетание СП с ускорителями или замедлителями гидратации — реальный путь регулирования свойств товарного бетона в зимних или летних климатических условиях. Наглядна схема формирования составов комплексных добавок (рис. 6).

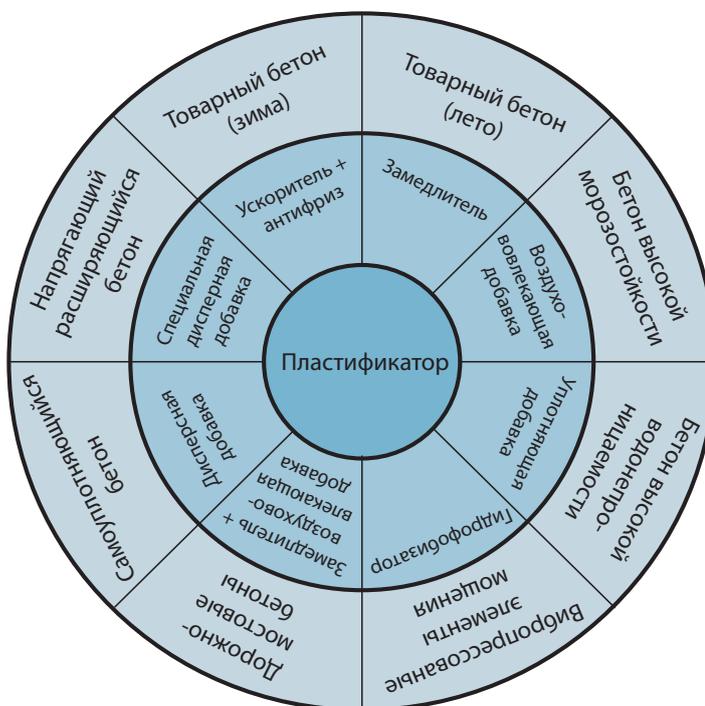


Рис. 6. Диаграмма формирования составов комплексных добавок

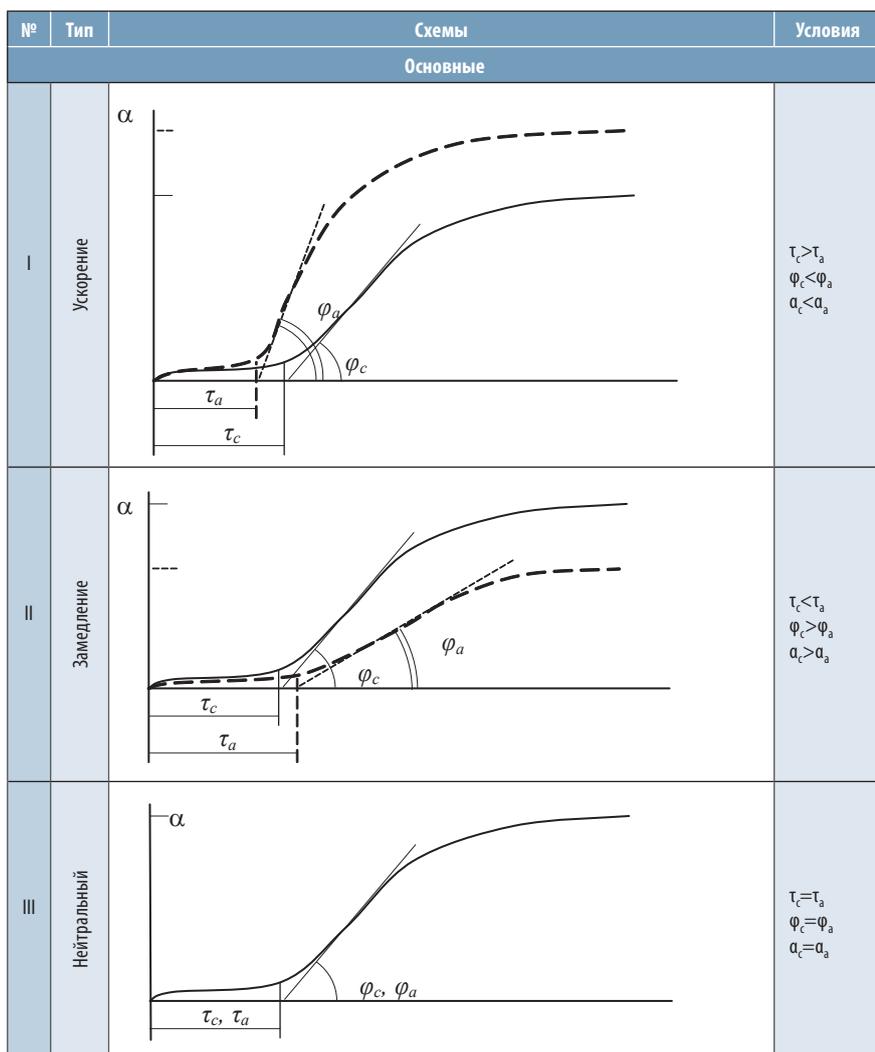


Рис. 7. Основные схемы влияния добавок на твердение цементов

Завершая, таким образом, часть материала, касающегося составов современных бетонов, можно еще раз констатировать возросшую значимость их многокомпонентности. И здесь нельзя не обратить внимания на то, что несмотря на действительно впечатляющие результаты, бетоноведение и технология бетонов сталкиваются с рядом нерешенных задач и проблем. Наиболее существенна, с позиций обеспечения эффективности, проблема совместимости компонентов, особенно цемента с добавками.

Совместимость «цемент — добавка» систематически изучается и обсуждается в связи с необходимостью длительного сохранения удобоукладываемости бетонной смеси. Причин падения удобоукладываемости достаточно. Здесь — содержание алюминатов, гипса, тонкость помола цемента, составы, строение полимерных цепей СП нового поколения, температурные условия и др. Но реология — далеко не вся проблема. Важно обосновать совместимость, а значит эффективность

введения любых добавок на стадии их выбора. Однако вследствие сложности учета механизмов влияния добавок, а также колебаний свойств цементов непосредственно на стройплощадках и заводах ЖБИ, усложняются задачи обеспечения однородности, минимизации расхода материалов, возрастают риски эксплуатационного плана.

Понятие «совместимость» имеет общечеловеческое и философское звучание. Оно означает взаимное соответствие, сочетаемость, сосуществование в гармонии. В нашем случае — это способность добавки при взаимодействии с цементом и др. компонентами обеспечивать и поддерживать требуемые свойства бетонных смесей и твердеющего бетона на должном уровне в течение определенного времени. А, в общем, совместимость — есть основная функция эффективности добавки, оценивать которую корректно и количественно еще не научились.

