

Блещик Н.П.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МОДУЛЯ ДЕФОРМАЦИЙ БЕТОНА НА ОСНОВЕ СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ С УЧЕТОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ БЕТОННОЙ СМЕСИ

С целью дальнейшего совершенствования методики расчета бетонных и железобетонных конструкций и новых конструктивно-технологических долговечных систем зданий и сооружений разработаны европейские нормы - Еврокод 2 [1] и проект СНБ 5.03.01 "Конструкции бетонные и железобетонные. Нормы проектирования" [2]. В указанных нормативных документах за основу принята деформационная модель расчета конструкций, как по первой, так и по второй группам предельных состояний. В этой связи наряду с прочностными характеристиками бетона важное значение приобретают его деформативные характеристики: модуль упругости и относительные деформации, соответствующие расчетному сопротивлению и предельной сжимаемости. В предлагаемой статье рассматриваются лишь предложения по нормированию модуля упругости бетона с указанием расчетных предпосылок по определению секущего модуля деформаций.

В Еврокоде 2 средний модуль упругости бетона E_{cm} (в ГПа) назначается в зависимости от цилиндрической прочности бетона f_{cm} (в МПа) по формуле:

$$E_{cm} = 22[(f_{cm})/10]^3. \quad (1)$$

При этом не учитывается влияние крупности и вида заполнителя, объемной концентрации и деформативных свойств цементного камня, условий выдерживания бетона при формировании его структуры. Эти факторы в совокупности могут изменять модуль упругости при одной и той же прочности бетона в два и более раз.

В действующих нормах [3] модуль упругости бетона также определяется в зависимости от прочностных характеристик бетона. Однако в них, кроме того, учитывается влияние мелкозернистого заполнителя и условий твердения бетона (естественного и подвергнутого тепловой обработке). Так же, как и в Еврокоде 2, учитывается влияние свойств и объемной концентрации цементного камня.

Изменение объемной концентрации цементного камня в бетоне при фиксированной прочности обуславливается изменением удобоукладываемости бетонной смеси. Следовательно, при прочих равных условиях модуль упругости бетона должен также зависеть от удобоукладываемости бетонной смеси. Об этом свидетельствуют многочисленные экспериментальные данные, в том числе приведенные в [4], которые подтверждают изменения модуля упругости бетона в зависимости от подвижности смеси в 1,4...1,6 раза. Этот фактор в какой-то мере учитывается в нормах для гидротехнических сооружений [5]. В них дифференцированы значения модуля упругости по трем группам удобоукладываемости бетонной смеси: до 4 см осадки конуса, 4...8 и свыше 8 при максимальном размере крупного заполнителя 40, 80 и 120 мм. При этом прочностные характеристики бетона ограничиваются классом В 35. Естественно, что рекомендации норм [5] не могут быть распространены на все виды бетонных и железобетонных конструкций.

Приведенный краткий анализ характеристик модуля упругости, назначаемых по известным нормам проектирования бетонных и железобетонных конструкций, свидетельствует о необходимости изыскания новых критериев их определения. На основе мирового опыта последних лет можно без сомнения утверждать о том, что такие критерии должны быть получены исходя из структурного моделирования физико-механических свойств композиционных гетерогенных материалов, к которым, несомненно, относятся и все виды бетонов. С использованием метода структурного моделирования к настоящему времени получены многие структурные формулы для расчета модуля упругости бетона, в том числе формулы: Хирча-Другилла, Хашина, Гансена, Щербакова, Шейкина, Ларрарда, Алфеса, Ахвердова, Свиридова, Несветаева и др. В этих формулах модуль упругости бетона рассчитывается с использованием объемных концентраций компонент бетона, их модулей упругости и различных коэффициентов, характеризующих контактное взаимодействие матрицы бетона, заполнителя и контактной зоны. В качестве матрицы бетона принимается как цементный камень, так и цементно-песчаный раствор.

