

4. Рак Н.А. Влияние деформативности узла сопряжения колонны с фундаментом стаканного типа на напряженно-деформированное состояние рам каркасных зданий // Вестник БГТУ. Строительство и архитектура. – 2001. – № 1(7) – С.99-105.
5. Рак Н.А. Деформационная модель расчета стыка железобетонной колонны с фундаментом стаканного типа // Вестник БГТУ. Строительство и архитектура. – 2002. – № 1(13) – С.58-64.
6. Рак Н.А., Садовский Ю.И. Исследования деформативности податливых стыков колонн с подколонником фундамента глубокого заложения с использованием полимерных материалов // Вестник БГПА. – 2002. – № 2 – С.9-15.
7. Рак Н.А., Садовский Ю.И. Диаграммы деформирования стальных стыков железобетонных колонн с фундаментами при различных материалах заполнения // Вестник БНТУ. – 2003. – № 1 – С.3-6
8. Рак Н.А. Узлы сопряжения колонн с фундаментами при регулируемой изгибной жесткости // Будаўніцтва. Строительство. Construction. — 2003. — № 1-2 — С.300-307.
9. Пособие по проектированию жилых зданий. Вып.3. Конструкции жилых зданий (к СНиП 2.08.01-85) / ЦНИИЭП жилища Госкомархитектуры. – М.: Стройиздат, 1989. – 304 с.
10. Халил Мустафа Халил Альматальга. Контактные деформации в стыках сборно-монолитных конструкций: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / КИСИ. – Киев, 1991. – 15 с.
11. Жукьян А.П. Экспериментальные исследования прочности и деформативности бетона сжатой зоны шва // Вестник БГТУ. Строительство и архитектура. – 2003. – № 1(19) – С.45-48.
12. Провести научно-исследовательские работы по изучению влияния деформативности диска покрытия и узлов сопряжения на работу каркасов одноэтажных производственных зданий и разработать методику учета деформативности при расчете: Отчет о НИР (заключит.) / НИИЖБ и Белорус. политехн. ин-т; Рук. Т.М. Пецольд; № ГР 81086516; Инв. № 02820063501; Тема 24-Н-1-1-82. – М.–Минск, 1982. – 283 с.
13. ВСН 32-77 Инструкция по проектированию конструкций панельных жилых зданий / Госгражданстрой при Госстрое СССР. – М.: Стройиздат, 1978. – 176 с.

УДК 624.012.35

**Рак Н.А.**

## СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ БЕТОНА. 1. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МОДУЛЯ ДЕФОРМАЦИЙ БЕТОНА

### ВВЕДЕНИЕ

Наиболее перспективным направлением совершенствования теории прочности и деформативности бетона является структурный подход [1,2,3 и др.]. Разработанные математические модели, учитывающие структурно-механические показатели бетона и его компонентов, удовлетворительно моделируют деформативные свойства бетона для многих частных случаев. Вместе с тем, ни одна из предложенных моделей не обеспечивает надежного описания функции « $\sigma_c - \epsilon_c$ » для бетона в реальном диапазоне его прочностных и деформативных свойств.

С целью дальнейшего совершенствования структурных моделей прочности и деформативности бетона в [4] предложено дополнительно учитывать концентрацию напряжений в структурных элементах, свойства контактной зоны и сложное напряженное состояние отдельных элементов бетона. Соответствующая структурно-механическая модель представлена в виде двух параллельно сочлененных блоков. В первый блок входят заполнитель и часть цементного камня, расположенного в зоне контакта зерен заполнителя. Элементы блока находятся в трехосном напряженном состоянии. Второй блок представляет собой свободно деформируемый цементный камень, находящийся в межзерновом пространстве крупного и мелкого заполнителей.

Исходя из предложенной модели, получена математическая модель модуля деформаций бетона при любом уровне напряжений в пределах  $\sigma_c / f_c \leq 1$  в следующем виде

$$E_c = \frac{1}{\frac{m_{agr}}{E_{agr}'} + \frac{m_{cp}}{E_{cp}' \cdot m_I}} m_I + E_{cp}' \cdot m_{II}, \quad (1)$$

в которой  $m_I, m_{II}$  — объемные содержания первого и второго блоков;  $m_{agr}, m_{cp}$  — объемные концентрации заполни-

теля в бетоне и цементного камня в первом блоке;  $E_{agr}', E_{cp}'$  — модули деформаций заполнителя и цементного камня в первом блоке, соответствующие уровню напряжений и учитывающие их сложное напряженное состояние.

