

- для разных сроков эксплуатации ЖБК в атмосферных условиях происходит близкое к линейному снижение содержания карбонатов и увеличение рН водных вытяжек цементного камня по мере углубления в бетон;
- характер распределения карбонатов и рН по глубине зависят от времени, условий эксплуатации, состава бетона и толщины конструкции;
- чем продолжительней срок и жестче условия эксплуатации, тем больше глубина карбонизированного слоя;
- сокращение содержания цемента в бетоне влияет на угол наклона зависимости изменения содержания карбонатов от глубины залегания в конструкции;
- по значениям рН определены три зоны состояния бетона и арматуры: устойчивое состояние, неопределенное состояние арматуры, зона сильной коррозии арматуры и деградации бетона;
- индикаторный метод дает заниженную толщину слоя бетона, в которой возможно развитие коррозии арматуры во влажной среде;
- предложено понятие предельной величины карбонизации, значение которой позволяет определять степень карбонизации и процент гидроокиси кальция и гидратированных клинкерных минералов, перешедших в карбонаты на разной глубине бетона;
- совместное применение рН- и карбометрии позволяет достаточно подробно судить о состоянии ЖБК на данный момент эксплуатации;
- введение в нормативные документы определения состояния бетона при помощи методов рН- и карбометрии позволит определять состояние бетона и арматуры, а также прогнозировать их состояние, не разрушая конструкций.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев С.Н., Розенталь Н.К. Коррозионная стойкость железобетонных конструкций в агрессивной промышленной среде. – М.: Стройиздат. 1978.
2. Кудрявцев И.А., Беспалова М.В., Васильев А.А. Диагностика, эксплуатация и ремонт зданий и сооружений. Пособие по спец. «Технический надзор» 2003. – БелГУТ, Гомель.
3. Карнаухова Л. Н., Петров-Денисов В. Г. Исследование физико-химических процессов и закономерностей массопереноса при коррозии цементного камня в кислых средах. Сб. научных трудов НИЖБ. М.: 1984, с. 82-98. Труды называются «Коррозионная стойкость бетона и железобетона в агрессивных средах».
4. Алексеев С.Н., Иванов Ф.И., Модры С., Шисль П. Долговечность железобетона в агрессивных средах. М.: Стройиздат, 1990.
5. Кузнецов Ю. Д., Заславский И. М. Обеспечение долговечности железобетонных конструкций при реконструкции промышленных предприятий. Киев, «Будивельник», 1985.
6. Кудрявцев И.А., Богданов В.П. Исследование карбонизации ЖБК с длительным сроком эксплуатации. Журнал Материалы, технологии, инструменты. Гомель, т. 5 № 3, 2000.
7. Кудрявцев И.А., Богданов В.П. Исследование состояния эксплуатируемых железобетонных конструкций. Сб. трудов «Эффективные строительные материалы, конструкции и технологии». Межд. науч.-практич. конф. Минск, 2000. с. 352.

УДК 666.97

Иванов А. Д.

#### ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА СТАДИИ ИХ ПРОИЗВОДСТВА

Целью настоящей работы является усиление внимания к проблеме повышения долговечности строительных конструкций на стадии их производства.

Очевидно, что долговечность строительных конструкций, как и другие показатели, характеризующие их качество, “прогнозируется” при изготовлении этих конструкций. Одним из факторов, влияющих на долговечность строительных конструкций, является капиллярно-поровая структура бетона, которая определяет коррозионную стойкость бетона, из которого изготовлена строительная конструкция. Кроме того, от капиллярно-поровой структуры бетона зависит коррозия арматуры железобетонных строительных конструкций.

Формирование капиллярно-поровой структуры бетона в значительной степени происходит при проведении технологического процесса изготовления строительных конструкций. Наибольшее влияние оказывают технологические операции по приготовлению бетонной смеси, уплотнению бетонной смеси, твердению бетона. Эти же технологические операции оказывают влияние на прочность бетона в строительных конструкциях.

