

УДК 666.972

Н. В. Суходоева, В. В. Бабицкий, д-р техн. наук, проф.**МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ СОСТАВА БЕТОНА**

Предложена универсальная методика проектирования состава бетона, учитывающая условия твердения изделий, а также влияние химических добавок.

Введение

Подбор состава бетона был, есть и останется одним из самых сложных, обязательных элементов технологии бетона [1–8]. Именно на этой стадии изготовления бетонных и железобетонных изделий закладываются основы долговечности конструкций, их бесперебойной службы в течение всего проектного срока эксплуатации. Оптимальное проектирование состава бетона не требует значительных капитальных вложений, но дает как повышение качества изделий, так и снижение материальных затрат в виде сокращения расхода цемента [9]. Фактически, исходя из современных воззрений на бетоноведение, подбор (лучше – проектирование) состава есть математическая модель прогнозирования основных свойств бетона.

Современные методики должны базироваться на многофакторных моделях, что является залогом повышения точности расчетов. И это достаточно просто подтвердить, проследив, например, тенденцию совершенствования метода абсолютных объемов, реализованную таким известным специалистом, как В. П. Сизов. Однако приоритет в этой области наших отечественных ученых, профессоров И. Н. Ахвердова и Н. П. Блещика, неоспорим. Предложенные ими методики проектирования состава бетона нацелены на максимальный учет разнообразных свойств компонентов бетонной смеси, ориентированы на использование различных технологических приемов формования изделий.

Естественно, увеличение числа влияющих факторов приводит и к соответствующему усложнению техники расчетов. Ручной счет становится мало эф-

фективным по причине сложности взаимной увязки аналитических зависимостей, продолжительности расчетов, возможности появления многочисленных ошибок. Однако применение вычислительной техники [10–14] решает проблему оперативности расчетов. Следовательно, методика проектирования состава бетона должна быть удобной для создания на ее основе соответствующего программного обеспечения.

Внедрение современных технологий и добавок в практику работы предприятий по производству бетонных и железобетонных изделий невозможно без соответствующих методов проектирования состава бетона, поскольку основа свойств бетона закладывается именно на данной стадии.

От методики проектирования состава бетона зависит, какой впоследствии мы получим материал. Методика должна учитывать все разнообразие свойств компонентов смеси и особенностей технологического процесса получения бетонных и железобетонных изделий.

Анализ существующих методик проектирования состава бетона

Суть практически любой методики проектирования состава бетона заключается в последовательном выполнении следующих основных операций:

– расчет водоцементного отношения, обеспечивающего весь комплекс требований (прочность, а при необходимости морозостойкость, водонепроницаемость и иные свойства). Практически все существующие методики ос-

новываются на законе водоцементного отношения (рис. 1), позволяющем по заданной прочности рассчитать необходимое водоцементное отношение бетонной смеси. Этот закон обоснован теоретически, нашел убедительное подтверждение на практике и в ревизии не нуждается. Одна-

ко для совершенствования закона для расчета прочности бетона необходимо применение более точных формул, а также получение формул, связывающих водоцементное отношение и с иными параметрами бетона: морозостойкостью, водонепроницаемостью и т. д.;