Несмотря на внешнюю привлекательность предложенной модели (1) и удовлетворительную сходимость расчетных значений модуля упругости бетона с некоторыми экспериментальными данными, она не в полной мере описывает поведение бетона в области  $\sigma_c / f_c \leq 1$ . Это обусловлено, прежде всего, недостаточно обоснованными значениями ряда коэффициентов, принятых при определении объемных концентраций элементов в блоках I и II, а также при определении функций распределения контактных напряжений в элементах блока I.

Решение задачи разработки аналитического метода, позволяющего находить параметры нелинейной диаграммы деформирования бетона как структурно неоднородного материала, наиболее рационально выполнять поэтапно [5, 6]. На первом этапе на основе расчета упругих конечно-элементных моделей структуры бетона изучить напряженно-деформированное состояние бетона при изменении в широком диапазоне параметров структуры. На втором этапе на основе анализа результатов расчетов конечно-элементных моделей разработать структурно-механическую модель бетона, которая позволяла бы с требуемой точностью описать его напряженно-деформированное состояние в стадии упругой работы составляющих бетона. На третьем этапе с использованием разработанной структурно-механической модели бетона рассчитать диаграмму его деформирования путем учета диаграмм деформирования элементов его структуры.

### АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ БЕТОНА

Конечно-элементная модель была принята в виде «правильной шестигранной призмы», в которой ряды равновеликих шаров заполнителя расположены с постоянным шагом в направлении действия усилий сжатия (рис. 1, а).

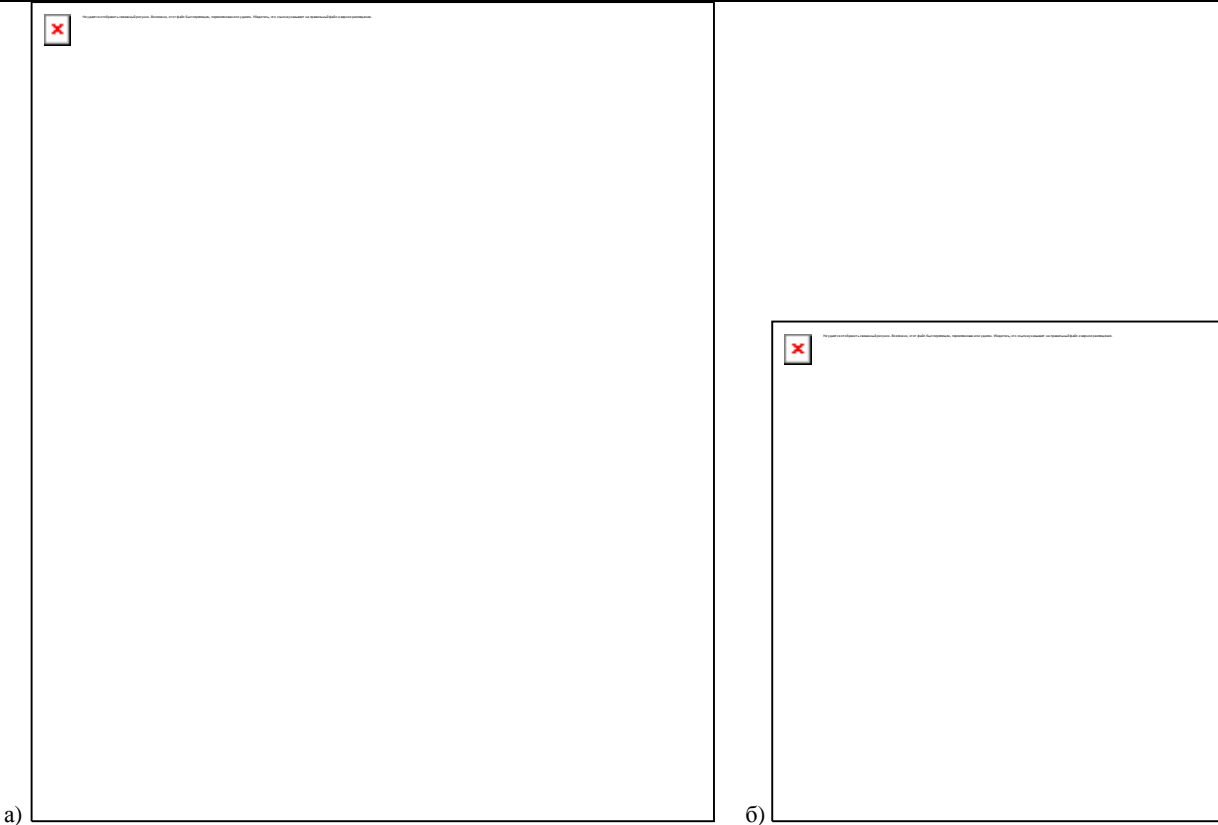


Рис. 1. Общий вид конечно-элементной модели (а) и ее фрагмента (б): 1/4 часть удалена для отображения внутренней структуры