Правильное (или не правильное) назначение состава бетонной смеси предопределяет характеристики бетона, приготовленного из этой смеси. Исследователи бетона так много внимания уделяли и продолжают уделять этому вопросу, что имеются десятки аналитических зависимостей, устанавливающих прочность бетона от характеристик компонент бетонной смеси. Такое большое количество формул обуславливается, конечно, стремлением авторов этих формул как можно более точно учесть влияние состава бетонной смеси на характеристики бетона, но главная, на мой взгляд, причина заключается в том, что теоретические и практические результаты не совпадают. И, естественно, возникало и возникает желание найти такие зависимости или улучшить существующие, чтобы исключить этот недостаток. И иногда предлагаются может быть и правильные формулы, но проверить их невозможно, потому что невозможно их практическое применение.

Таким образом, в практике, а еще больше в теории, имеется множество зависимостей, с помощью которых предлагается осуществлять подбор соотношения компонент бетонной смеси. В [1] приводится перечень таких аналитических выражений, этот список, однако, можно продолжить.

Еще в позапрошлом столетии русский ученый, генерал-майор Петербургской военно-инженерной академии И.Г. Малюга предложил аналитическое выражение, которое связывает прочность бетона с характеристиками и соотношениями компонент бетонной смеси.

$$R = \frac{R_{ц}}{A(B/C)^n}, \quad (1)$$

где  $R$  — прочность бетона;

$R_{ц}$  — активность цемента;

$B$  — содержание воды в бетонной смеси;

$C$  — содержание цемента в бетонной смеси;

$A$  — эмпирический коэффициент, характеризующий заполнители в бетонной смеси;

$n$  — эмпирический коэффициент, связывающий прочность бетона с водоцементным отношением в бетонной смеси.

В выражении (1) все логично, оно имеет ясный физический смысл:

- чем выше марка (активность) цемента, тем выше прочность бетона;
- чем больше цемента (в известных пределах), тем прочность бетона должна быть выше;
- чем больше воды в бетонной смеси, тем прочность бетона ниже;
- показатель степени ( $n$ ) у водоцементного отношения говорит о том, что при изменении  $B/C$  прочность бетона изменяется не по линейному закону;
- качество заполнителей сказывается на качестве бетона, коэффициент  $A$  мог находиться и в числителе, но, поставив его в знаменатель, И.Г. Малюга подчеркнул главенствующую роль цемента в формировании свойств бетона.

Формула (1) предназначена для расчета состава бетона, находит применение при приготовлении бетонной смеси и показывает потенциальную прочность бетона, приготовленного из бетонной смеси с данным составом, но не учитывает влияния на прочность бетона технологического процесса его изготовления. С учетом влияния технологического процесса формула (1) может быть преобразована в (2)

$$R = \frac{R_{ц}}{A(B/C)^n} K_u K_t, \quad (2)$$

где  $K_u$  — коэффициент, учитывающий уплотнение бетонной смеси;

$K_t$  — коэффициент, учитывающий условия твердения бетона.

Коэффициенты  $K_u$  и  $K_t$  следует учитывать и при приготовлении бетона в условиях лаборатории.

Значение  $K_u$  определяется степенью уплотнения бетонной смеси и численно равно коэффициенту степени уплотнения бетонной смеси.

Значение  $K_t$  имеет более сложное происхождение и должно учитывать влияние на прочность бетона таких условий твердения бетона как температура изотермического прогрева и скорость, с ко-

торой она была достигнута, а также скорость остывания бетона; влажность среды, в которой происходило твердение бетона.

В условиях реального производства все элементы, составляющие выражения (1) и (2), как, впрочем, и во всех других выражениях, приведенных, например, в [1], в количественном выражении являются неопределенными (или определенными только в некотором интервале) переменными, численные значения которых носит случайный характер. Поэтому состав бетонной смеси постоянно уточняется заводскими лабораториями. Для чего используют пробные замесы, что практически мало что дает, так как результаты, полученные в пробных замесах, также требуют корректировки в каждом последующем.

