

СТРОИТЕЛЬСТВО. АРХИТЕКТУРА

УДК 624.012:624.046

В. В. Гичко

РАСЧЕТ УСТОЙЧИВОСТИ ГИБКИХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ СТОЕК ДЕФОРМАЦИОННЫМ МЕТОДОМ

UDC 624.012:624.046

V. V. Gichko

CALCULATION OF FLEXIBLE REINFORCED-CONCRETE POLES STABILITY BY THE DEFORMATION METHOD

Аннотация

Приведены цель, задачи экспериментально-теоретических исследований и пути их решения по расчету устойчивости гибких железобетонных внецентренно сжатых элементов деформационным методом. Представлены количественная и качественная оценки на основе сопоставления данных экспериментальных исследований гибких внецентренно сжатых железобетонных стоек при кратковременном действии нагрузки с результатами их расчета согласно разработанным методикам.

Ключевые слова:

устойчивость, несущая способность, деформационный метод, «точная» методика, упрощенный метод расчета, оценка точности.

Abstract

The purposes, tasks of theoretical and experimental research and ways for their solution by the calculation of stability of flexible eccentrically compressed reinforced concrete elements with the application of the deformation method are presented. The paper gives the quantitative and qualitative assessment based on comparing the data of experimental research of flexible eccentrically compressed reinforced concrete poles under momentary load, which is performed by the author of the paper and earlier by other researchers, with the results of their calculation by using the methods developed.

Key words:

stability, load-bearing capacity, deformation method, «exact» method, simplified calculation method, accuracy assessment.

Введение

Современный рынок строительства при проектировании железобетонных конструкций требует обоснованной минимизации расхода строительных материалов. Одним из путей решения данной задачи является применение высокопрочных бетонов, в частности,

уменьшаются размеры поперечного сечения несущих конструкций и, соответственно, их вес. Однако уменьшение сечения несущих элементов приводит к увеличению их гибкости. Это требует от проектировщика умения учитывать в расчетах особенности работы таких элементов.

Однако действующие нормы на сегодняшний день [1] не содержат четких рекомендаций к расчету гибких сжатых элементов с учетом влияния прогиба на их устойчивость.

Основная часть

Целью исследований являлась разработка методики расчета устойчивости гибких внецентренно сжатых железобетонных элементов при кратковременной нагрузке деформационным методом. Были сформулированы следующие задачи:

1) получить аналитические зависимости для определения прогибов гибких внецентренно сжатых элементов с учетом изменения жесткости по их длине, обусловленные физической нелинейностью задачи;

2) разработать методику расчета устойчивости гибких внецентренно сжатых железобетонных элементов при кратковременной нагрузке и выполнить оценку ее точности и надежности;

3) разработать упрощенную методику определения несущей способности внецентренно сжатых гибких железобетонных элементов, основанную на оценке прочности наиболее напряженного сечения с учетом продольного изгиба;

4) выполнить экспериментальные исследования поведения гибких внецентренно сжатых железобетонных элементов в зависимости от величины эксцентриситета приложения нагрузки.

Решение первой задачи обусловило необходимость получения уравнения состояния для гибкого железобетонного элемента, в котором учитывалось бы изменение жесткости по его длине.

Эта задача была решена с помощью сплайн-функций – было получено в общем виде уравнение состояния для гибкого внецентренно сжатого железобетонного элемента с произвольным закреплением на концах:

$$f_i = \alpha(f_1 + l_0/n \varphi_1(i-1) + l_0^2/n^2 \times \\ \times [(3i-4)M_1/6B_1 + M_i/6B_i + \\ + \sum_{j=2}^i (i-j)M_j/B_j]), \quad (1)$$

где f_i – прогиб в i -м сечении элемента; f_1, φ_1 – начальные параметры (прогиб и угол поворота опорного сечения соответственно); l_0 – расчетная длина элемента; n – количество участков разбиения; M_1, M_i, M_j – изгибающий опорный момент и моменты в i -м и j -м сечениях соответственно; B_1, B_i, B_j – жесткость опорного сечения и жесткость в i -м и j -м сечениях соответственно; $\alpha = 1/(1 + Nl_0^2/6n^2B_i)$.

