

Блещик Н.П., Бабицкий В.В.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ БЕТОНА

Технология бетона (как сборного, так и монолитного) ориентирована в основном на создание материала с заданными прочностными характеристиками, морозостойкостью, водонепроницаемостью, коррозионной стойкостью. Для реализации этой задачи создана соответствующая математическая база и, в первую очередь, – многочисленные методики проектирования состава бетона.

Вместе с тем, в настоящее время имеет место смещение ориентиров при проектировании бетонных и железобетонных конструкций. И прочность уже не является доминирующим свойством материала, поскольку обобщенной характеристикой механических свойств бетона становится диаграмма его деформирования [1]. Кроме того, знание модуля упругости бетона важно для оценки устойчивости защитного слоя к трещинообразованию при коррозии стальной арматуры, долговечности бетона при эксплуатации конструкций в переменных температурно-влажностных условиях и др..

В связи с этим стоит задача разработки методики проектирования состава бетона с учетом не только традиционных параметров бетона (прочности, морозостойкости, водонепроницаемости), но деформативных свойств бетона, характеризуемых, в первую очередь, модулем упругости при сжатии.

Обычно переход от прочности бетона к его модулю упругости осуществляется посредством таблиц (ряд классов бетона по прочности на сжатие и соответствующий ему ряд модулей упругости), графиков (в тех же координатах), а также формул. Многочисленные зависимости для расчета модуля упругости бетона (как отмечается в [2], их не менее 50) в качестве основного влияющего фактора принимают обычно прочность бетона. Они, как правило, объективны только для отдельных выборок.

Существенный вклад в разработку обобщенной зависимости для расчета модуля упругости бетона внес Ахвердов И.Н. [3]

$$E_b = \frac{I}{\frac{V'_{кз}}{E_{кз}} \cdot k'_3 + \frac{V'_{p\ min}}{E_{pc}} \cdot k_k + \frac{V'_{p\ max}}{E_{кз}} \cdot k_m}, \text{ МПа. (1)}$$

Достоверная зависимость получена Блещиком Н.П. и Рыскиным М.Н. [4]

$$E_b = m_1 \left/ \left(\frac{I}{E_3^I} \cdot \frac{m_3}{m_1} + \frac{I}{E_{цк}^I} \cdot \frac{m_{цк}^I}{m_1} \right) \right. + E_{цк} \cdot m_{II}, \text{ МПа. (2)}$$

Эти зависимости имеют ясный физический смысл, универсальны, но сложны при ручных расчетах. Оперативные же расчеты по ним требуют наличия вычислительной техники и соответствующего программного обеспечения.

Существенный вклад в прогнозирование деформативных характеристик бетона внес Щербаков Е.Н. Предложенное им выражение [2] – внешне достаточно простое, но, тем не менее, многофакторное, рассматривающее бетон как неоднородный многокомпонентный материал

$$\frac{I}{E_b} = \frac{S}{E_{km}} \cdot \frac{p_T}{R_T} + \frac{p_T}{E_{km}} + \frac{I - p_T}{E_{zn}}, \text{ ГПа, (3)}$$

где S - постоянный коэффициент (может быть принят равным 80 МПа); E_{km} - теоретически возможное предельное значение модуля упругости чистого цементного камня при неограниченном возрастании его прочности, ГПа; p_T - относительное по массе содержание цементного теста в бетонной смеси, доли единицы; R_T - прочность бетона в момент приложения нагрузки, МПа; E_{zn} - модуль упругости заполнителя, ГПа.

К числу достоинств зависимости (3) Щербаков Е.Н. относит:

- все члены уравнения поддаются физической интерпретации;
- математическая обработка более 1600 результатов подтвердила ее приемлемость;
- модель хорошо объясняет известные факты и выявляет новые;
- позволяет прогнозировать модуль упругости обширного ряда бетонов, включая и цементный камень.

