

МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНОГО НАПРЯЖЕННО- ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ В СТЕРЖНЕВЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТАХ ПРИ СТАТИЧЕСКОЙ НАГРУЗКЕ

**Дорофеев В.С., Карпюк В.М., Петров Н.Н., Алешин А.А.,
Каменев В.Г.**

*Одесская государственная академия строительства и архитектуры,
г. Одесса, Украина*

Введение. Большинство железобетонных конструкций испытывает сложное силовое воздействие. Несмотря на имеющийся опыт проектирования сложноподвижных конструкций, вопросы расчета их прочности, жесткости и трещиностойкости в нормативной и научно-технической литературе освещены еще недостаточно. Это, прежде всего, объясняется большим разнообразием специфических задач, встречающихся при проектировании, и отсутствием достаточно надежных экспериментально обоснованных методов их расчета. Круг этих задач довольно широк: комплексное исследование образования и раскрытия трещин, схем разрушения, предельных деформаций и усилий с учетом их перераспределения; разработка новых методов расчета элементов, подвергнутых кручению, кручению с чистым, косым и поперечным изгибом, кручению со сжатием или растяжением; установление простых экспериментально установленных зависимостей, облегчающих технику расчета подвергнутых кручению элементов и конструкций из тяжелых и легких бетонов. Несмотря на определенные успехи в этой области, поставленная проблема является актуальной и сегодня.

Цель данной работы состоит в том, чтобы расчетным путем изучить особенности напряженно деформированного состояния исследуемых элементов, численно выявить наиболее неблагоприятное сочетание исследуемых факторов, а затем экспериментально проверить их влияние на основные параметры работоспособности указанных конструкций и усовершенствовать методику их расчета.

Изложение основного материала. Для изучения напряженно-деформированного состояния, прочности, деформативности и трещиностойкости стержневых железобетонных элементов, нагруженных продольными и поперечными силами, изгибающими и крутящими моментами, планируется выполнить нелинейный конечно-элементный расчет в ПК «Лира 9.6» с использованием реальных диаграмм состояния материалов [1] (рис. 1,2), феноменологических критериев прочности Г.А. Гениева [2] (рис. 3), В.М. Круглова [3] и др., а также натурный эксперимент, проведенный при наиболее неблагоприятных сочетаниях исследуемых факторов (табл.1).

Исследуемые элементы рассматриваемой серии численного эксперимента были сконструированы в соответствии с пятифакторным, трехуровневым, близким к Д-оптимальному, плану, типа – H_a5 (табл. 2), обеспечивающему одинаковую точность прогнозирования выходного параметра в области, описываемой радиусом, равным 1, относительно нулевой точки [4].

Для проведения экспериментально-теоретических исследований и решения поставленных задач в качестве исследуемых образцов были приняты шарнирно-опертые однопролетные железобетонные стержни-колонны прямоугольного сечения с размерами поперечного сечения 0,12 x 0,12м, длиной $l=2$ м (рис. 4). Принятый “эксплуатационный” уровень сжимающей нагрузки $N=193$ кН и равный, примерно, $0,67N_{уб}$. Бетон тяжелый, естественного твердения, класса В20 [5]. Физико-механические характеристики бетона, исходя из ранее проведенных экспериментальных исследований, были приняты следующие:

$$R_{bn} = 20,4 \text{ МПа}; R_{bн} = 2,05 \text{ МПа}; \varepsilon_{br} = 0,00174; \varepsilon_{br} = 0,00017; E = 27600 \text{ МПа}.$$

Полная диаграмма деформирования бетона построена по методике А.Н. Бамбуры и представлена на рис. 1:

Армирование опытных образцов осуществлялось симметрично четырьмя продольными стержнями класса А400С Ø8, 10, 12мм и поперечными - класса А240С Ø6, 7, 8мм с шагом 0,06м, 0,12м и 0,18м. Рабочая высота сечения: $h_0=0,105$ м. Физико-механические характеристики для арматуры класса А400С следующие:

$$R_{su} = R_{scu} = 400 \text{ МПа}; \varepsilon_{su} = \varepsilon_{scu} = 0,025; E = 20000 \text{ МПа}.$$

для арматуры класса А240С:

$$R_{su} = R_{scu} = 240 \text{ МПа}; \varepsilon_{su} = \varepsilon_{scu} = 0,025; E = 200000 \text{ МПа}.$$