Определив из уравнения равновесия и условий опирания концов элемента значения начальных параметров и раскрыв функцию нагрузки, можно получить уравнение состояния элемента с любым закреплением на концах.

Для оценки напряженно-деформированного состояния нормального сечения используется деформационный метод, согласно которому при расчете задаются не приростом нагрузки, а приростом деформаций. В результате для каждого значения деформаций на любом этапе загрузки образца задача имеет единственное решение. Опыт показывает, что при расчете наиболее рационально задаваться величинами деформаций более сжатого волокна $\varepsilon_{c(1)}$. При этом используются предпосылки, регламентированные на сегодняшний день действующими в Украине нормами [1].

Обобщение полученных расчетных зависимостей и предпосылок позволило разработать методику расчета устойчивости гибких внецентренно сжатых железобетонных элементов при кратковременной нагрузке. В методику включен единый алгоритм определения напряженно-деформированного состояния нормальных сечений стержня де-

формационным методом с последующим определением состояния элемента в целом [2].

Однако расчет устойчивости гибких внецентренно сжатых элементов с использованием «точной» методики является достаточно трудоемким. Поэтому для упрощения расчетного аппарата авторами была разработана методика определения несущей способности гибких внецентренно сжатых железобетонных элементов, подобная используемой в правилах [3], которые основаны на оценке прочности наиболее напряженного сечения. Однако, в отличие от последней, согласно которой жесткость сечения в расчетах определяется приближенно с помощью ряда эмпирических коэффициентов, упрощенная методика, предложенная нами, базируется на использовании реальных жесткостей сечений, полученных в результате определения их напряженно-деформированного состояния деформационным методом. Таким образом, достигается большая точность получаемых результатов.

Основные принципы и формулы расчета по упрощенной методике приведены в [4].

Для подтверждения правомерности предложенных методов расчета был запланирован и выполнен физический эксперимент.

Экспериментальные исследования предусматривали испытание основных образцов (шарнирно закрепленных на концах железобетонных гибких стоек (и вспомогательных (бетонных кубов, призм, арматурных стержней). Всего было испытано четыре серии образцов стоек по три образца в каждой, 15 кубов, 18 призм и шесть образцов арматурных стержней. Образцы были изготовлены из бетона класса С65/70.

Основные экспериментальные исследования выполнялись на железобетонных стойках с проектными размера-

ми поперечного сечения 120x60 мм и длиной 1,5 м.

Особенностью методики исследования было то, что загрузка стоек выполнялась не в долях от нагрузки, а в долях от деформаций, которые отвечают вершине диаграммы деформирования бетона $\varepsilon_{c(1)}$. Благодаря этому удалось зафиксировать момент потери устойчивости железобетонных образцов и получить нисходящие ветви деформирования.

Методика и основные результаты экспериментальных исследований работы гибких внецентренно сжатых железобетонных стоек приведены в [5].

Среди полученных результатов во время испытаний железобетонных стоек следует отметить следующие.

При испытании всех гибких железобетонных опытных образцов была зафиксирована потеря устойчивости: она наступала значительно раньше, чем происходило разрушение материала стоек. Это наглядно иллюстрируется на диаграммах, приведенных на рис. 1. Кривые имеют характерное очертание с экстремумом, а большинство из них – достаточно протяжный ниспадающий участок. Как и ожидалось, варьирующий в данном эксперименте фактор существенным образом повлиял на значение критической нагрузки для опытных образцов. Так, при увеличении эксцентриситета с 2,5 мм в первой серии образцов до 20 мм для четвертой среднее значение критической нагрузки в пределах одной серии уменьшилось в 3,6 раза, а максимальный прогиб, соответствующий этому значению нагрузки, увеличился в 2,7 раза. Разрушение материала образцов, как и ожидалось, происходило в наиболее напряженной зоне – зоне действия максимального момента в среднем по длине образца участке.