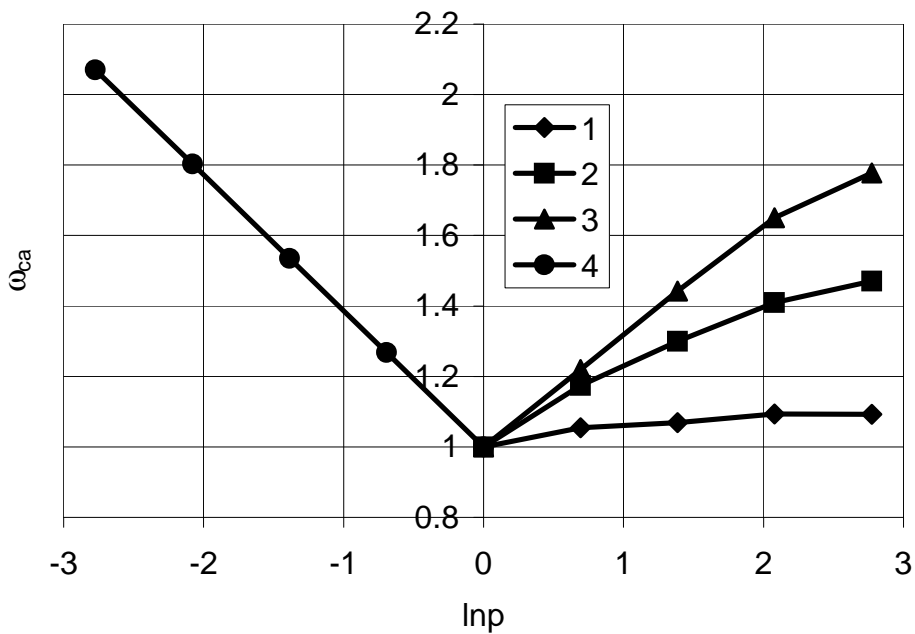


Рис. 2. Зависимость коэффициента концентрации напряжений  $\omega_{ca}$  от величины параметра  $p$  (1, 2, 3 – при  $p > 1$  и величинах коэффициента  $\alpha$  0,5; 0,25 и 0,154 соответственно, 4 – при  $p < 1$ )

Радиус зерна заполнителя рассчитывается по зависимости

$$r_{agr} = \frac{3}{S_{agr} \cdot \rho_{agr}}, \quad (2)$$

в которой  $S_{agr}$  и  $\rho_{agr}$  - соответственно удельная поверхность и плотность заполнителя.

Половина расстояния между зернами заполнителя в направлении действия сжимающих напряжений рассчитывается по зависимости

$$\delta_{mat} = \left( \sqrt[3]{\frac{(1 - m_{h.agr}) \cdot \rho_{agr}}{G_{agr}} - 1} \right) \cdot r_{agr}, \quad (3)$$

где  $m_{h,agr}$  - пустотность заполнителя в виброуплотненном состоянии;  $G_{agr}$  - расход мелкого заполнителя на  $m^3$  растворной части бетона или крупного заполнителя на  $m^3$  бетона.

Размер стороны шестигранной призмы определяется из условия обеспечения одинаковой величины объемной концентрации мелкого заполнителя в растворной части бетона либо крупного заполнителя в бетоне и в конечно-элементной модели.

Расчет выполнялся по трем конечно-элементным моделям, соответствующим изменению величины  $\alpha = \delta_{mat} / r_{agr}$  на трех уровнях (0,5; 0,25 и 0,154). При расчетах по каждой из конечно-элементных моделей варьировался параметр  $p = E_{agr} / E_{mat}$ . Уровни изменения параметра  $p$  принимались равными 1/16, 1/8, 1/4, 1/2, 1, 2, 4, 8 и 16.

В результате расчета моделей при диапазоне изменения  $p > 1$  были получены картины распределения напряжений, свидетельствующие о концентрации напряжений в матрице и заполнителе вдоль направления приложения усилий сжатия. Для каждого конечно-элементного расчета были определены величины коэффициента концентрации напряжений  $\omega_{ca}$ , равные отношению напряжений в матрице по оси модели (в средней плоскости фрагмента на рис. 1, б) к средним напряжениям в заполнителе по верхней плоскости модели (верхняя плоскость фрагмента на рис. 1, б). Зависимости коэффициента концентрации напряжений  $\omega_{ca}$  от величины параметра  $p$  при различных величинах  $\alpha$  приведены на рис. 2.