Влияние технологического процесса производства строительных конструкций на их характеристики, в том числе и долговечность, существенно усиливается нестабильностью характеристик материалов, из которых бетон изготавливается. Существует настоятельная необходимость в разработке механизмов, которые компенсировали бы нестабильность характеристик указанных материалов и технологического процесса. Таким, наиболее широко применяемым в настоящее время механизмом, для цементных бетонов является увеличение расхода цемента. Это позволяет в значительной степени решить проблему прочности бетона, но в существенно меньшей степени проблему долговечности строительных конструкций, коррозионной стойкости бетона и железобетона.

Можно утверждать, что обеспечить высокий уровень качества бетонной смеси без умения достигать требуемого содержания воды в бетонной смеси невозможно. Можно утверждать, что обеспечить высокий уровень показателя долговечности строительных конструкций без умения контролировать степень уплотнения бетонной смеси и управлять процессом твердения бетона невозможно. Вопросы больше, чем ответов.

Может, например, проще изменить систему приготовления бетонной смеси. Что и было предложено автором и реализовано с помощью коллег в научно-исследовательском и проектно-технологическом институте стройиндустрии Министерства архитектуры и строительства Республики Беларусь.

В условиях изменчивости (непостоянства) значений параметров исходных материалов (компонент) бетонной смеси от замеса к замесу только адаптивная корректировка содержания воды в бетонной смеси непосредственно в бетоносмесителе может дать положительный практический результат по стабилизации качества бетонной смеси на необходимом уровне.

Зависимость прочности бетона от В/Ц — это фактически зависимость прочности бетона от объема и характера пор, образованных водой, не вступающей в химическое и, возможно, в физико-химическое взаимодействие с цементом.

Но пористость бетона не ограничивается только порами, возникшими под воздействием воды. В бетонную смесь вовлекается воздух при ее приготовлении, транспортировке и укладке. Чем больше такого воздуха, тем ниже прочность бетона.

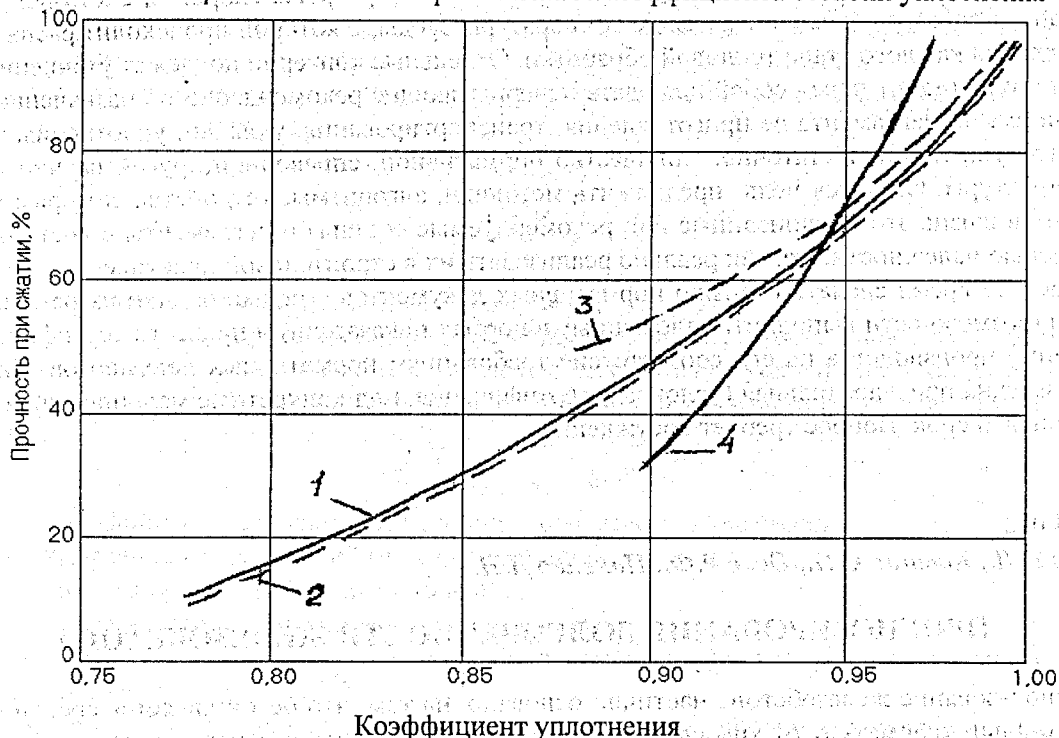
Поэтому огромное значение при изготовлении бетона имеет уплотнение бетонной смеси, хотя на практике этому вопросу уделяется не так много внимания, значительно меньше, чем ее составу.