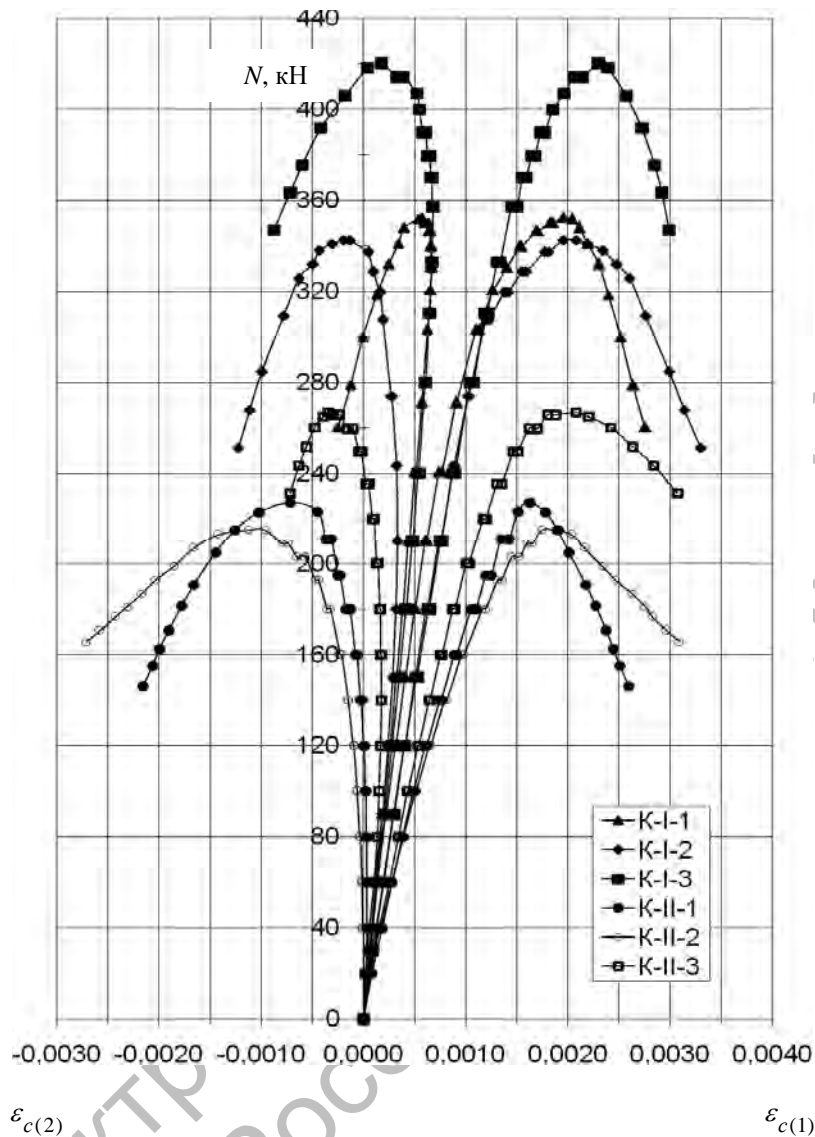


Рис. 1. Диаграммы деформирования $N - \varepsilon_{c(1)}, \varepsilon_{c(2)}$ стоек серий К-I и К-II

Результаты испытаний железобетонных стоек приведены в табл. 1.

Для оценки точности и надежности было выполнено сравнение результатов расчета по разработанным методикам, а также полученных согласно методике, отраженной в новых российских нормах [3], с опытными данными (см. табл. 1).

Сравнение выполнялось по двум случайным величинам – по критической нагрузке и прогибу (для «точной» методики) в наиболее напряженном сечении

образца, ему соответствующему. К выборке были отнесены опытные данные, полученные автором, а также результаты испытаний шарнирно опертых гибких стоек, выполненные в разное время А. Н. Бамбурой и Р. Х. Каюмовым (в целом 61 образец).

Статистической обработке подлежали соотношения теоретических и опытных данных вышеупомянутых величин. Результаты статистической обработки приведены в конце табл. 1.