Интересно, что автор модели (3) делает вывод и о том, что «... не может быть однозначной зависимости между упругими деформациями и прочностью бетона, а предпринимаемые многие годы попытки уточнить ее бессмысленны и с теоретической и со статистической точек зрения...».

Зависимость (3) может быть легко встроена в любой метод подбора состава бетона, поскольку для расчета по ней необходимы только значения расходов цемента и содержания воды в цементном тесте, прочности бетона и модуля упругости крупного заполнителя, а величины S и E_{km} постоянны. Но в то же время, на наш взгляд, выражение (3) имеет не вполне корректный физический смысл по той простой причине, что не учитывает такой изменяющийся фактор, как модуль упругости цементного камня, кстати, нашедший отражение в выражениях (1) и (2).

Для расчета модуля упругости цементного камня можно взять за основу формулу Т.Гансена, связывающего модуль упругости цементного камня $E_{цк}$ с модулем упругости плотного (без капиллярных пор) цементного камня $E_{пл}$ и относительным объемом капиллярных пор $V_{кп}$, то есть учитывающую его структурные особенности

$$E_{цк} = E_{пл} \cdot (1 - V_{кп})^4, \text{ ГПа. (4)}$$

Если принять модуль упругости плотного цементного камня равным 52 ГПа [5], а к капиллярной пористости цементного камня Π_k (в долях единицы) приплюсовать относительный объем воздуха в цементном тесте V_a , (отношение объема воздуха к объему цементного теста), то выражение (4) можно представить в виде

$$E_{цк} = 52 \cdot [1 - (\Pi_k + V_a)]^n, \text{ ГПа. (5)}$$

Сопоставительный анализ, проведенный на компьютерной модели, показал, что показатель степени n не является величиной постоянной, а изменяется в зависимости от относительного водосодержания цементного теста X_m (отношение водоцементного отношения цементного теста к коэффициенту нормальной плотности цемента):

Блещик Николай Павлович, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Белорусского научно-исследовательского института строительства.

Бабицкий В.В., кандидат технических наук, доцент каф. строительных материалов и изделий Белорусского национального технического университета.

при $X_m \leq 0,876$ $n = 4$,

а при $X_m > 0,876$ $n = 4 - 0,8 \cdot (X - 0,876)^{1,5}$. (6)

Капиллярную пористость цементного камня можно рассчитать по различным, в том числе сравнительно простым зависимостям, предложенным Горчаковым Г.И. и Шейкиным А.Е., учитывающим водоцементное отношение цементного теста и степень гидратации цемента. В свою очередь, степень гидратации цемента может быть количественно оценена по математическим моделям, ранее предложенными авторами.

Водоцементное отношение цементного теста определяют по значению водоцементного отношения бетонной смеси с учетом воды, поглощенной мелким и крупным заполнителем.

Содержание воздуха в цементном тесте рассчитывают по выражению, полученному Блещиком Н.П. [6], как функцию относительного водосодержания цементного теста

$$V_a = \frac{I}{183 \cdot X_m^2 - 127 \cdot X_m}, \text{ доли ед.} \quad (7)$$

Сопоставим расчеты модуля упругости цементного камня по выражению (5) с экспериментальными результатами, систематизированными в [7]. На рис. 1 представлены значения модуля упругости цементного камня в связи с водосодержанием цементного теста.

В области низкого относительного водосодержания цементного теста были использованы значения динамического модуля упругости образцов, изготовленных посредством технологии «сухого» формования – прессование сухого цемента с последующим вакуумированием и пропиткой водой.

Как следует из графика на рис. 1, результаты расчетов по предлагаемой модели достаточно плотно укладываются в общий массив приведенной выборки, что свидетельствует о практической приемлемости выражения (5). Перелом рассчитываемых значений в области относительного водосодержания около 0,8 объясняется тем, что при «сухом» формовании (а расчеты при $X_m < 0,8$ даны применительно именно к этой технологии) воздух в цементном тесте отсутствует.