Уплотнение бетонной смеси характеризуется коэффициентом степени уплотнения (отношение объема полностью уплотненной бетонной смеси к объему, занимаемому бетонной смесью после ее уплотнения). На рисунке 1 приведены графики зависимости прочности бетона от коэффициента степени уплотнения бетонной смеси. Из графиков видно, что при снижении степени уплотнения смеси на один процент (в диапазоне коэффициента степени уплотнения от 0,95 до 0,98) прочность бетона после твердения снижается на 5–10% (по данным разных исследователей).

Изменение прочности бетона, подсчитанное по формуле Болоемя, при изменении водоцементного (цементоводного) отношения на один процент составило 1,3%. Близкие результаты получаются и при расчете прочности бетона по формулам других авторов. Таким образом, изменение коэффициента степени уплотнения бетонной смеси на 1% оказывает в 4–8 раз большее влияние, чем изменение на 1% водоцементного (цементоводного) отношения.

Попытки решить проблему уплотнения за счет увеличения его длительности сверх оптимально необходимого времени приводит к расслоению бетонной смеси, что также отрицательно сказывается на прочности бетона. Причем, если уровень возмущающей силы недостаточен, то даже длительное уплотнение не гарантирует требуемую его степень. Актуальность контроля степени уплотнения особенно возрастает при автоматизации технологического процесса. Однако на сегодняшний день отсутствуют точные и надежные методы измерения степени уплотнения бетонной смеси в процессе формирования.

Зависимость прочности бетона при сжатии от коэффициента степени уплотнения



- по данным Макферлейна;
- по данным Либмана;
- по данным Гланвилля;
- по данным Сорокера.

Иногда решающее и всегда существенное значение для долговечности бетона имеют условия его твердения. Практикуемая для ускорения твердения бетона его тепловая обработка при неправильном её назначении и проведении вносит столь существенные изменения в структуру бетона, что резко снижается не только его прочность, но и долговечность. Важнейшим параметром режима твердения бетона, влияющим на его долговечность, является скорость подъёма температуры бетона до температуры его изотермического прогрева. Наиболее сложно контролировать этот параметр режима твердения с использованием тепловой обработки бетона при производстве изделий по конвейерной технологической схеме.

Необходимо признать тот факт, что существующее заводское производство строительных конструкций не в полной мере обеспечивает их выпуск в полном соответствии с требованиями нормативной документации и, прежде всего, по вопросам долговечности.

Предложен новый метод управления технологическим процессом, заключающийся в том, что случайный характер технологического перехода или технологической операции в целом детерминирован, т.е. в момент проведения им придается однозначность. Для этого детерминированного характера технологической операции и разрабатывается алгоритм управления. Автором статьи совместно с коллегами в научно-исследовательском и проектно-технологическом институте стройиндустрии Министерства архитектуры и строительства Республики Беларусь разработаны алгоритмы такого адаптивного управления технологическим процессом производства бетонных и железобетонных изделий, устройства и автоматизированные системы по их реализации. Их опытно-промышленное внедрение на ряде заводов сборного железобетона показало правильность принятых алгоритмических, программных и технических решений.