Табл. 1. Сопоставление результатов экспериментальных и теоретических данных

Автор эксперимента	Серия образцов	Гибкость образцов λ	e , мм	f , мм			N_{max} , кН					Расчет Эксперимент (упрощ. методика)	Расчет Эксперимент [3]
				Расчет	Эксперимент	Расчет Эксперимент	Расчет («точная» методика)	Расчет (упрощ. методика)	Расчет [3]	Эксперимент	Расчет Эксперимент («точная» методика)		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
А. Н. Бамбура [6]	400-Иц	35	3,5	11,6	12,6	0,92	128,0	127,7	105,0	122,1	1,05	1,05	0,86
				11,9	12,1	0,98	124,1	125,5	103,9	113,2	1,10	1,11	0,92
				10,9	11,9	0,92	129,2	128,3	104,2	117,1	1,10	1,10	0,89
	400-Ие		10,0	12,0	13,1	0,92	69,3	66,1	75,5	60,1	1,15	1,10	1,26
				11,9	14,8	0,80	72,9	66,8	76,0	69,2	1,05	0,97	1,10
				11,4	12,5	0,91	75,0	69,0	76,4	71,0	1,06	0,97	1,08
	400-Иц		3,5	9,9	13,6	0,73	115,4	111,9	96,4	105,4	1,09	1,06	0,91
				9,1	13,3	0,68	117,6	110,6	93,5	101,0	1,16	1,10	0,93
				9,7	13,5	0,72	116,0	112,3	94,1	105,4	1,10	1,07	0,89
	800-Иц		3,5	13,1	15,2	0,86	152,9	154,1	116,5	130,4	1,17	1,18	0,89
				12,3	14,8	0,83	164,0	156,0	116,1	148,5	1,10	1,05	0,78
				12,7	15,1	0,84	160,1	153,2	115,6	126,2	1,27	1,21	0,92
	800-Ие		10,0	13,3	13,3	1,00	79,0	81,2	83,1	75,1	1,05	1,08	1,11
				12,5	14,2	0,88	80,2	80,4	82,7	64,0	1,25	1,26	1,29
				12,9	13,2	0,98	77,5	82,1	84,0	76,2	1,02	1,08	1,10
	800-Иц		3,5	10,8	14,5	0,74	158,4	163,1	119,0	155,2	1,02	1,05	0,77
				10,6	12,5	0,85	160,2	165,2	119,6	162,0	0,99	1,02	0,74
				11,4	13,1	0,87	154,0	162,0	118,2	132,1	1,17	1,23	0,89
В. В. Гичко	К-I	25	2,5	8,2	8,9	0,92	370,0	321,5	270,2	352,0	1,05	0,91	0,77
				7,9	6,9	1,14	374,1	320,2	269,3	342,5	1,09	0,93	0,79
				7,5	7,9	0,95	377,6	323,8	271,8	420,1	0,90	0,77	0,65
	К-II		10,0	11,8	10,5	1,12	216,8	182,9	179,0	227,3	0,95	0,80	0,79
				12,5	12,2	1,02	211,0	181,7	178,5	215,1	0,98	0,84	0,83
				10,7	10,2	1,05	225,1	183,3	179,3	266,9	0,84	0,69	0,67
	К-III		15,0	14,2	13,7	1,04	149,7	137,8	135,7	160,3	0,93	0,86	0,85
				14,8	13,8	1,07	142,5	135,7	132,2	145,1	0,98	0,94	0,91
				15,1	17,3	0,87	139,0	132,1	131,0	128,7	1,08	1,03	1,02
	К-IV		20,0	18,7	22,3	0,84	98,7	95,3	119,3	97,4	1,01	0,98	1,22
				18,4	21,0	0,88	100,7	96,1	119,6	98,8	1,02	0,97	1,21
				17,6	21,7	0,81	106,3	96,4	118,2	112,6	0,94	0,86	1,05