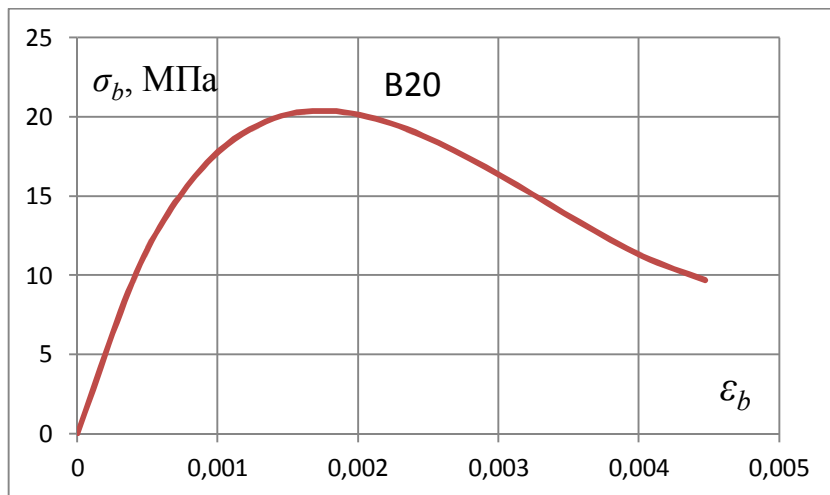


Рис. 1 Диаграммы деформирования бетона ГП “НИИСК” (А.Н. Бамбура)

Полные графики деформирования представлены на рис. 2:

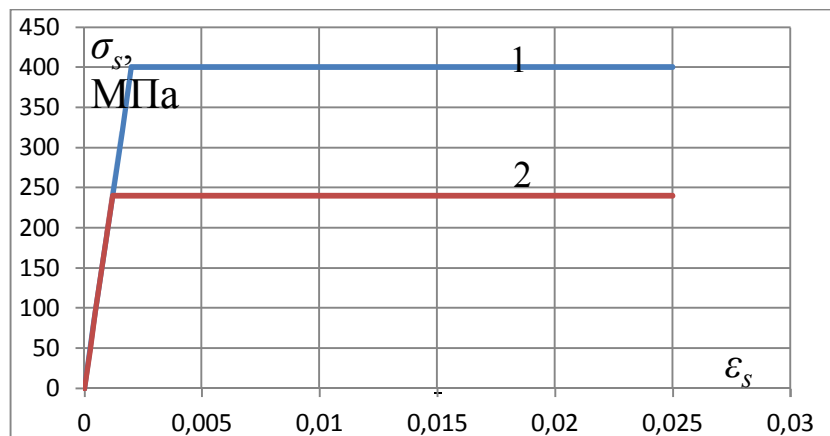
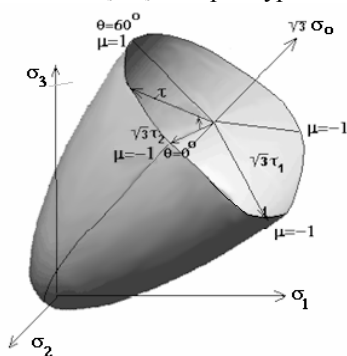


Рис. 2 Диаграммы деформирования арматуры
1 – зависимость $\sigma_s - \epsilon_s$ для арматуры класса А400С;
2 – зависимость $\sigma_s - \epsilon_s$ для арматуры класса А240С



a)

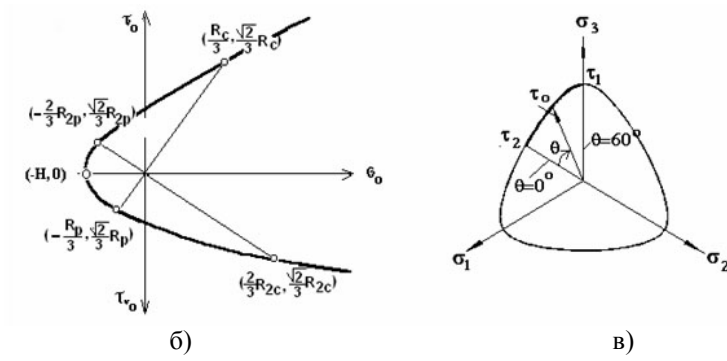


Рис. 3 Поверхность прочности бетона (а). Характерные сечения поверхности прочности: меридиональное сечение (б); девиаторное сечение (в)

Армирование исследуемого образца представлено на рис. 4.