Анализ компьютерной модели выражения (3), проведенный на имеющихся в литературных источниках данных, показал, что введение в модель величины модуля упругости цементного камня ($E_{цк}$) не как постоянной величины, а как переменного фактора, повышает точность вычислений. На основании результатов обобщения многочисленных экспериментальных данных, в том числе приведенных в [4], формула (3) представлена в следующем виде

$$E_o = \frac{I}{\frac{S}{E_{цк}} \cdot \frac{p_T}{R_o} + \frac{p_T}{E_{цк}} + 0,5 \cdot \frac{I - p_T}{E_m}}, \text{ ГПа.} \quad (8)$$

где S - постоянный коэффициент, принимаемый равным 55 МПа).

Сравнение расчетных значений, полученных по выражению (8), с табличными данными, приведенными в нормативных документах, и устанавливающими связь между классом бетона по прочности на сжатие и его модулем упругости представлено на рис. 2. На нормируемые данные (заштрихованные области) наложены рассчитанные (во всех случаях модуль упругости гранитного щебня принят равным 55 ГПа) применительно к бетонной смеси марки П1 на цементах различных марок. Полученные результаты показывают вполне удовлетворительное соотношение расчетных и нормативных значений модуля упругости бетона.

Применительно к высокопрочным бетонам был проведен анализ достоверности расчетов по различным зависимостям. Для этого авторы воспользовались выборкой фактических данных (в количестве 48 составов), в систематизированном виде приведенных в [7]. Полученные статистические характеристики (как отклонение рассчитываемых результатов от фактических) приведены в таблице

Приведенные данные убедительно свидетельствуют о приемлемости предлагаемой модели.

Таким образом, получена достаточно простая математическая модель для прогнозирования модуля упругости бетона, легко встраиваемая в любую существующую методику подбора состава бетона.

Приведем блок-схему (рис. 3), в соответствии с которой может быть реализован подбор состава бетона с учетом модуля упругости бетона. Согласно ей, в зависимости от требуемых прочностных параметров бетона и характеристик бетонной смеси вначале по традиционной схеме рассчитывают водоцементное отношение бетонной смеси. После расчета особых свойств бетона – морозостойкости и водонепроницаемости, уточняют значение прочности бетона, рассчитывают расходы компонентов бетонной смеси. И далее рассчитывают структурные характеристики цементного камня, модуль его упругости и модуль упругости бетона. При несоответствии рассчитанного модуля упругости бетона заданному производят корректировку состава бетона и повторный расчет модуля упругости бетона.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Пецольд Т.М., Тур В.В. Предпосылки разработки и построение новых норм Беларуси по проектированию бетонных и железобетонных конструкций. В кн.: Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров в Республике Беларусь: Материалы VI Международного научно-технического семинара (Минск, 17-20 октября 2000 г.) / Под ред. Н.П.Блещика, А.А.Борисевича, Т.М.Пецольда. – Мн.: УП «Технопринт», 2000. С. 127-133.
2. Щербак Е.Н. Прогнозирование физико-механических характеристик бетона как неоднородного материала сложной структуры. Исследования деформаций, прочности и долговечности бетона транспортных сооружений (к IX Всесоюзной конференции по бетону и железобетону). Сб. научных трудов. М.: Всесоюзный научно-исследовательский институт транспортного строительства, 1983. С. 5-21.
3. Ахвердов И.Н., Смольский А.Е., Скочелас В.В.. Моделирование напряженного состояния бетона и железобетона. Мн.: «Наука и техника», 1973. С. 232.
4. Блещик Н.П., Рыскин М.Н. Структурное моделирование механических свойств высокопрочного бетона. В кн.: Эффективные строительные материалы, конструкции и технологии. Сб. трудов под редакцией Н.П. Блещика. Мн.: УП «Технопринт», 2000. С. 51-63.
5. Хубова Н.Г. Прогнозирование деформаций тяжелого бетона при кратковременном сжатии. Исследования деформаций, прочности и долговечности бетона транспортных сооружений (к IX Всесоюзной конференции по бетону и железобетону). Сб. научных трудов. М.: Всесоюзный научно-исследовательский институт транспортного строительства, 1983. С. 29-38.
6. Блещик Н.П. Структурно-механические свойства и реология бетонной смеси и прессвакуумбетона. Мн.: «Наука и техника», 1977. – 232 с.
7. Рыскин М.Н. Структурно-механические свойства и технология высокопрочного бетона: Дис. ... канд. тех. наук: 05.23.05 / БНТУ – Минск, 2002 – 305 с.