Для каждой технологической операции выработан критерий управления в соответствии с новым методом управления. Для приготовления бетонной смеси это её консистенция (удобоукладываемость). При укладке бетонной смеси в опалубку это масса смеси, для уплотнения бетонной смеси это толщина смеси. При заглаживании открытых бетонных поверхностей — содержание воды в полусухой смеси, с помощью которой производится заглаживание бетонной поверхности. При тепловой

обработке бетонной смеси — температура изотермического прогрева, скорость, с которой эта температура достигается, а затем снижается до температуры среды, в которой происходит распалубка, время проведения каждого этапа тепловой обработки. Отдельные критерии подлежат уточнению.

Автор не ставит перед собой цель дать исчерпывающие рекомендации по назначению составов бетонной смеси, регламента ее приготовления, транспортирования, укладки, уплотнения, твердения. Для этого существует достаточное количество нормативной, справочной, другой научно — технической литературы. Ставится цель предложить методики, алгоритмы, устройства, которые позволяют воплотить в жизнь эти предписанные или рекомендуемые составы и регламенты с достаточно высокой степенью надежности, т.е. как реально реализовать их в строительной практике.

Настало время сделать ревизию нормативных документов с целью оценки их реальной достижимости (возможности выполнить заложенные в нормах показатели) и провести сертификацию (а не аттестацию) производства на его соответствие требованиям нормативных документов. На каком-то этапе возможна предварительная (условная) сертификация, под конкретные мероприятия и на непродолжительный срок. Вопрос требует обсуждения.

УДК 624.012

Полейко Н.Л., Ковшар С.Н., Осос Р.Ф., Полейко Д.Н.

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОНА

Использование железобетона частично основано на том, что бетон является средой, предохраняющей стальную арматуру от химической коррозии. Способность пассивации стали в бетоне на основе портландцементного клинкера определяется его щелочностью. Бетон также является физическим барьером против веществ, которые способствуют развитию коррозии стальной арматуры.

При эксплуатации железобетонных конструкций потеря пассивности стали может наступить:

- в результате карбонизации защитного слоя бетона (снижение pH);
- в результате диффузии через защитный слой бетона к поверхности стальной арматуры агрессивных ионов;
- в результате разрушения защитного слоя.

Прогнозирование долговечности железобетонной конструкции можно вести двумя способами. Первый способ основан на том, что срок службы конструкции определяется моментом депассивации арматуры, т.е.:

$$t_L = t_0, \quad (1)$$

где  $t_L$  — долговечность,  $t_0$  — время возникновения коррозии

Второй способ — срок службы определяется временем, необходимым для исчерпания несущей способности арматуры, за счет уменьшения ее сечения при коррозии, т.е.:

$$t_L = t_0 + t_1, \quad (2)$$

где  $t_1$  — время распространения коррозии, которое определяется временем, необходимым для максимально-допустимой потери площади поперечного сечения арматуры. Если принять, что время депассивации арматуры незначительно, то в этом случае формулу (2) можно записать в следующем виде:

$$t_L = t_1. \quad (3)$$

Время депассивации арматуры в бетоне при действии на него хлоридов и углекислого газа атмосферы можно определить исходя из известных моделей, основанных на законах диффузии Фика. Например, зависимость для определения времени возникновения коррозии арматуры при воздействии хлоридов на бетон имеет вид:

$$t_0 = \frac{1}{12 \cdot D \cdot \left[ c / \left( 1 - (C_{th} / C_s)^{1/2} \right) \right]^2}, \quad (4)$$

где  $D$  — коэффициент диффузии хлорид-ионов в бетоне;

$c$  — толщина защитного слоя;

$C_{th}$  — критическое содержание хлоридов у поверхности арматуры;