Автором совместно с М.Н. Рыскиным [6] на основе разработанной структурно-механической модели бетона получена расчетная формула модуля деформаций бетона при уровне напряжений $\sigma_c/f_{cm} \leq 1$:

$$E_{cm} = \frac{m_I}{\frac{1}{E_3^*} \frac{m_3}{m_I} + \frac{1}{E_{ц.к}^*} \frac{m_{ц.к}}{m_I}} + E_{ц.к} m_{II}, \quad (2)$$

где m_I и m_{II} – объемные концентрации первого и второго блоков модели;

m_3 – объемная концентрация заполнителя (крупного и мелкого) в бетоне;

$m_{ц.к}$ – объемная концентрация цементного камня в первом блоке (находящемся в сложном напряженном состоянии);

$E_{ц.к}$ – модуль упругости цементного камня;

$E_{ц.к}^*$ и E_3^* – модули деформаций цементного камня и заполнителя в первом блоке, определяемые с учетом уровня напряжений в бетоне и сложного напряженного состояния первого блока.

В [6] показана удовлетворительная корреляция расчетной модели с многочисленными экспериментальными данными.

Разработана также математическая модель призменной прочности бетона и последовательность расчета структурно-механических характеристик бетона, реализованная в компьютерной программе "Модель бетона" (БелНИИС, 1999) на языке Фортран 77, которая позволяет прогнозировать механические свойства бетона по заданному составу и известным структурно-механическим характеристикам исходных материалов.

Однако на стадии проектирования бетонных и железобетонных конструкций состав бетона, как правило, остается неизвестным. В проекте лишь должны указываться: предельная крупность заполнителя, т.е. обычный тяжелый бетон или мелкозернистый бетон; горная порода крупного заполнителя; условия твердения (естественные или тепловая обработка); рекомендуемая удобоукладываемость бетонной смеси по действующим нормативно-техническим документам, например, по СНиП 3.09.01 с учетом СТБ 1035. Следовательно, в разрабатываемом СНБ 5.03.01 показатели модуля упругости бетона должны быть дифференцированы в зависимости от указанных факторов.

Модуль упругости мелкозернистого бетона по многочисленным экспериментальным данным, в том числе и по нормам [3], меньше модуля упругости равнопрочного тяжелого бетона на 10...20 %. Это обусловливается, в основном, повышенным содержанием цементного камня, обладающего более высокой деформативностью по сравнению с деформативностью заполнителей. В формуле (2) первый член, дающий наибольший вклад в расчетный модуль упругости бетона, для мелкозернистого бетона более существенно снижается за счет уменьшения значения m_I по сравнению с увеличением второго члена за счет роста m_{II} , т.е. увеличения межзерновой пустотности заполнителя. Компьютерный анализ соотношений

Таблица 1

Марка смеси по удобоукладываемости	Средний модуль упругости бетона (ГПа) классов:														
	8/10	12/15	16/20	20/25	25/30	30/37	35/45	40/50	45/55	50/60	55/67	60/75	70/85	80/95	90/105
Ж-3, Ж-4 СЖ1...СЖ3	-	-	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	49	50	52
Ж1...Ж2	-	31	35	37	38	40	41	42	43	44	45	46	47	49	51
П1...П2	24	27	31	32	35	37	38	39	40	41	42	43	45	46	48
П3...П5	21	24	28	29	32	33	35	37	38	39	-	-	-	-	-
Л1...Л5	19	22	25	26	28	29	32	35	-	-	-	-	-	-	-

Примечания:

1. При назначении среднего модуля упругости бетона марка бетонной смеси принимается в соответствии с рекомендациями СНиП 3.09.01 с учетом СТБ 1035.
2. Значения среднего модуля упругости приведены для бетонов естественного твердения. Для бетонов, подвергнутых тепловой обработке, приведенные значения следует умножать на коэффициент 0,9.
3. Приведенные значения среднего модуля упругости действительны для бетонов, приготовленных с применением гравия и гранитного щебня с крупностью зерен до 40 мм. Для мелкозернистых бетонов приведенные значения следует умножать на коэффициент 0,85.