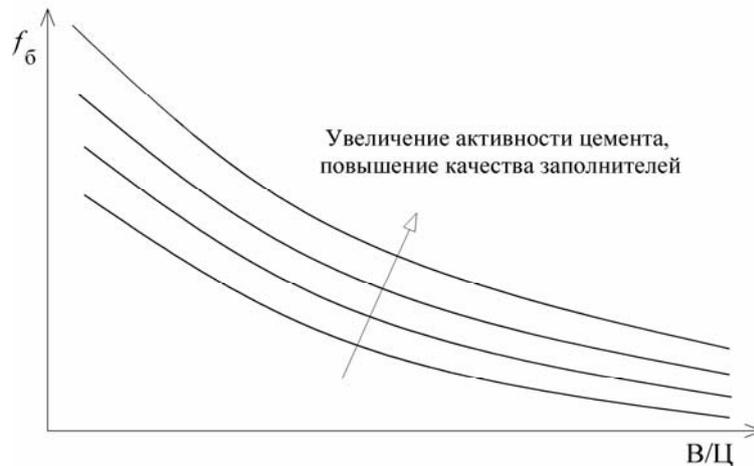


Рис. 1. Зависимость прочности бетона f_6 от водоцементного отношения $В/Ц$

– определение расхода воды, обеспечивающего требуемую удобоукладываемость бетонной смеси. Некоторые методики, например, И. Н. Ахвердова и Н. П. Блещика, предполагают непосредственный расчет подвижности (или жесткости) бетонной смеси как функции ряда влияющих факторов: консистенции и объема цементного теста, соотношения мелкого и крупного заполнителей и др. Однако общего признания такие формулы по ряду причин пока не получили. Поэтому в основе большинства действующих методик лежит закон постоянства водопотребности бетонной смеси (рис. 2), подтверждающий на практике факт, что при некоторых расходах цемента (обычно полагают, что до 350 кг) расход воды не изменяется, а определяется маркой бетонной смеси по удобоукладываемости, нормальной густотой цемента, водопотребностью заполнителей и может назначаться по таблицам и графикам. Это обусловлено тем, что с увеличением расхода цемента водоцементное отношение

уменьшается (при постоянстве расхода воды), что приводит к уменьшению подвижности бетонной смеси. Однако увеличение расхода цемента влечет повышение объема цементного теста, а следовательно, и к росту подвижности бетонной смеси. При расходах цемента до 350 кг эти два фактора компенсируют друг друга, но при большем расходе начинает превалировать один из факторов, что должно компенсироваться введением дополнительного количества воды, равного примерно 1 л на каждые 10 кг цемента сверх 350;

– расчет расхода цемента по известным величинам водоцементного отношения и расхода воды;

– грамотный выбор доли песка в смеси заполнителей (отношение массы песка к сумме масс песка и щебня), обеспечивающий наибольшую удобоукладываемость бетонной смеси при минимальном расходе вяжущего. Величину доли песка находят как функцию объема цементного теста (рис. 3) либо

оперируют таким понятием, как коэффициент раздвижки зерен крупного заполнителя растворной частью;

– расчет расходов песка и щебня по известным величинам расходов цемента,

воды и доли песка в смеси заполнителей (или коэффициента раздвижки зерен крупного заполнителя растворной частью).



Рис. 2. Зависимость водопотребности бетонной смеси V от расхода цемента $Ц$

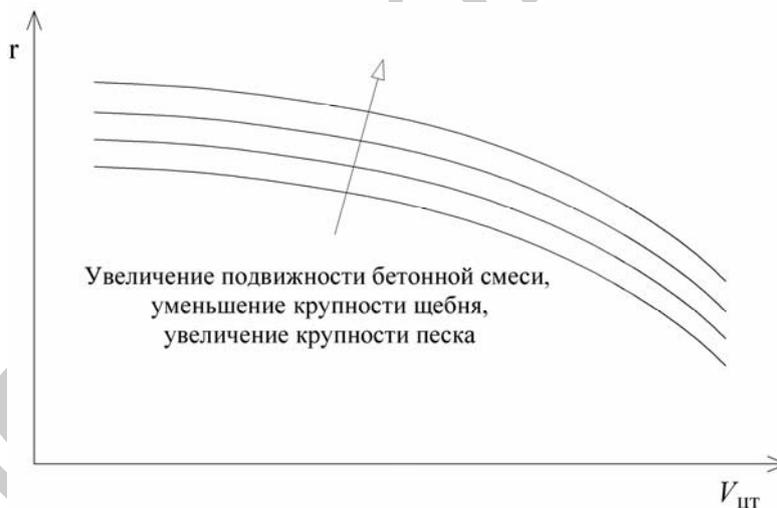


Рис. 3. Зависимость доли песка в смеси заполнителей r от объема цементного теста $V_{цт}$

Критический анализ существующих методик проектирования состава тяжелого бетона (НИИЖБа, абсолютных объемов, В. П. Сизова, Ю. Сторка, В. Н. Шмигальского, И. Н. Ахвердова, Н. П. Блещика, М. А. Шалимо, DIN 1045 и др.) показал, что всем им присущи как достоинства, так и определенные недостатки, не позволяю-

щие принять ни одну из них в качестве единого универсального метода.