Картины распределения напряжений при диапазоне изменения  $p < 1$  свидетельствуют о том, что с уменьшением параметра  $p$  по верхней плоскости модели наблюдается увеличение напряжений в матрице и уменьшение напряжений в заполнителе. Однако характер изменения напряжений вдоль оси модели оказался таким же как и в моделях при  $p > 1$ . В связи с этим для каждого конечно-элементного расчета были определены величины коэффициента концентрации напряжений  $\omega_{ca}$ . Анализ показал, что при  $p < 1$  при изменении величины  $\alpha$  в пределах 0,154...0,5 не выявлено ее существенного влияния на величину коэффициента  $\omega_{ca}$  (рис. 2).

Полученные величины коэффициента  $\omega_{ca}$  аппроксимированы следующими зависимостями (при изменении коэффициента  $\alpha$  в пределах 0,154... 0,5 и параметра  $p$  в пределах от 1/16 до 16):  
при  $p \geq 1$

$$\omega_{ca} = 1 + \left( \frac{2,5}{1 + 2,7 \cdot \alpha} - 1 \right) \cdot (0,4411 - 0,0285 \cdot \ln p) \cdot \ln p \quad (4)$$

при  $p < 1$

$$\omega_{ca} = 1 - 0,38 \cdot \ln p \quad (5)$$

Как показал дальнейший анализ, зависимости (4) и (5) могут быть также использованы при значениях коэффициента  $\alpha$  и параметра  $p$ , выходящих за указанные выше пределы, но при этом для получаемых по зависимостям величин коэффициента  $\omega_{ca}$  должно выполняться условие  $1 \leq \omega_{ca} \leq 2$ .

Полученная аналитическая зависимость для определения коэффициента концентрации напряжений  $\omega_{ca}$  предоставляет возможность определять параметры такой структурно-механической модели бетона, в которой учитывается неравномерность распределения напряжений.

### ПАРАМЕТРЫ СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ БЕТОНА

Структурно-механическая модель бетона состоит из работающих параллельно двух элементов — центрального и наружного (рис. 3). В центральный элемент входят два полушара (1 на рис. 3), имитирующих заполнитель, и соединяющий полушары средний элемент (2 на рис. 3) цилиндрического сечения, имитирующий наиболее нагруженную часть матрицы. Наружный элемент (3 на рис. 3) имеет цилиндрическое сечение с полостью переменного радиуса и имитирует менее нагруженную часть матрицы.



Рис. 3. Основные геометрические параметры структурно-механической модели бетона.

Внешний радиус  $r_0$  наружного элемента определяется из условия равенства площади шестигранной призмы и площади условного цилиндра по формуле

$$r_0 = r_{agr} \sqrt{\frac{2 \cdot \rho_{agr}}{3 \cdot G_{agr} \cdot (1 + \alpha)}} \quad (6)$$

Исходя из равенства усилия, воспринимаемого заполнителем в верхней плоскости, и усилия в среднем элементе, имитирующем наиболее нагруженную часть матрицы, радиус  $r_c$  этого элемента цилиндрического сечения (2 на рис. 2) следует определять по формуле

$$r_c = r_{agr} / \sqrt{\omega_{ca}} \quad (7)$$

Остальные геометрические параметры модели

$$h_1 = r_{agr} \sqrt{1 - \frac{1}{\omega_{ca}}}; \quad h_2 = r_{agr} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{1}{\omega_{ca}}} \right)$$

Обозначим  $\beta = \frac{r_c}{r_{agr}} = \frac{1}{\sqrt{\omega_{ca}}}$ ;  $\gamma = \frac{r_0}{r_{agr}}$ ;  $\lambda = \sqrt{p - 1}$ ;

$$\mu = \sqrt{1 - p}; \quad k_1 = \sqrt{1 - \beta^2}; \quad k_2 = \sqrt{\gamma^2 - 1};$$