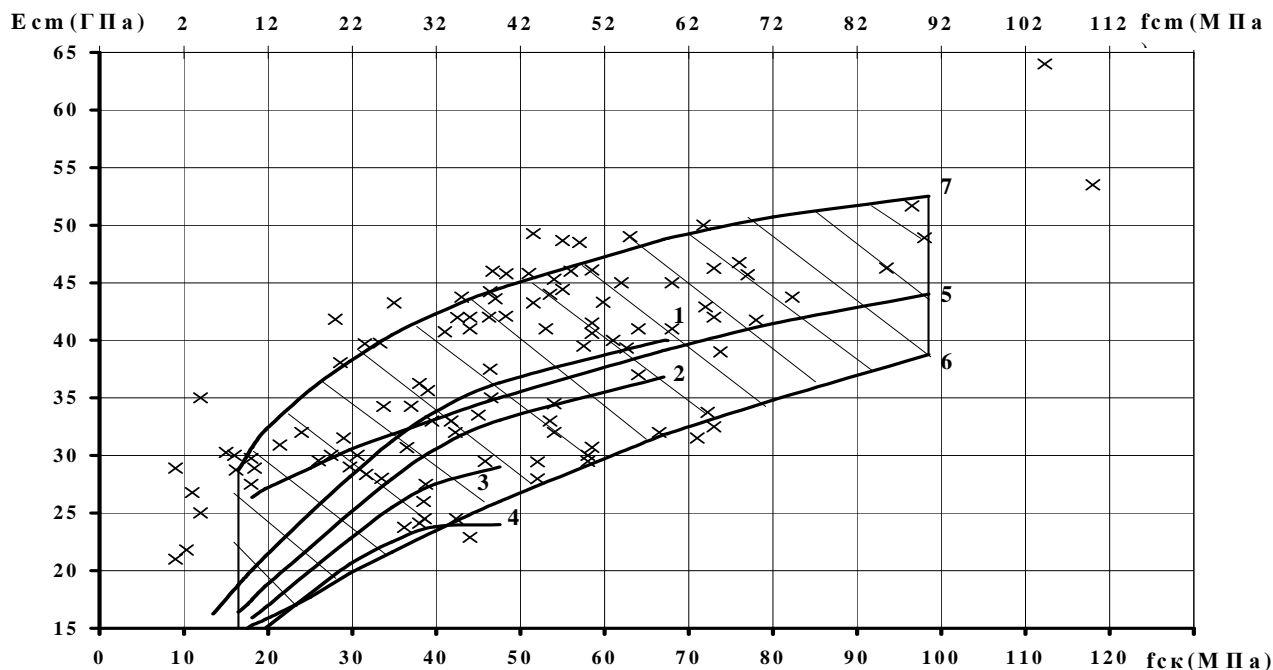


Рисунок 1 - Корреляция экспериментальных данных среднего модуля упругости бетона с нормируемыми зависимостями по:

- 1 - СНиП 2.03.01-84* для бетонов естественного твердения; 2 - то же для теплообработанных бетонов;
- 3 - то же для мелкозернистых бетонов естественного твердения; 4 -то же для теплообработанных бетонов; 5 - Еврокоду 2;
- 6 -СНБ 5.03.01 минимальные значения; 7 - то же максимальные значения. X - экспериментальные данные различных авторов [4,8 - 13].