При всем разнообразии недостатков можно выделить те, которые характерны практически для всех методик:

– отсутствует возможность полного учета влияния разнообразных химических добавок с различным пластифици-

рующим эффектом на состав бетона;

- не учитывается величина отпускной прочности бетона – требование, обязательное для заводской технологии производства изделий;

- проектируемый состав бетона не увязывается с режимом тепловой обработки бетонных и железобетонных изделий;

- отсутствует привязка проектируемого состава монолитного бетона к температурно-влажностным условиям твердения в холодном или жарком климате.

Приведенная ниже методика проектирования состава бетона, основанная на учете изменения нормальной плотности цемента при введении пластифицирующих добавок, разработана с целью устранения отмеченных выше недостатков.

Предлагаемая методика проектирования состава бетона

В принципе, в предлагаемой методике проектирования состава бетона указанная последовательность расчетов со-

храняется. Однако имеются существенные отличия, позволяющие, на наш взгляд, повысить точность расчетов и расширить область применения методики.

Во-первых, расход воды следует не назначать по таблицам и графикам (они не могут охватить все разнообразные влияющие факторы), а рассчитывать. При этом расчетные формулы должны быть увязаны как с удобоукладываемостью бетонной смеси, так и с многообразными свойствами цемента и заполнителей. И, в первую очередь, следует насколько возможно полно учитывать изменение нормальной плотности цемента, поскольку именно ее уменьшение является целью и итогом введения пластифицирующих добавок в бетонную смесь. В идеале результаты расчетов должны соответствовать закономерностям изменения водопотребности бетонной смеси, представленным на рис. 4.

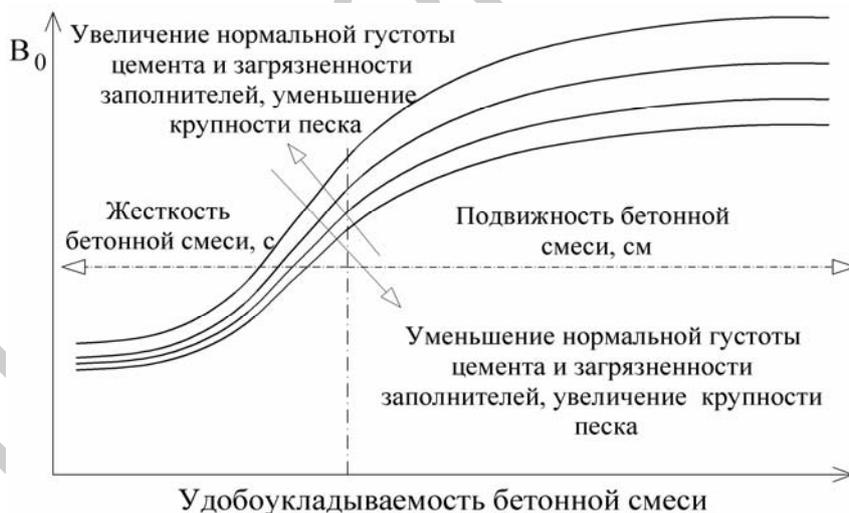


Рис. 4. Зависимость начальной водопотребности бетонной смеси V_0 от ее удобоукладываемости

Во-вторых, вернувшись к графикам на рис. 2, можно отметить, что они не вполне корректны на стадии превышения расходом цемента величины 350 кг. В литературе имеются данные, что точка пере-

гиба может быть отлична от 350 кг, причем существенно больше при введении пластифицирующих добавок. Кроме того, на этом участке изменения расхода цемента угол наклона прямых линий не

должен быть постоянным. В связи с этим предлагается закон постоянства водопотребности привязать не к расходу цемента, а к водоцементному отношению (рис. 5). Если водоцементное отношение превышает пределы структурной связности цементного теста (а по И. Н. Ахвердову качественное изменение свойств цементного теста наступает на границе, равной 1,65 относительного водосодержания цементного теста), то расход воды постоянен и зависит лишь от удобоукладываемости бетонной смеси, нормальной плотности цемента и водопотребности заполнителей. Но в области

структурной связности цементного теста расход воды необходимо увеличивать, причем пропорционально нормальной плотности цемента, в том числе и с химическими добавками. Такой подход к расчету расхода воды представляется логичным, учитывает технологические особенности цементного теста и, что весьма важно, может учесть влияние любых химических добавок, поскольку определение нормальной плотности цемента – операция, обязательная при контроле свойств поступающего цемента и введении добавок.