Предложенная нами концепция решения этой задачи основана на интегральном,

феноменологическом подходе/6/. Суть его кроется в определении тепловых эффектов, сопровождающих взаимодействие в системе «цемент — добавка — вода». Экзотермия, как известно, складывается из теплот адсорбции, смачивания, химических реакций, растворения, кристаллизации новообразований и пр. Не сложно зафиксировать тепловые эффекты с помощью калориметрии. Методы калориметрии давно и результативно используются в бетоноведении и технологиях бетона благодаря объективности и полезности получаемой информации/7/.

Добавки в бетон любого назначения и механизма действия ускоряют, замедляют или нейтрально влияют на скорость и полноту гидратации цемента. Наиболее интенсивно влияние добавок на самых ранних стадиях твердения бетона, когда и технологические эффекты проявляются в наибольшей степени.

Общие закономерности процессов твердения отражаются термокинетическими зависимостями скорости — $dQ/dt=f(\tau)$ и полноты тепловыделения $Q=f(\tau)$ или в размерностях скорости — $da/dt=f(\tau)$ и полноты гидратации — $\alpha=f(\tau)$ (рис. 7). На зависимостях $Q=f(\tau)$ или $\alpha=f(\tau)$ можно выделить три кинетических параметра, определяющих ход процессов твердения и влияния добавок:

- длительность индукционного периода — $\tau_{инд}$;
- максимальная скорость взаимодействия — φ ;
- степень завершенности гидратации за 24 ч — α .

Кинетические параметры прямо или косвенно связаны с технологическими характеристиками — сроками схватывания, темпом набора прочности, сохранностью бетонной смеси и пр. Значения этих параметров дополняют знания технологов важной информацией для принятия решений.

Анализ калориметрических данных привел к обоснованию основных и дополнительных схем влияния добавок (рис. 7).