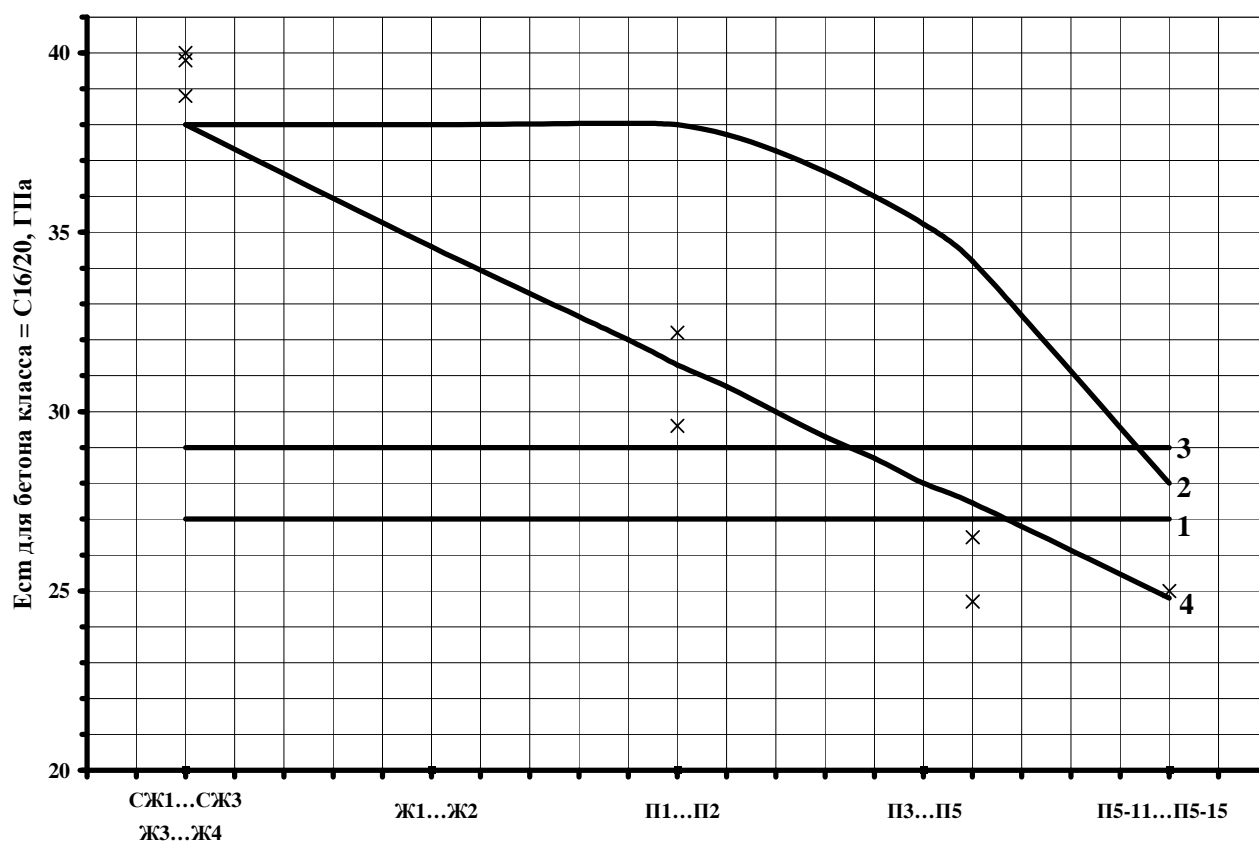


Рисунок 2 - Влияние марки бетонной смеси по удобоукладываемости на модуль упругости тяжелого бетона класса С 16/20 естественного твердения, выраженное: 1 - СНиП 2.03.01-84*; 2 - СНиП 2.06.08-87; 3 - Еврокод 2; 4 - проектом СНБ 5.03.01; X - экспериментальными данными, приведенными в [4].

модулей упругости тяжелого и мелкозернистого бетона позволил рекомендовать значение переходного коэффициента, равного 0,85 для классов бетона более С 8/10.

При форсированной тепловой обработке бетона, как правило, формируется более деформативная кристаллизационная структура цементного камня, которая обуславливает снижение деформативных характеристик прогреваемых бетонов. По [3] это снижение составляет 10 %, которое следует сохранить и в рекомендациях новых норм.

Что касается влияния вида горной породы крупного заполнителя, то для условий Беларуси следует принимать один вид – гранит Микашевичского карьера. При использовании заполнителей других горных пород следует устанавливать деформативные характеристики бетона в результате постановки специальных исследований.

Для установления дифференцированного влияния марки бетонной смеси по удобоукладываемости на модуль упругости бетона были выполнены расчеты по программе "Модель бетона" с использованием полученных ранее математических моделей жесткости и подвижности бетонной смеси [7], а также проанализированы результаты [4,8-13], на основании которых получены данные, приведенные в таблице 1. Как следует из приведенных данных, средний модуль упругости бетона E_{cm} в зависимости от марки бетонной смеси по удобоукладываемости может изменяться на 20...50 %.