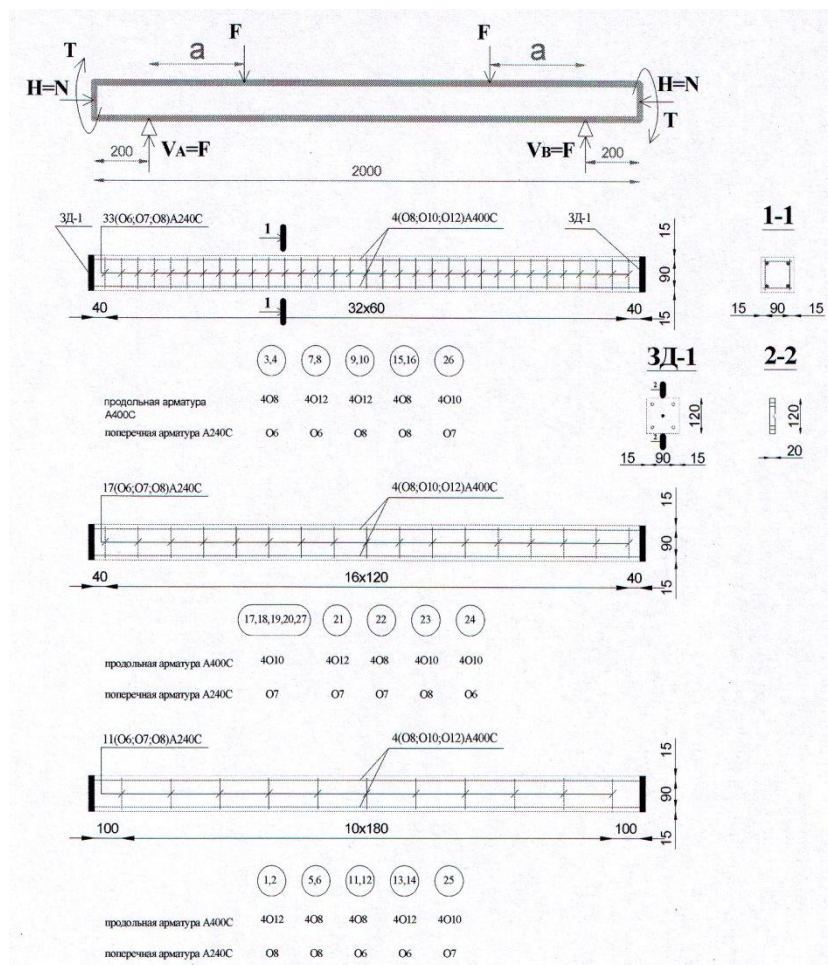


Рис. 4. Расчетная схема стержневого элемента и его армирование

Характеристика исследуемых факторов с учетом анализа априорной информации дана в табл. 1.

Таблица 1

Исследуемые факторы и уровни их варьирования

№ фактора	Исследуемые факторы	Уровни варьирования			Интервал варьирования
		«-1»	«0»	«1»	
X ₁	Крутящий момент M _{кр} , кНм	0,5	1,5	2,5	0,5*
X ₂	Пролет среза а, м	0,18	0,36	0,54	0,18
X ₃	Коэффициент продольного армирования, μ_s (d, мм), А 400С	0,014 (4Ø8)	0,0218 (4Ø10)	0,0314 (4Ø12)	≈0,0087
X ₄	Поперечное армирование, d, м, А 240 С	0,006	0,007	0,008	0,001
X ₅	Шаг поперечной арматуры, U, м	0,06	0,12	0,18	0,06

Примечание*: Интервал варьирования исследуемого фактора будет уточняться в начале эксперимента (опыт №11).

В ходе численного эксперимента будет проанализировано влияние наиболее значимых факторов (табл. 1) и с помощью программного комплекса COMPEX, разработанного под руководством профессора Вознесенского В.А., будут построены адекватные математические модели и графики их влияния на прочность, деформативность и трещинообразование исследуемых элементов. Проведенные исследования позволят численно установить возможные схемы разрушения опытных образцов, определить наиболее неблагоприятные, с точки зрения работоспособности, сочетания выбранных факторов, что даст возможность сократить количество натурных экспериментов, а также усовершенствовать существующую методику прогнозирования их прочности, деформативности и трещиностойкости.

Выводы:

1. Проблема сопротивления железобетонных элементов совместному воздействию изгибающих и крутящих моментов, а также поперечных и продольных сил является одной из наименее изученных в теории железобетона. Следствием этого [6] является полуэмпирический подход к расчету таких элементов, отсутствие в действующих нормативных документах надежных рекомендаций по их расчету. Поэтому, проводимые исследования являются, безусловно, актуальными и востребованными.

2. Очевидно, что очередность и величина прикладываемых силовых факторов могут играть определяющую роль на прочность, трещинообразование и деформативность исследуемых элементов, что необходимо учитывать в реальном проектировании.