Таблица. Основные результаты прогнозирования модуля деформаций бетона

Вид		Источник	Кол-во	Диапазон изменения		$\frac{E_{tot}}{E_{obs}}$	$C_v$
Матрица	Заполнитель			$\alpha$	$p$		
<b><math>p &gt; 1</math></b>							
Цементный камень	Крупный	[7]	15	0,01-0,07	3,08-7,39	1,087	0,160
		Мелкий или крупный	[12]	20	0,02-0,48	1,59-10,35	1,020
	[19]		3	0,11-0,16	1,84-4,02	0,930	0,087
	Мелкий и крупный	[14]	12	0,13-0,38	2,48-4,16	0,991	0,104
		[16]	23	0,03-0,54	3,27-7,45	1,038	0,087
		[17]	15	0,15-0,43	3,05-4,61	0,934	0,051
		[20]	8	0,54	2,73-3,66	0,888	0,058
		[21]	9	0,06-0,41	2,00-2,55	1,081	0,094
		[22]	9	0,06-0,44	2,12-2,70	1,075	0,132
		[24]	20	0,10-0,45	2,23-3,17	1,183	0,197
		[25]	4	0,11-1,02	2,40-3,40	0,985	0,083
		[27]	4	0,20-0,23	2,42-2,51	0,882	0,023
		[32]	7	0,12-0,22	2,05-3,24	0,987	0,140
	[36]	8	0,15-0,25	2,72-3,03	0,997	0,035	
	Мелкий	[11]	16	0,04-1,61	2,86	0,953	0,046
		[26]	25	0,11-0,24	2,77-4,63	0,943	0,061
[32]		5	0,11-0,18	2,05-3,24	1,040	0,088	
[33]		4	0,06	1,99-2,92	0,930	0,011	
Раствор	Крупный	[8]	9	0,05-0,12	1,27-2,14	1,092	0,064
		[9]	16	0,03-0,22	2,80-7,01	1,087	0,085
		[10]	36	0,02-0,10	1,54-2,78	0,992	0,086
		[13]	4	0,06-0,34	1,84-2,59	0,946	0,059
		[15]	2	0,19	1,93-2,59	1,004	0,029
		[28]	3	0,15	1,37-2,38	1,133	0,112
		[29]	5	0,15	1,14-1,69	1,029	0,103
		[30]	36	0,33-0,92	1,18-8,64	1,033	0,135
		[31]	3	0,33-0,92	1,16	1,012	0,009
		[34]	8	0,09-0,11	1,03-2,37	0,989	0,098
		[35]	15	0,21-1,42	3,57-4,68	1,072	0,063
Итого при $p > 1$			344	0,01-1,61	1,16-10,35	1,021	0,122
<b><math>p &lt; 1</math></b>							
Цементный камень	Мелкий или крупный	[12]	3	0,04-0,41	0,75	1,115	0,044
	Мелкий и крупный	[23]	3	0,11-0,26	0,27	1,147	0,028
Раствор	Крупный	[8]	3	0,05-0,12	0,35	0,864	0,075
		[15]	2	0,19	0,60-0,81	1,006	0,006
		[18]	2	0,16	0,70-0,98	1,024	0,016
		[29]	2	0,15	0,83-0,91	1,223	0,154
		[31]	15	0,33-0,92	0,42-0,88	1,000	0,062
		[33]	16	0,25-0,58	0,23-0,32	1,044	0,030
		[37]	4	0,22-0,75	0,0002	1,038	0,062
[38]	8	0,14-0,82	0,0001	0,993	0,158		
Итого при $p < 1$			58	0,04-0,92	0,0001-0,91	1,029	0,096

$$k_\lambda = \sqrt{\frac{\beta^2}{\lambda^2} + 1}.$$

Тогда  $h_1 = r_{agr} \sqrt{1 - \beta^2} = k_1 r_{agr}$  и

$$h_2 = r_{agr} (1 - \sqrt{1 - \beta^2}) = r_{agr} (1 - k_1).$$

#### ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МОДУЛЯ ДЕФОРМАЦИЙ БЕТОНА

Для определения деформаций элементов структурно-механической модели приняты следующие предпосылки:

1. Центральные и наружные элементы модели взаимодействуют друг с другом только в уровне ее верхней и нижней плоскости.
2. Сечения плоские до деформации остаются плоскими после деформации;
3. Напряжения в сечении распределяются равномерно.
4. При наличии в сечении элемента двух материалов с различными величинами модуля деформаций напряжения в них распределяются пропорционально величинам модуля деформаций.

Исходя из принятых предпосылок, при известном усилии в элементе структурно-механической модели в любом его сечении может быть определена величина относительной

деформации. Укорочение наружного и внутреннего элементов модели может быть найдено путем интегрирования в пределах ее высоты уравнения, описывающего величину относительных деформаций в любом сечении элемента.