На рисунке 1 представлены экспериментальные данные и нормативные зависимости модуля упругости бетона от средней f_{cm} и нормативной f_{ck} прочности бетона при сжатии по: СНиП 2.03.01-84*, Еврокоду 2 и проекту СНБ 5.03.01.

Приведенные данные свидетельствуют о том, что кривая 5, построенная на предложенной Еврокодом 2 приближительной зависимости (1), проходит по середине всей совокупности экспериментальных данных, полученных для бетонов с призмной прочностью от 17 до 98 МПа. Максимальные и минимальные отклонения опытных данных от нормируемых составляют + 43 и –33 %.

Кривая 1, отражающая нормативные данные для бетонов естественного твердения по СНиП 2.03.01-84*, в какой-то степени отражает экспериментальные данные для бетонов с призмной прочностью от 30 до 65 МПа. Для бетонов с $f_{cm}=17$ МПа нормативные данные занижены в 1,6 раза.

Кривые 6 и 7 соответственно отражают минимально нормируемые значения E_{cm} для литевых бетонных смесей класса Л1...Л5 и максимальные значения для жестких и сверхжестких бетонных смесей классов Ж3...Ж4 и СЖ1...СЖ3. Заштрихованная область представляет собой поле нормируемых значений модуля упругости бетона по проекту СНБ 5.03.01. Как видно из рис. 1, большинство экспериментальных данных находится в заштрихованной области.

На рисунке 2 показано влияние марки бетонной смеси по удобоукладываемости на модуль упругости тяжелого бетона класса С 16/20 естественного твердения, отражаемое различными нормативными документами. Как видно из приведенных экспериментальных данных, полученных в работе [4], модуль упругости одного класса бетона на сжатие, приготовленного из сверхжесткой и литой бетонной смеси, изменяется от 40 до 25 МПа, т.е. в 1,6 раза. Это изменение никак не учитывается ни СНиП 2.03.01-84*, ни Еврокодом 2.