3. Проведенные исследования дополняют физическую картину работы стержневых элементов, испытывающих сложное напряженно-деформированное состояние, позволят существенно уточнить инженерную методику их расчета.

SUMMARY

The technique and plan to conduct a numerical experiment in a preliminary study of the strength, fracture toughness and deformability of reinforced concrete elements in the light of the longitudinal and transverse forces, bending and torque moments.

Таблица 2

№ опыта	План численного эксперимента									
	Кодированные значения факторов					Натуральные значения факторов				
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	M _{кр} , кНм	a, м	μ _s , А400С	d, м, А240С	U, м
1	+1	+1	+1	+1	+1	2,5	0,54	4Ø12	Ø8	0,18
2	-1	-1	+1	+1	+1	0,5	0,18	4Ø12	Ø8	0,18
3	-1	+1	-1	-1	-1	0,5	0,54	4Ø8	Ø6	0,06
4	+1	-1	-1	-1	-1	2,5	0,18	4Ø8	Ø6	0,06
5	-1	+1	-1	+1	+1	0,5	0,54	4Ø8	Ø8	0,18
6	+1	-1	-1	+1	+1	2,5	0,18	4Ø8	Ø8	0,18
7	+1	+1	+1	-1	-1	2,5	0,54	4Ø12	Ø6	0,06
8	-1	-1	+1	-1	-1	0,5	0,18	4Ø12	Ø6	0,06
9	-1	+1	+1	+1	-1	0,5	0,54	4Ø12	Ø8	0,06
10	+1	-1	+1	+1	-1	2,5	0,18	4Ø12	Ø8	0,06
11*	+1	+1	-1	-1	+1	2,5	0,54	4Ø8	Ø6	0,18
12	-1	-1	-1	-1	+1	0,5	0,18	4Ø8	Ø6	0,18
13	-1	+1	+1	-1	+1	0,5	0,54	4Ø12	Ø6	0,18
14	+1	-1	+1	-1	+1	2,5	0,18	4Ø12	Ø6	0,18

Продолжение таблицы 2

№ опыта	План численного эксперимента									
	Кодированные значения факторов					Натуральные значения факторов				
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	M _{кр} , кНм	a, м	μ _s , А400С	d, м, А240С	U, м
15	+1	+1	-1	+1	-1	2,5	0,54	4Ø8	Ø8	0,06
16	-1	-1	-1	+1	-1	0,5	0,18	4Ø8	Ø8	0,06
17	+1	0	0	0	0	2,5	0,36	4Ø10	Ø7	0,12
18	-1	0	0	0	0	0,5	0,36	4Ø10	Ø7	0,12
19	0	+1	0	0	0	1,5	0,54	4Ø10	Ø7	0,12
20	0	-1	0	0	0	1,5	0,18	4Ø10	Ø7	0,12
21	0	0	+1	0	0	1,5	0,36	4Ø12	Ø7	0,12
22	0	0	-1	0	0	1,5	0,36	4Ø8	Ø7	0,12
23	0	0	0	+1	0	1,5	0,36	4Ø10	Ø8	0,12
24	0	0	0	-1	0	1,5	0,36	4Ø10	Ø6	0,12
25	0	0	0	0	+1	1,5	0,36	4Ø10	Ø7	0,18
26	0	0	0	0	-1	1,5	0,36	4Ø10	Ø7	0,06
27	0	0	0	0	0	1,5	0,36	4Ø10	Ø7	0,12

Литература

1. Бамбура А.Н. Развитие методов оценки напряженно-деформированного состояния и несущей способности железобетонных конструкций на основе реальных диаграмм деформирования материалов / Бамбура А.Н. // Збірник тез І-ої всеукраїнської наук.-практ. конф. “Науково-практичні проблеми сучасного залізобетону”. – К., 1996. – С.36 – 39.
2. Гениев Г.А. Теория пластичности бетона и железобетона. /Г.А. Гениев, В.Н. Кисюк, Г.А. Тюпин – М.: Стройиздат, 1974. – 279с.
3. Круглов В.М. Нелинейные соотношения и критерии прочности бетона в трехосном напряженном состоянии / Круглов В.М. // Строительная механика и расчет сооружений.-1987.-№1.-с.40-44.
4. Вознесенский В.А. Статические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях/ Вознесенский В.А. [– 2-е изд. испр. и доп.] – М.: Финансы и статистика, 1981, –215с.
5. ГОСТ 26633-91 “Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия”.
6. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. – М.: Стройиздат, 1996. – 416с.