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
Р. Х. Каюмов [7]	К-1	35	7,0	16,7	15,3	1,09	129,8	112,0	97,9	122,3	1,06	0,92	0,80	
				16,2	14,8	1,09	132,5	110,4	97,1	115,1	1,15	0,96	0,84	
	К-2	35	4,67	12,4	14,7	0,84	155,0	145,2	112,1	156,4	0,99	0,93	0,72	
				12,6	14,3	0,88	153,7	143,6	111,2	152,8	1,01	0,94	0,73	
	К-3	25	2,5	6,6	9,0	0,73	330,5	320,1	243,8	300,5	1,10	1,07	0,81	
				7,1	8,3	0,86	327,8	318,0	241,9	289,2	1,13	1,10	0,84	
				7,0	8,5	0,82	328,4	317,6	241,5	284,1	1,16	1,12	0,85	
	К-4	30	3,0	7,9	11,2	0,71	212,3	220,0	165,2	195,3	1,09	1,13	0,85	
				8,0	10,6	0,75	211,2	217,3	164,3	188,4	1,12	1,15	0,87	
				8,4	9,1	0,92	207,8	219,1	164,7	193,6	1,07	1,13	0,85	
	К-5	35	3,5	8,9	11,8	0,75	146,2	153,1	119,3	153,2	0,95	1,00	0,78	
				9,3	11,3	0,82	143,9	155,5	119,0	149,4	0,96	1,04	0,80	
				9,5	12,4	0,77	142,4	157,6	118,2	145,7	0,98	1,08	0,81	
	К-6	35	7,0	9,3	10,1	0,92	84,3	105,0	99,5	88,1	0,96	1,19	1,13	
				9,9	9,7	1,02	79,4	102,4	96,8	68,0	1,17	1,51	1,42	
				9,5	9,1	1,04	81,8	102,7	97,6	77,1	1,06	1,33	1,27	
	К-7	35	4,67	7,6	11,9	0,64	86,2	116,1	110,4	93,2	0,92	1,25	1,18	
				7,2	11,2	0,64	90,0	118,0	112,9	98,4	0,91	1,20	1,15	
				7,4	11,7	0,63	89,4	116,8	111,6	94,1	0,95	1,24	1,19	
	К-8	25	2,5	5,4	8,6	0,63	230,7	235,4	224,4	198,3	1,16	1,19	1,13	
				5,5	8,8	0,63	222,4	233,1	223,9	194,6	1,14	1,20	1,15	
				5,6	8,4	0,67	219,4	238,1	225,8	204,8	1,07	1,16	1,10	
	К-9	35	3,5	6,2	9,5	0,65	94,1	117,4	113,9	103,2	0,91	1,14	1,10	
				6,3	9,1	0,69	92,8	116,0	113,1	95,1	0,98	1,22	1,19	
				6,5	10,5	0,62	90,0	114,8	112,5	94,8	0,95	1,21	1,19	
	К-10	25	2,5	6,6	8,1	0,81	171,2	138,4	204,1	152,7	1,12	0,91	1,34	
				6,7	7,7	0,87	170,1	137,2	204,9	155,3	1,10	0,88	1,32	
				6,3	7,5	0,84	175,2	140,0	205,7	158,7	1,10	0,88	1,30	
	К-11	35	3,5	7,5	11,2	0,67	77,0	110,0	106,4	76,0	1,01	1,45	1,40	
				7,8	11,8	0,66	75,9	108,1	104,8	75,1	1,01	1,44	1,40	
				7,4	9,6	0,77	77,4	108,8	105,6	78,3	0,99	1,39	1,35	
	X						0,85					1,05	1,08	1,00
	σ						0,158					0,089	0,166	0,213
V _c						0,187					0,085	0,155	0,213	
Примечание – N_{\max} – максимальное значение нагрузки, которое отвечает экстремуму на диаграмме $N-f$; f – значение прогиба в среднем по длине стойки сечения, которое отвечает значению нагрузки, равному N_{\max} ; $\lambda = l_0 / h$														

Из анализа статистических параметров распределения следует, что предложенные методики расчета дают результаты в оценке критической нагрузки стабильней, чем методика, отраженная в действующих российских нормах, о чем свидетельствует полученный коэффициент вариации, который при расчете по «точной» методике составляет $V_c = 8,5\%$, а по упрощенной методике $V_c = 15,5\%$. При расчете по методике [3] коэффициент вариации составил $21,3\%$.

О качественной сходимости ре-

зультатов расчета по «точной» методике с экспериментальными данными автора на примере серий образцов К-I и К-IV свидетельствуют диаграммы, приведенные на рис. 2, т. е. разработанная методика расчета достаточно хорошо отображает моделируемый ею процесс как количественно, так и качественно.

Оценка точности и надежности расчетных формул выполнялась по методике [8]. Результаты оценки точности и надежности разработанных методик и методики [3] приведены в табл. 2.