Эффект влияния добавок выражается отношениями параметров τ , φ и α для контрольных (бездобавочных) цементов и смесей с добавками, которые являются критериями эффективности — k_τ , k_φ и k_α . В зависимости от того, возрастают или снижаются значения τ , φ и α при действии добавок, значения критериев могут выражаться знаками «+» или «-». Каждой схеме влияния отвечает один набор знаков.

«Баланс» — произведение критериев выражает интегральную характеристику эффективности — индекс совместимости «цемент — добавка»:

$$E_{a/c} = f(k_\tau, k_\varphi, k_\alpha).$$

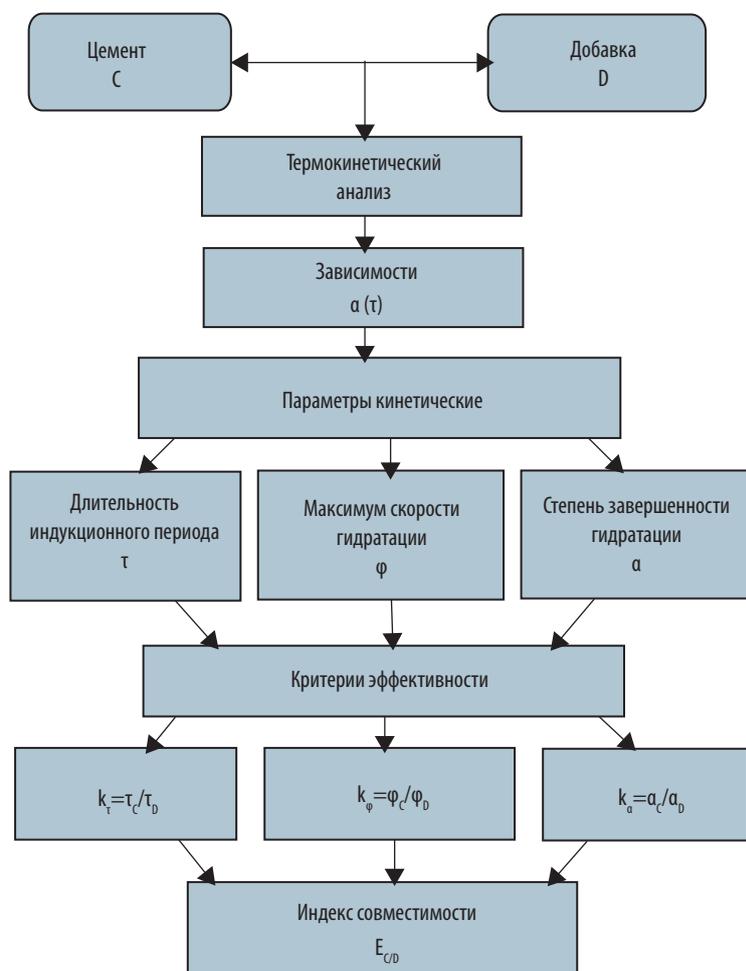


Рис. 8. Последовательность оценки совместимости «цемент — добавка»

Последовательность компьютерного анализа совместимости приведена в схеме (рис. 8).

Результативность разработанного в ХГТУСА метода количественной оценки совместимости, а значит эффективности действия добавок доказана на разных типах цементов. Справедливость предложенного подхода подтверждена введенным в 2008 г. стандартом США на метод определения кинетики гидратации (тепловыделения) твердеющих цементных систем с помощью изотермической калориметрии/8/. Стандарт подтверждает целесообразность использования калориметрии в технологических целях, в т. ч. для оценки совместимости.

Технологическое обновление — неоспоримый факт прогресса в сфере производства бетона и железобетона. В ежегодном сборнике «Бетон и железобетон»/9/ приводятся убедительные и конкретные примеры массового инновационного перевооружения отрасли. Правда, в основном, это — трансфер зарубежных технологий

бетона, ЖБИ и сухих строительных смесей на предприятиях России, Украины и др. стран СНГ. Строительный бум предыдущего десятилетия способствовал позитивной ситуации. Тысячи импортных и отечественных компьютеризированных бетонных заводов, технологических линий по производству железобетонных изделий, в т. ч. пустотных плит методом безопалубочного формования, элементов фигурного мощения, арматурных каркасов, ячеистых блоков автоклавного и безавтоклавного твердения, сухих строительных смесей и др. способны выпускать продукцию высокого качества любого назначения в неограниченных масштабах. Новые оборудование и технологии практически вытеснили трудо- и энергозатратное оснащение действующих в бывшем Союзе заводов и комбинатов по выпуску бетона и железобетона. В индустрии Украины, в частности, осталось лишь несколько ДСК с традиционными каскадными и агрегатно-поточными технологиями.