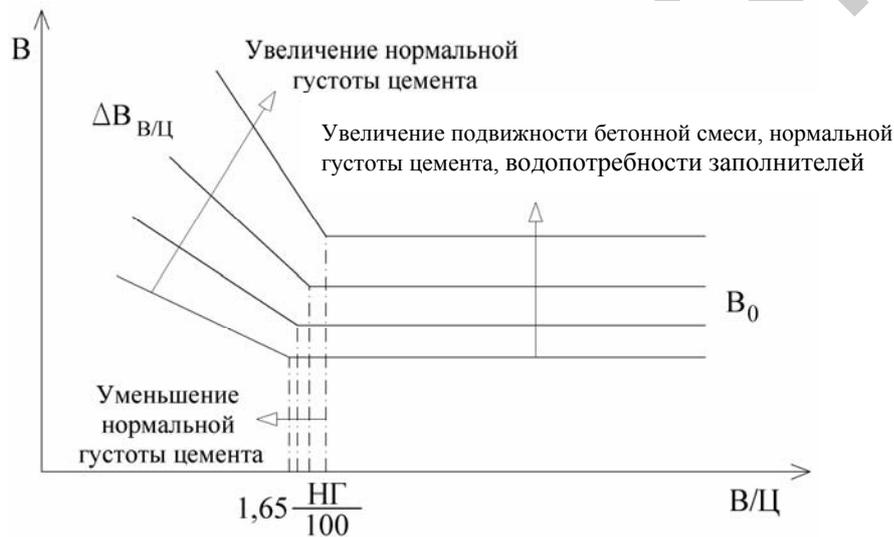


Рис. 5. Зависимость водопотребности бетонной смеси В от водоцементного отношения В/Ц

В-третьих, важнейшим моментом методики проектирования состава бетона является нахождение оптимального соотношения мелкого и крупного заполнителей. В данной методике его предлагается рассчитывать в зависимости от расхода цемента (примерно как в методике НИИЖБ), а также и от удобоукладываемости бетонной смеси (рис. 6). Такой подход вполне логичен и упрощает саму методику проектирования состава бетона.

И, наконец, в-четвертых, в методику проектирования состава бетона обязательно следует ввести фактор времени твердения, без чего современная методика не имеет будущего. Это можно сделать

посредством расчета кинетики гидратации цемента с последующим переходом от степени гидратации к физико-механическим характеристикам бетона, в частности прочности.

На основании указанных теоретических выкладок получены соответствующие формулы и предлагается следующий порядок расчетов.

1. Рассчитывают водоцементное отношение бетонной смеси:

$$В/Ц = \frac{0,3 \cdot k_3 \cdot f_{II}}{k_{T0} \cdot f_6} + 0,1, \quad (1)$$

где k_3 – коэффициент, зависящий от ка-

чества заполнителей (для щебня $k_3 = 1,0$, а для гравия $k_3 = 0,9$); $f_{ц}$ – активность цемента, МПа; $k_{то}$ – коэффициент, зависящий от

отпускной прочности бетона; f_b – прочность бетона, МПа.

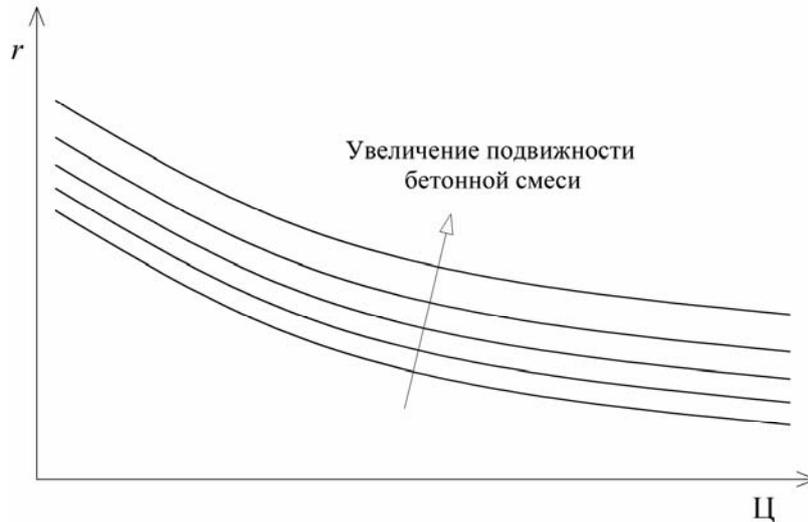


Рис. 6. Зависимость доли песка в смеси заполнителей r от расхода цемента $Ц$

Величину отпускной прочности бетона учитывают следующим образом:

$$k_{то} = 1 + 0,009 \cdot (f_{отп} - 70), \quad (2)$$

где $f_{отп}$ – отпускная прочность бетона, %.

2. Рассчитывают начальную водопотребность бетонной смеси B_0 , обеспечивающую ее требуемую удобоукладываемость.

Вначале рассчитывают водоцементное отношение цементного теста, соответствующее пределу связности (согласно воззрениям проф. И. Н. Ахвердова):

$$\beta = 1,65 \frac{НГ}{100}, \quad (3)$$

где $НГ$ – нормальная плотность цемента, %.

Затем рассчитывают величину коэффициента γ , определяющего влияние удобоукладываемости бетонной смеси на ее водопотребность:

– для подвижной бетонной смеси

$$\gamma = 0,7 + 0,094\sqrt{ОК}, \quad (4)$$

где $ОК$ – подвижность бетонной смеси, см;

– для жесткой бетонной смеси

$$\gamma = 1,05 \left(\frac{1}{Ж} \right)^{0,16}, \quad (5)$$

где $Ж$ – показатель жесткости бетонной смеси, с.

Начальную водопотребность бетонной смеси определяют по формуле

$$B_0 = \frac{110}{1 - \beta \cdot \gamma}. \quad (6)$$

3. Рассчитывают окончательную, с учетом поправок, водопотребность бетонной смеси B .

Определяют поправку к начальной водопотребности бетонной смеси, учитывая водоцементное отношение цементного теста.

Рассчитывают водоцементное отношение цементного теста:

$$(B/C)_T = 0,98 \cdot B/C - 0,0094. \quad (7)$$

Если $(B/C)_T \geq \beta$, то поправка к расходу цемента не нужна:

$$\Delta V_{B/C} = 0. \quad (8)$$

Если же $(B/C)_T < \beta$, то поправка к расходу воды равна:

$$\Delta V_{B/C} = 10 \cdot [\beta - (B/C)_T] \cdot НГ. \quad (9)$$

Далее определяют поправки, учитывающие особенности мелкого заполнителя:

$$\Delta V_{пг} = 2 \cdot (g_{пг} - 3), \quad (10)$$

где $g_{пг}$ – содержание илистых, глинистых и пылевидных частиц в песке, %.

$$\Delta V_{пк} = 6 \cdot (3 - M_k), \quad (11)$$

где M_k – модуль крупности песка.

Затем определяют поправки, учитывающие особенности крупного заполнителя:

$$\Delta V_{щг} = 2 \cdot (g_{щг} - 1), \quad (12)$$

где $g_{щг}$ – содержание илистых, глинистых и пылевидных частиц в щебне, %.

$$\Delta V_{щк} = 55,2 - 18,3 \cdot \ln НКЩ, \quad (13)$$

где НКЩ – наибольшая крупность зерен щебня, мм.

Окончательный расход воды равен:

$$V = V_0 + \Delta V_{пг} + \Delta V_{пк} + \Delta V_{щг} + \Delta V_{щк}. \quad (14)$$

4. Рассчитывают расход цемента:

$$Ц = \frac{V}{B/C}. \quad (15)$$

5. Рассчитывают оптимальную долю мелкого заполнителя в смеси заполнителей:

– для подвижной бетонной смеси

$$r = 1,2 \frac{1}{Ц^{0,2}} + (0,0013 \cdot ОК^2 + 0,08 \cdot ОК - 0,143 \cdot (-0,0001 \cdot Ц + 0,082)); \quad (16)$$

– для жесткой бетонной смеси

$$r = 1,2 \frac{1}{Ц^{0,2}}. \quad (17)$$

6. Рассчитывают объем цементного

теста в бетонной смеси:

$$V_T = Ц \cdot \left[\frac{1}{\rho_{ц}} + \frac{(B/C)_T}{\rho_B} \right], \quad (18)$$

где $\rho_{ц}$, ρ_B – плотность цемента и воды соответственно, кг/м³.