Полученное в результате интегрирования укорочение  $\Delta_0$  наружного элемента модели при действии силы  $N_0$  равно

$$\Delta_0 = \frac{2N_0 w_0}{\pi r_{agr} E_{mat}},$$

где  $w_0 = \frac{1}{k_2} \arctg\left(\frac{k_1}{k_2}\right) + \frac{1 + \alpha - k_1}{\gamma^2 - \beta^2}$  (8)

Полученное в результате интегрирования укорочение  $\Delta_c$  центрального элемента модели при действии силы  $N_c$  равно:

$$\Delta_c = \frac{2N_c w_c}{\pi r_{agr} E_{mat}},$$

где при  $p > 1$

$$w_c = \frac{1}{2p} \ln\left(\frac{1+k_1}{1-k_1}\right) + \frac{1}{2k_2 \lambda^2} \left( \ln\left|\frac{k_2+1}{k_2-1}\right| - \ln\left|\frac{k_2+k_1}{k_2-k_1}\right| \right) + \frac{\alpha}{\beta^2}$$
 (9)

при  $p < 1$ ,  $\mu > \beta$ , и  $k_\mu = \sqrt{1 - \frac{\beta^2}{\mu^2}}$

$$w_c = \frac{1}{2p} \ln\left(\frac{1+k_1}{1-k_1}\right) + \frac{1}{2k_\mu \mu^2} \left( \ln\left|\frac{k_\mu+k_1}{k_\mu-k_1}\right| - \ln\left|\frac{k_\mu+1}{k_\mu-1}\right| \right) + \frac{\alpha}{\beta^2}$$
 (10)

при  $p < 1$ ,  $\mu < \beta$ ,  $k_\mu = \sqrt{\frac{\beta^2}{\mu^2} - 1}$

$$w_c = \frac{1}{2p} \ln\left(\frac{1+k_1}{1-k_1}\right) + \frac{1}{k_\mu \mu^2} \left( \arctg\left(\frac{1}{k_\mu}\right) - \arctg\left(\frac{k_1}{k_\mu}\right) \right) + \frac{\alpha}{\beta^2}$$
 (11)

Приравнивая укорочения наружного и внутреннего элементов, определяем соотношение между усилиями  $N_0$  и  $N_c$ . Суммарное усилие воспринимаемое обоими элементами  $N_{tot} = N_0 + N_c$ .

Рассматривая бетон как однородный материал с модулем деформаций  $E_{tot}$ , получаем величину укорочения этого материала на длине, равной длине модели,

$$\Delta = \frac{2N_{tot}}{\pi r_{agr} E_{tot}} \cdot \frac{1 + \alpha}{\gamma^2}.$$

Приравнивая укорочения наружного элемента модели и укорочения условного однородного материала, получаем следующую зависимость между модулем деформаций бетона и модулем деформаций матрицы

$$\frac{E_{tot}}{E_{mat}} = \frac{1 + \alpha}{\gamma^2} \cdot \left( \frac{1}{w_0} + \frac{1}{w_c} \right),$$
 (12)

в которой параметр  $w_0$  определен по формуле (8), а параметр  $w_c$  - по формулам (9)...(11).

По приведенным выше зависимостям были выполнены вычисления при всех сочетаниях параметров, которые имели место в конечно - элементных моделях. Среднее отношение величин, рассчитанных по приведенным выше формулам, к

величинам, полученным при конечно-элементном расчете, по 24 расчетам составило 1,007 при коэффициенте вариации 0,020. Полученные результаты свидетельствуют о том, что разработанная структурно-механическая модель с высокой адекватностью отражает результаты вычислений по конечно-элементным моделям.

С помощью разработанной структурно-механической модели были выполнены расчеты по экспериментальным данным [8-38] для бетонов различных составов и прочности. Основные сведения о выборке опытных образцов приведены в таблице. Следует отметить, что в качестве заполнителя в опытных образцах использовались не только природные заполнители плотной структуры (гранит, диорит, габбро, известняк и т.д.), но и искусственные заполнители различного вида (керамзит [18, 23, 31], пенополистирольные шарики [37], плотная или ячеистая резина [38]).