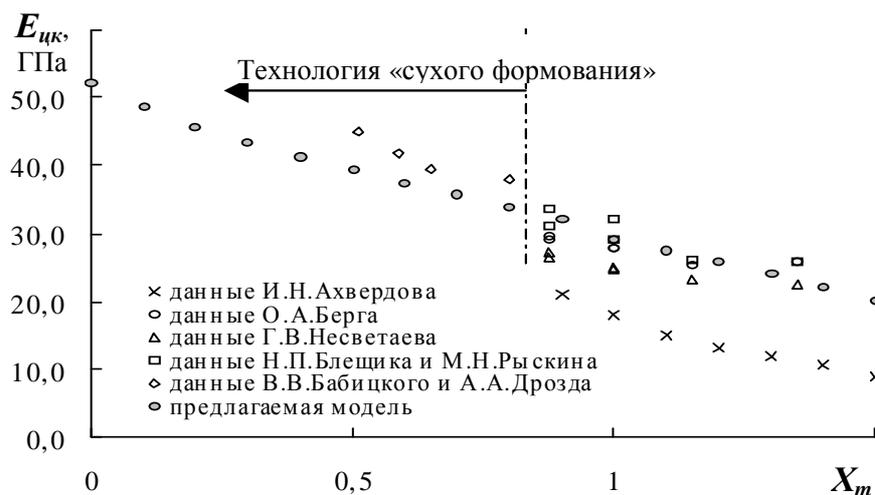


Рис. 1. Зависимость модуля упругости цементного камня ($E_{цк}$) от относительного водосодержания цементного теста (X_m)



Рис. 2. Зависимость модуля упругости бетона от класса бетона по прочности на сжатие (С)

Таблица. Статистическая обработка результатов

Зависимости	Среднее квадратичное отклонение, ГПа	Коэффициент вариации, %
Американские нормы	13,4	30,4
Ахвердова И.Н.	7,7	17,3
Графа	5,7	13,0
СНиП 2.03.01-84	4,9	11,1
Роша	4,8	11,0
Клеблеева Э.К.	4,8	10,8
Блещика Н.П. и Рыскина Н.М	4,4	10,0
Щербакова Е.Н.	4,0	9,1
Предлагаемая модель	3,4	7,6