7. Рассчитывают расход мелкого заполнителя:

$$\Pi = r \cdot (1 - V_T) \cdot \rho_{пг}, \quad (19)$$

где $\rho_{пг}$ – плотность зерен мелкого заполнителя, кг/м³.

8. Рассчитывают расход крупного заполнителя:

$$\Щ = (1 - r) \cdot (1 - V_T) \cdot \rho_{щг}, \quad (20)$$

где $\rho_{щг}$ – плотность зерен крупного заполнителя, кг/м³.

9. Определяют расчетную плотность бетонной смеси:

$$\rho_{бсм} = Ц + \Pi + \Щ + B. \quad (21)$$

Точность расчетов по предлагаемой методике проверялась по двум параметрам: расходам цемента и воды. Для составов, характеризующихся марками бетонных смесей по удобоукладываемости П1, П2, Ж1, Ж2, прочностью бетона от 15 до 60 МПа и различной отпускной прочностью после тепловой обработки, сопоставлялся расход цемента, взятый из [15] и рассчитанный по предлагаемой методике. В результате обработки полученных данных и сопоставительного статистического анализа получены результаты: коэффициент вариации отклонений расхода цемента по литературным данным от рассчитанного составил 5,3 % для бетона естественного твердения; 5,8 % – для бетона с отпускной прочностью 70 %; 5,4 % – для бетона с отпускной прочностью 80...85 % и 5,4 % – для бетона с отпускной прочностью 100 %.

На рис. 7 приведены кривые, построенные в результате расчета расхода воды по предлагаемой методике для широкого диапазона нормальной плотности цемента, получаемого при введении

в цементное тесто практически всех существующих в настоящее время пластифицирующих добавок. Экспериментальная проверка (в данной работе не приводится) соответствия рассчитанных и фактических расходов воды для добавок С-3

и Стахемент-2000, в целом, подтвердила работоспособность предложенной методики. На этот же график нанесены (в виде заштрихованной области) данные различных исследователей для цемента с нормальной плотностью 27...30 %.

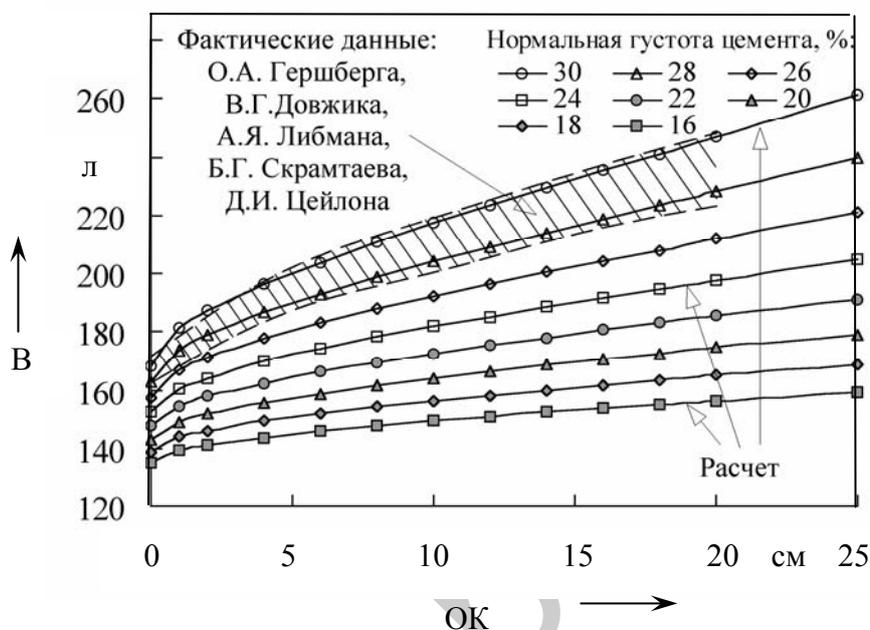


Рис. 7. Зависимость расхода воды В от осадки конуса бетонной смеси

Из представленных материалов видно, что точность расчетов основных компонентов бетонных смесей достаточно высока. Следовательно, рассмотренная методика может успешно применяться для расчета составов тяжелого бетона проектного возраста с требованиями по прочности, а при наличии формул, увязывающих водоцементное отношение с особенностями структуры бетона, – также по морозостойкости, водонепроницаемости и иным параметрам. Существенное удобство методики в том, что достаточно просто учитывается влияние пластифицирующих добавок – посредством учета нормальной плотности цемента.