Сказанное подтвердим примером коренной реконструкции одного из типовых харьковских заводов ЖБИ. Автор данного сообщения имеет прямое к тому отношение. Реконструкция на Слобожанском комбинате строительных материалов заключается в инновационной модернизации БСУ, где заменена морально и физически устаревшая система дозирования, установлено импортное смесительное и лабораторное оборудование, обустроено отделение химических



Рис. 9. Цех безопалубочного формования пустотных плит, СКСМ, Харьков

и минеральных добавок. Модернизация позволила на местном, не очень-то кондиционном, в современном понимании, сырье (песок, щебень) производить товарные (летние и зимние) бетоны класса до В60. Все же оказалось достаточно сложным получение реологически однородных бетонных смесей для линии беспалубочного виброформования, вследствие недостаточного качества песка и щебня (рис. 9). Технологическая линия состоит из 7 стандов — дорожек длиной 106 м. Ее освоение, как и ожидалось, привело к резкому повышению производительности труда и качества изделий, снижению затрат и энергоресурсов. Эффект реконструкции был очень результативным для одной из ведущих украинских строительных организаций — ОАО «Спецстроймонтаж». Бетоны традиционные и нового поколения обеспечили возможность все-сезонного возведения первых в Харькове 25-этажных домов в монолитном безригельном варианте (рис. 10), а также др. промышленных, торгово-офисных и административных объектов в монолитном и сборно-монолитном исполнении.

Некоторые проблемы бетоноведения и технологии современных бетонов связаны с решением ряда задач научно-технического, нормативного и организационного планов.

Прежде всего, это достижение адекватной современному технологическому уровню степени профессионализма научно-педагогических и производственных кадров, причастных к инновационному обновлению отрасли. Ситуация усугубляется тем, что за последние два десятилетия сильно обеднилась научно-экспериментальная база некогда могучих НИИ и ВУЗов. Не менее важно быстрое и неформальное освоение интегрированных европейских норм на бетон и его компоненты. При этом традиционные для стран СНГ «болезни», к примеру, использование низкокачественных заполнителей в производстве бетона и железобетона могут стать своеобразным тормозным препятствием. Несовершенство государственная и региональные системы контроля и обеспечения качества на всех технологических переделах от сырья до готовых изделий и конструкций. Производство бетона и бетонные работы далеки еще от принципов информационных технологий.

Заключение

Современный бетон — материал, обеспечивающий жизнедеятельность человека на должном уровне, заслуживает адекватного и всестороннего внимания ученых и практиков с целью достижения высокой эффективности его технологий.



Рис. 10. 25-этажный жилой дом «Пионер», Харьков

Литература:

1. Neville A. M. Właściwości betony. Wyd. 4, Kraków, 2000. — 874 s.
2. Collepardi M. The new concrete. Italy. — 2006. — 421 p.
3. Edward G., Nawy P. Fundamentals of High Performance Concrete. Sec. ed. Willy. 2001. — 302 p.
4. Ma j. Experimental investigation for the product as ultra — high strength concrete. LACER, 2001, № 6, p. 215–226.
5. Spiratos M. and oth. Superplasticizers for concrete: fundamentals, technology and practice. — Quebec, 2006. — 322 p.
6. Химические и минеральные добавки в бетон/под ред. Ушерова-Маршака А. В. — Х.: Колорит, 2005. — 280 с.
7. Ушеров-Маршак А. В. Калориметрия цемента и бетона. — Х.: Колорит, 2002. — 184с.
8. ASTM C1679-08. Standart Practice for Measuring Hydration kinetics of Hydraulic cementations Mixtures Using Isothermal Calorimetry.
9. Бетон и железобетон. Оборудование, материалы, технологии. 2009, вып. 2, С.-Пб.: Славутич. — 199 с.