Сопоставление расчетных величин начального модуля деформаций с опытными величинами показало хорошую сходимость. Среднее отношение расчетных величин к опытному по 344 образцам, для которых  $p > 1$ , составило 1,021 при коэффициенте вариации 0,122. Среднее отношение расчетных величин к опытному по 58 образцам, для которых  $p < 1$ , составило 1,029 при коэффициенте вариации 0,096.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что разработанная структурно-механическая модель бетона позволяет с приемлемой точностью оценить начальный модуль его деформаций при сжатии.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Десов А.Е. Некоторые вопросы структуры, прочности и деформаций бетона. // Структура, прочность и деформации бетонов: Сб. ст. - М.: Стройиздат, 1966. - С.4-52.
2. Блещик Н.П. Структурно-механические и свойства и реология бетонной смеси и прессвакуумбетона. - Мн.: Наука и техника, 1977. - 232 с.
3. Гладышев Б.М. Механическое взаимодействие элементов структуры и прочность бетонов. - Харьков: Вища школа, 1987. - 166 с.
4. Блещик Н.П., Рыскин М.Н. Структурное моделирование механических свойств высокопрочного бетона. // Эффективные строительные материалы, конструкции и технологии: Сб. ст. - Мн.: Технопринт, 2000. - С.51-63.
5. Рак Н.А. К построению методики расчета железобетонных конструкций с учетом неоднородности структуры бетона // Вестник БГТУ. Строительство и архитектура. - 2001. - № 1(7) - С. 90-99.
6. Рак Н.А. Стержневая расчетная модель бетона как структурно неоднородного материала // Вестник БГТУ. Строительство и архитектура. - 2003. - № 1(19) - С. 145-151.
7. Willis T., De Reuss M. Thermal Volume Change and Elasticity of Aggregates and their Effect on Concrete // ASTM Proceedings. - 1939. - V. 39. - P. 919.
8. LaRue H. Modulus of Elasticity of Aggregates and Its Effect on Concrete // ASTM Proceedings. - 1946. - V. 46. - P. 1298-1310.
9. Dantu P. Etude des Contraintes dans les Milieux Heterogenes. Application au Beton // Annales du Institut Texhniq du Batiment et des Travaux Publics. - 1958. - Vol.40, № 121. - P. 44-57.
10. Caplan M. Flexural and Compressive Strength of Concrete as Affected by the Properties of Coarse Aggregate // ACI Journal. - 1959. - Vol. 55, № 11. - P. 1193-1208.
11. Ishai O. Influence of Sand Concentration on Deformations of Mortar Beams Under Low Stresses // ACI Journal. - 1961. - Vol. 58, № 11. - P. 611-623.