Рассмотрим еще один важный вопрос, пока не решенный современным бетоноведением – проектирование состава бетона для конструкции, твердеющего в

различных температурно-влажностных условиях. В этом случае технологу необходима информация о кинетике твердения бетона, для чего предложенную методику следует дополнить формулами, позволяющими учитывать ряд факторов: время и особенности твердения изделия, минералогический состав цемента, вид и дозировку химических добавок и т. д.

Ранее нами была получена (посредством модификации формулы И. В. Вольфа) следующая зависимость:

$$f_6 = K_{в/ц} \cdot f_4 \cdot \frac{k_3}{\frac{100 \cdot В}{0,23 \cdot \alpha \cdot Ц} - 1}, \quad (22)$$

где $K_{в/ц}$ – коэффициент, зависящий от водоцементного отношения:

– при $V/C < 0,4$

$$K_{B/C} = \frac{0,75}{V/C};$$

– при $V/C \geq 0,4$

$$K_{B/C} = 1,6 - 0,5 \cdot (V/C - 0,4);$$

k_3 – коэффициент, учитывающий качество заполнителей; α – степень гидратации цемента, %.

Степень гидратации α входит в формулу (22) в качестве одного из основных влияющих факторов и для проектного возраста может быть рассчитана [16]:

– при $\frac{НГ}{100 \cdot (V/C)_T} < 1,65$

$$\alpha = 60 \cdot \frac{НГ}{100 \cdot (V/C)_T} - \sqrt[3]{\left(1,65 \cdot \frac{НГ}{100 \cdot (V/C)_T}\right)^2} \times e^{\frac{1,65 \cdot НГ}{100 \cdot (V/C)_T}}; \quad (23)$$

– при $\frac{НГ}{100 \cdot (V/C)_T} \geq 1,65$

$$\alpha = 70 + 5 \cdot \left(\frac{НГ}{100 \cdot (V/C)_T} - 1,65\right). \quad (24)$$

Степень же гидратации цемента в любом промежуточном возрасте (меньше или больше проектного) в долях от степени гидратации в проектном возрасте, рассчитываемой по (23) или (24), определяется рядом влияющих факторов [16]:

$$\alpha_{отн} = \frac{1 - \frac{C_3S}{100} \cdot e^{-\beta_1 \cdot \tau \cdot K_\phi} - \left(1 - \frac{C_3S}{100}\right) \cdot e^{-\beta_2 \cdot \tau \cdot K_\phi}}{1 - \frac{C_3S}{100} \cdot e^{-\beta_1 \cdot 28 \cdot K_\phi} - \left(1 - \frac{C_3S}{100}\right) \cdot e^{-\beta_2 \cdot 28 \cdot K_\phi}}; \quad (25)$$

$$K_\phi = k_t \cdot k_\phi \cdot k_w \cdot k_m \cdot k_s \cdot k_{SO_3} \cdot k_{du} \cdot k_{dp}, \quad (26)$$

где C_3S – содержание алита в цементе, %; τ – время твердения, сут; β_1 – уравнивающий коэффициент, зависящий от вида цемента; β_2 – коэффициент, зависящий от содержания минерала C_3A в цементе; k_t – коэффициент, зависящий от температуры твердения цементного камня (бетона); k_ϕ – коэффициент, зависящий от влажностных условий твердения цементного камня (бетона); k_w – коэффициент, зависящий от начального водосодержания цементного теста; k_m – коэффициент, зависящий от активности применяемого цемента; k_s – коэффициент, зависящий от тонкости помола цемента; k_{SO_3} – коэффициент, зависящий от содержания гипса в цементе; k_{du} – коэффициент, зависящий от вида и количества добавки-ускорителя; k_{dp} – коэффициент, зависящий от вида и количества пластифицирующей добавки.