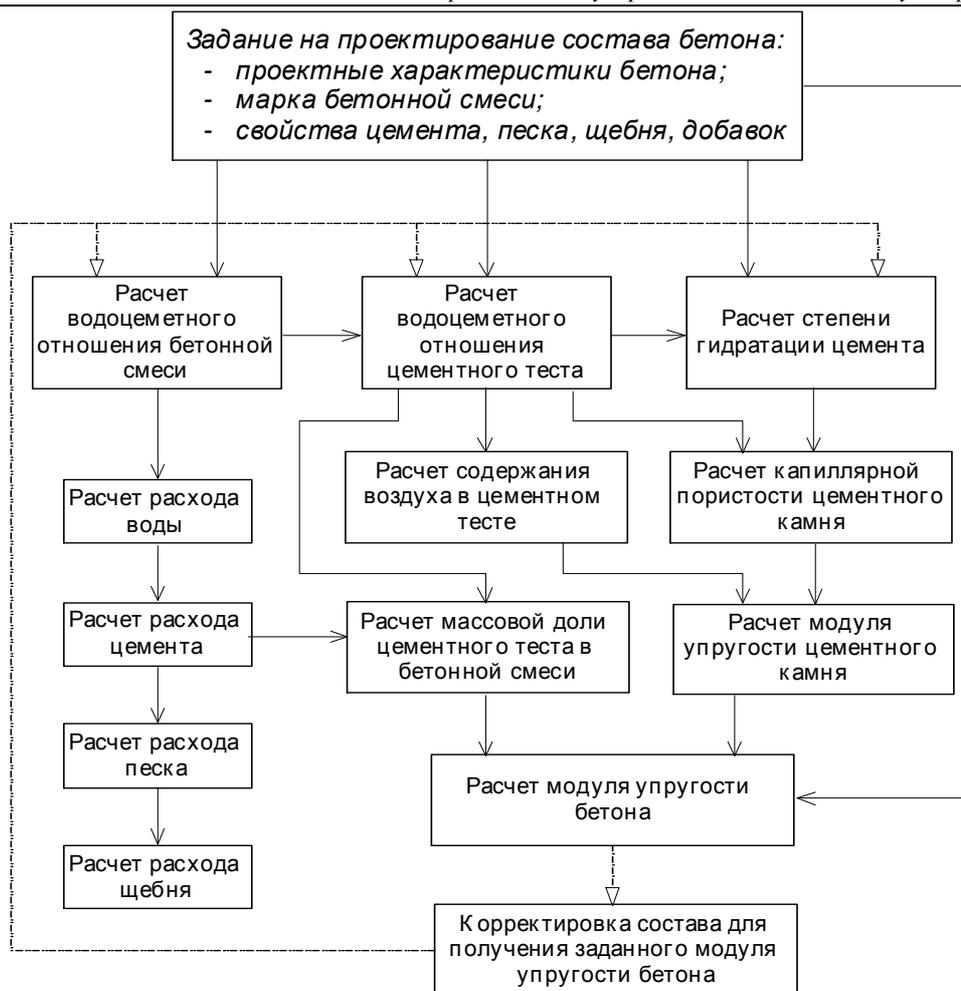


Рис. 3. Блок-схема расчета модуля упругости бетона

УДК 666.97

Блещик Н.П., Бабицкий В.В.

РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД ПРОЕКТИРОВАНИЯ СОСТАВА БЕТОНА С УЧЕТОМ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ

Ранее нами была предложена математическая модель для оценки модуля упругости бетона. Однако расчеты деформативных свойств бетона, оторванные от конкретного варьирования его составом, носят в известной степени познавательный характер и не имеют существенной практической ценности. В связи с этим предлагается метод проектирования состава бетона, который ввиду сложности исходной математической модели представлен в виде системы номограмм. Технику работы с номограммами рассмотрим на конкретном примере.

Предположим, необходимо подобрать состав бетона, обеспечивающий класс бетона по прочности на сжатие С20/25. Подвижность бетонной смеси, требуемая условиями работ, характеризуется осадкой конуса 3,5 см (марка П1).

В соответствии с требованиями СНБ 5.03.01-02 «Бетонные и железобетонные конструкции» модуль упругости должен быть 32 ГПа.

Для приготовления бетонной смеси используют цемент порландский (марка М400, нормальная плотность 27 %), щебень гранитный (крупность 30 мм, модуль упругости 63 ГПа) и природный кварцевый песок.

Проектирование состава бетона осуществляют в следующей последовательности.

Водоцементное отношение бетонной смеси, обеспечивающее класс бетона по прочности на сжатие $C^{20}/_{25}$, рассчитывают по номограмме на рис. 1. На шкале «Класс бетона по прочности на сжатие» откладывают точку $M_1 (C^{20}/_{25})$ и от нее через точку M_2 (активность для цемента М400 может быть принята равной 40 МПа) проводят прямую до получения точки M_3 (водоцементное отношение бетонной смеси равно 0,474).

По номограмме на рис. 2 определяют расход воды, обеспечивающий заданную удобоукладываемость бетонной смеси. Поскольку в примере бетонная смесь характеризуется подвижностью, то используют номограмму а). На шкале