12. Hirsch T. Modulus of Elasticity of Concrete Affected by Elastic Moduli of Cement Paste Matrix and Aggregate // *ACI Journal*. – 1962. – V. 59, № 3. – P. 427-447.
13. Counto V. The Effect of the Elastic Modulus of the Aggregate on the Elastic Modulus, Creep and Creep Recovery of Concrete // *Magazine of Concrete Research*. – 1964. – Vol. 16, № 48. – P. 129-138.
14. Сытник В.И., Иванов Ю.А. Результаты экспериментальных исследований прочностных и деформационных характеристик бетонов марок 600–1000. – Киев, НИИСК, 1966. – 32 с.
15. Дмитриев А.С. Деформации и напряжения крупного заполнителя в нагруженном бетоне и методика их исследования // *Методы испытания пористых заполнителей, легковесных смесей и легких бетонов на пористых заполнителях*: Сб. ст. – М.: Стройиздат, 1967. – С. 61–68.
16. Shah S. and Chandra S. Critical Stress, Volume Change, and Microcracking of Concrete // *ACI Journal*. – 1968. – Vol. 65, № 9. – P. 770–781.
17. Саканделидзе А.А. Исследование высокопрочных тяжелых бетонов на местных заполнителях: Автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.23.01. – Тбилиси, 1974. – 25 с.
18. Житкевич Р.К., Бужевич Г.А. Использование прочности компонентов конструктивного керамзитобетона // *Новое в технологии легких бетонов на пористых заполнителях*: Сб. ст. – М.: НИИЖБ, 1975. – С. 4–10.
19. Макаренко Л.П., Фенко Г.А. Некоторые вопросы упругости, ползучести и усадки цементного камня, раствора и бетона, их взаимосвязь // *Строительные конструкции*: Сб. ст. – Вып. 28. – Киев, 1976. – С. 75–82.
20. Литой щебень из доменных шлаков и бетоны на его основе / С.Е. Александров, В.А. Здоренко, И.В. Колпаков, П.А. Кривелев. – М.: Стройиздат, 1979. – 208 с.
21. Казацкий М.Б. Деформации и прочность бетона при сжатии и их моделирование с учетом структуры материала. Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / ВЗИСИ. – М., 1984. – 23 с.
22. Цава Г.Ф. Деформации и прочность бетона при растяжении с учетом особенностей структуры материала: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / ГПИ. – Тбилиси, 1985. – 25 с.
23. Раупов Ч.С. Прочность и деформации керамзитобетона при кратковременном и длительном сжатии и растяжении с учетом структуры материала: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / ВЗИСИ. – М., 1987. – 22 с.
24. Саралидзе Т.О. Деформации и прочность бетонов с добавкой С-3 при кратковременном и длительном нагружении и их моделирование с учетом структуры материала: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / ВЗИСИ. – М., 1987. – 22 с.
25. Клеблеев Э.К. Свойства высокопрочных бетонов и железобетонных элементов из них при повторных нагрузках: Автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.23.01. – Киев, 1990. – 14 с.
26. Harsh S., Shen Z. and Darwin D. Strain-Rate Sensitive Behavior of Cement Paste and Mortar in Compression // *ACI Materials Journal*. – 1990. – V. 87, № 5. – P. 508–516.
27. Свиридов Н.В., Коваленко М.Г., Чесноков В.М. Механические свойства особо прочного цементного бетона // *Бетон и железобетон*. – 1991. – № 2. – С. 7–9.
28. Giaccio G., Rocco C., Violini D., Zappitelli J., and Zerbino R. High-Strength Concretes Incorporating Different Coarse Aggregates // *ACI Materials Journal*. – 1992. – V. 89, № 3. – P. 242–246.
29. Baalbaki W., Aitcin P. and Ballivy G. On Predicting Modulus of Elasticity in High-Strength Concrete // *ACI Materials Journal*. – 1992. – V. 89, № 5. – P. 517–520.
30. Yang C., Huang R., Yeih W. and Sue I. Aggregate Effect on Elastic Moduli of Cement-Based Composite Materials // *Journal of Marine Science and Technology*. – 1995. – V. 3, № 1. – P. 5–10.
31. Yang C., Lin Y. and Huang R. Elastic Modulus of Concrete Affected by Elastic Moduli of Mortar and Artificial Aggregate // *Journal of Marine Science and Technology*. – 1996. – V. 4, № 1. – P. 43–48.
32. De Larrard F. and Belloc A. The Influence of Aggregate on the Compressive Strength of Normal and High-Strength Concrete // *ACI Materials Journal*. – 1997. – V. 94, № 5. – P. 417–426.
33. Yang C., Yang Y. and Huang R. The Effect of Aggregate Volume Ratio on the Elastic Modulus and Compressive Strength of Lightweight Concrete // *Journal of Marine Science and Technology*. – 1997. – V. 5, № 1. – P. 31–38.
34. Budi Aulia T., Deutshmann K. Effect of Mechanical Properties of Aggregate on the Ductility of High- Performance Concrete // *Leipzig Annual Civil Engineering Report*. – 1999. – № 4. – P. 133–148.
35. Cho S., Yang C. and Huang R. Effect of Aggregate Volume Fraction on the Elastic Moduli and Void Ratio of Cement-Based Composite Materials // *Journal of Marine Science and Technology*. – 2000. – V. 8, № 1. – P. 1–7.
36. Рыскин М.Н. Структурно-механические свойства и технология высокопрочного бетона: Дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / БНТУ. – Минск, 2002. – 296 с.
37. Haidar K., Pijaudier-Cabot G. Influence of Porosity on Fracture Characteristics in Mortar Structures // *Proceedings of 15<sup>th</sup> ASCE Engineering Mechanics Conference (EM-2002)*. – 2002. – 8 p.
38. Benazzouk A., Douzane O., Queneudec M. Transport of Fluids in Cement-rubber Composites // *Cement and Concrete Composites*. – 2004. – Vol. 26, № 1. – P. 21–29.

УДК 624.012.35

**Рак Н.А.****СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ БЕТОНА.****2. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДИАГРАММЫ ДЕФОРМИРОВАНИЯ БЕТОНА****ВВЕДЕНИЕ**

Современные методы расчета расчета железобетонных конструкций основаны на использовании диаграммы деформирования бетона при сжатии как обобщенной характеристики его механических свойств. Имеющиеся экспериментальные данные свидетельствуют о том, что полная диаграмма деформирования бетона при сжатии имеет как восходящую, так и нисходящую ветви. Границей между ветвями диаграммы является точка, соответствующая моменту достижения напряжениями в бетоне  $\sigma_c$  его предела прочности на сжатие  $f_c$  и относитель-

ными деформациями бетона  $\epsilon_c$  пиковой относительной деформации  $\epsilon_{c1}$  (при  $\epsilon_c \leq \epsilon_{c1}$  наблюдается восходящая ветвь диаграммы, а при  $\epsilon_c > \epsilon_{c1}$  — нисходящая). Многочисленные предложения по аналитическому описанию диаграммы деформирования бетона основаны на наиболее точном описании использованных при их выводе экспериментальных диаграмм. Различные предложения по описанию диаграмм деформирования бетона при сжатии подробно рассмотрены в