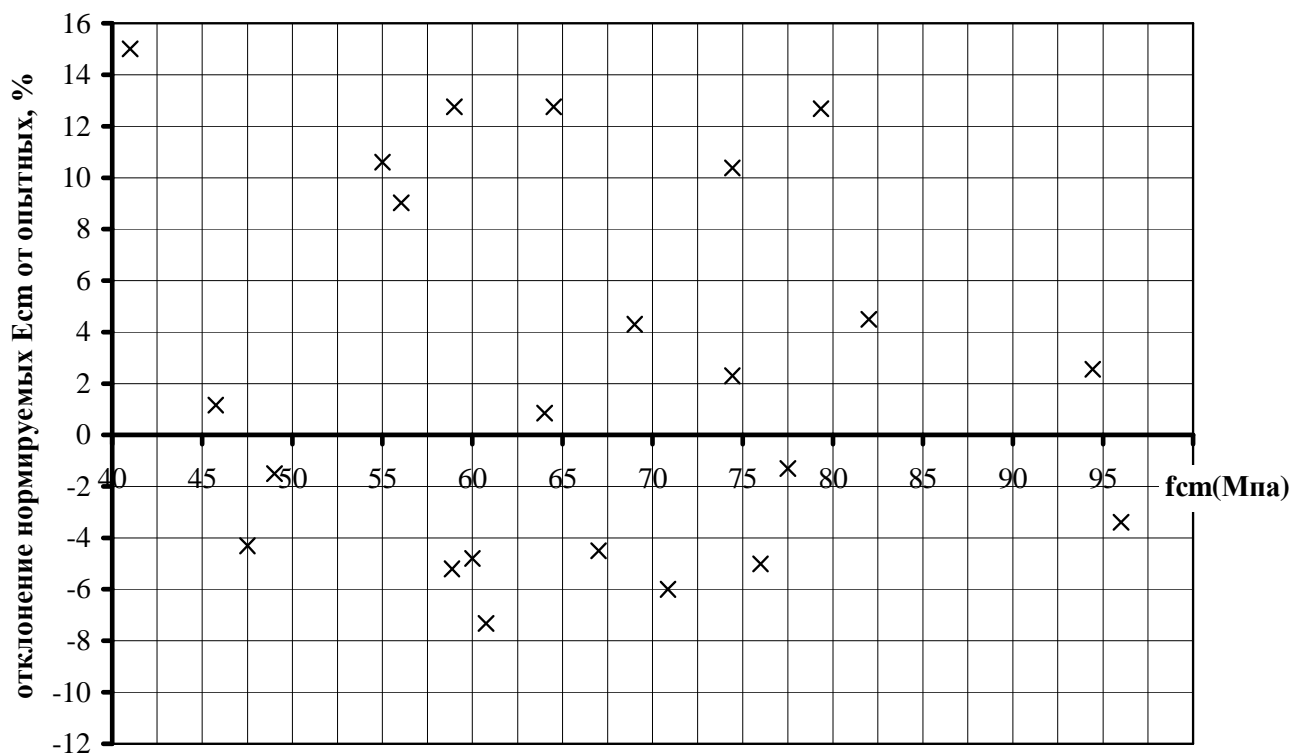


Рисунок 3 - Степень корреляции нормируемых значений E_{cm} с опытными данными различных авторов.

Зависимость 2 по СНиП 2.06.08-87 также не отражает реального влияния удобоукладываемости бетонной смеси, по-видимому, из-за значительной разницы в крупности заполнителей. Функциональная прямая 4, построенная по проекту СНБ 5.03.01, в наибольшей степени коррелируется с экспериментальными данными [4].

На рис. 3 представлены данные отклонений нормативных значений E_{cm} , установленных в проекте СНБ 5.03.01 от опытных результатов, полученных в работах [4,8-13]. Данные на рисунке 3 приведены для тех результатов, по которым имелась возможность получить значения варьируемых факторов. Как видно из представленных сравнений, максимальные отклонения не превышают +15, а минимальные -8 %, что в значительной степени выше прочности нормирования модуля упругости, принятой Еврокодом 2 и СНиП 2.03.01-84*.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Eurocode 2: Design of concrete structures Part 1: General rules and rules for buildings. Ref № pr EN 1992-1 (October 2001).
2. СНБ 5.03.01. Конструкции бетонные и железобетонные. Нормы проектирования (проект). Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. 2001.
3. СНиП 2.03.01-84*. Бетонные и железобетонные конструкции. Госстрой СССР. - М.: 1989.
4. Берг О.Я., Щербаков Е.Н., Писанко Г.Н. Высокопрочный бетон. - М.: Госстройиздат. - 1971. - 208 с.
5. СНиП 2.06.08-87. Бетонные и железобетонные конструкции гидротехнических сооружений. Госстрой СССР. - М.: 1987.

6. Блещик Н.П., Рыскин М.Н. Структурное моделирование механических свойств высокопрочного бетона. В кн.: Эффективные строительные материалы, конструкции и технологии. Сборник трудов Международной научно-практической конференции / Под ред. Блещика Н.П. - Мн. "Технопроект". 2000.- С. 51-63.
7. Пособие 5.03.01-96 к СНиП 3.03.01-87. Проектирование и возведение конструкций подземных частей полносборных зданий с рациональным применением монолитного бетона / Минстройархитектуры РБ. - Минск, 1997. - 153 с.
8. Александров С.Е. и др. Литой щебень из доменных шлаков и бетона на его основе. М.: Стройиздат, 1979. - 208 с.
9. Н.В. Свиридов, М.П. Савченко, В.М. Чесноков. Механические свойства особо прочного цементного бетона // Бетон и железобетон.-1991.-№ 2.- С. 7-9.
10. Секанделидзе А.А. Исследование высокопрочных тяжелых бетонов на местных заполнителях. Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. тех. наук. Тбилиси-1974, 25 с.
11. Результаты экспериментальных исследований прочностных и деформационных характеристик бетонов марок 600-1000. Киев, НИИСК., 1966.- 32с.
12. Бабаев Ш.Т., Комар А.А. Энергосберегающая технология железобетонных конструкций из высокопрочного бетона с химическими добавками. М.: Стройиздат, 1987. - 240 с.
13. Клеблеев Э.К. Свойства высокопрочных бетонов и железобетонных элементов из них при повторных нагрузках. Авт. канд. дисс. Киев, 1990. - 14 с.