Технолог, запроектировав состав по описанной методике, может далее в соответствии с (22) рассчитать прочность в любом требуемом возрасте бетона и, в случае несоответствия прочности заданному значению, откорректировать состав бетона. Таким образом, предложенная методика может быть адаптирована как к расчету кинетики роста прочности бетона в процессе тепловой обработки бетонных и железобетонных конструкций, так и, например, при зимнем их бетонировании.

Вывод

Предложенная методика, основанная на существующих в бетоноведении общепризнанных закономерностях, может быть успешно, с достаточной для практических расчетов точностью, использована при проектировании составов бетона бетонных и железобетонных конструкций с различными химическими добавками, твердеющих в естественных условиях и при тепловой обработке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ахвердов, И. Н.** Высокопрочный бетон / И. Н. Ахвердов. – М. : Стройиздат, 1961. – 163 с.
2. **Блещик, Н. П.** Структурно-механические свойства и реология бетонной смеси и прессвакуумбетона / Н. П. Блещик. – Минск : Наука и техника, 1977. – 232 с.
3. **Скрамтаев, Б. Г.** Способы определения состава бетона различных видов / Б. Г. Скрамтаев, П. Ф. Шубенкин, Ю. М. Баженов. – М. : Стройиздат, 1966. – 160 с.
4. **Баженов, Ю. М.** Способы определения состава бетона различных видов / Ю. М. Баженов. – М. : Стройиздат, 1975. – 272 с.
5. **Сизов, В. П.** Проектирование составов тяжелого бетона / В. П. Сизов. – М. : Стройиздат, 1979. – 144 с.
6. **Сторк, Ю.** Теория состава бетонной смеси / Ю. Сторк. – Л. : Стройиздат, 1971. – 238 с.
7. **Шмигальский, В. Н.** Оптимизация составов цементобетонов / В. Н. Шмигальский. – Кишинев : Штиинца, 1981. – 124 с.
8. **Шалимо, М. А.** Лабораторный практикум по технологии бетонных и железобетонных изделий : учеб. пособие / М. А. Шалимо. – Минск : Выш. шк., 1987. – 196 с.
9. **Шлаен, М. Ш.** Концепция оптимального проектирования бетона / М. Ш. Шлаен // Бетон и железобетон. – 1992. – № 1. – С. 15–16.
10. **Ушеров-Маршак, А. В.** Информационная технология бетона ускоренного твердения / А. В. Ушеров-Маршак, А. Г. Синякин // Бетон и железобетон. – 1994. – № 6. – С. 2–4.
11. **Краковский, М. Б.** ЭВМ-программа для контроля, учета и регулирования производства бетона / М. Б. Краковский, М. И. Бруссер // Бетон и железобетон. – 2000. – № 1. – С. 8–9.
12. **Горшков, В. А.** Автоматизированное рабочее место для заводской лаборатории / В. А. Горшков, Э. Г. Соркин // Бетон и железобетон. – 2000. – № 3. – С. 23–26.
13. **Ушеров-Маршак, А. В.** «Термобетон-М» – информационная технология монолитного бетона / А. В. Ушеров-Маршак, Ю. Б. Гиль, А. Г. Синякин // Бетон и железобетон. – 2000. – № 4. – С. 2–5.
14. **Бабицкий, В. В.** Многофакторное проектирование состава бетона / В. В. Бабицкий, Я. Н. Ковалев // Материалы, технологии, инструменты. – 2005. – № 1. – С. 67–71.
15. **СНиП 5.01.23–83.** Типовые нормы расхода цемента для приготовления бетонов сборных и монолитных бетонных, железобетонных изделий и конструкций. – М. : Стройиздат, 1985. – 44 с.
16. **Бабицкий, В. В.** Прогнозирование степени гидратации цемента с химическими добавками / В. В. Бабицкий // Материалы, технологии, инструменты. – 2005. – № 1. – С. 76–79.

Белорусский национальный технический университет
Материал поступил 21.01.2009

N. V. Sukhadoeva, V. V. Babitski
Technique of concrete structure designing

The universal technique of concrete structure designing, taking into account hardening conditions of products and also influence of chemical additives is offered in the article.