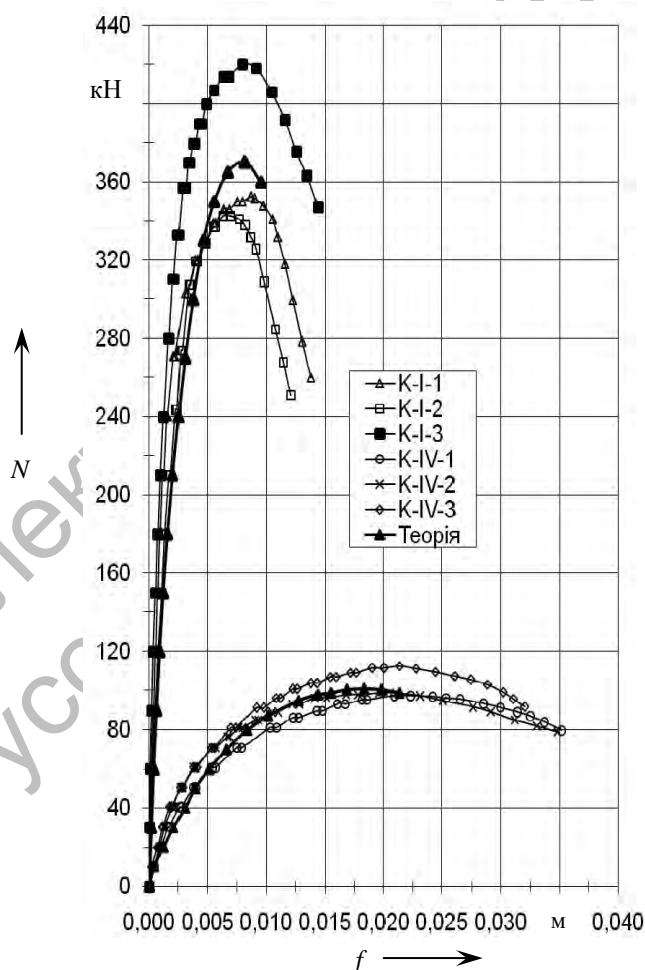


Рис. 2. Диаграммы деформирования $N - f$ стоек серии К-I и К-IV

Табл. 2. Обеспеченность точности расчетных методик

Обеспеченность точности, %	Расчет по «точной» методике	Расчет по упрощенной методике	Расчет согласно [3]
± 5	42,5	26,6	19,0
± 10	73,7	49,7	36,2
± 15	90,9	68,8	51,6
± 20	97,6	82,0	65,3
± 25	99,5	90,7	75,8
Надежность H	0,9998	0,9960	0,9912

Анализ данных таблицы свидетельствует о том, что предложенные методики расчета имеют достаточно высокую точность.

Надежность расчета H , согласно «точной» методике, составила 0,9998, по упрощенной – 0,9960, по методике [3] – 0,9912.

Выводы

1. На основе аппроксимации изогнутой оси кубическим сплайном получено уравнение состояния для гибкого внецентренно сжатого железобетонного элемента, которое учитывает изменение жесткости по его длине на всех этапах загрузки образца. Уравнение справедливо при любых условиях закрепления на опорах.

2. Разработана «точная» методика расчета устойчивости гибких внецентренно сжатых железобетонных элементов при кратковременной нагрузке, базирующаяся на использовании реальных диаграмм деформирования бетона и арматуры и деформационного метода.

3. Установлено влияние на теоретическое значение критической нагрузки для гибких стоек количества участков разбиения гибких элементов по длине – при расчете по «точной» методике рекомендуется ограничиться раз-

биением элемента на восемь участков.

4. Оценка точности и надежности предложенной методики расчета устойчивости гибких элементов показала высокую точность и достаточную надежность.

5. Разработан упрощенный метод расчета гибких внецентренно сжатых железобетонных элементов. Анализ сопоставления значений несущей способности, вычисленной с привлечением указанного метода, с опытными данными свидетельствует об удовлетворительной точности и надежности получаемых результатов и может быть рекомендован к применению на практике. Предложенный метод рекомендуется применять при значении относительного эксцентриситета продольной силы e/h , равном не менее чем 0,15.

6. В результате экспериментальных исследований выявлены закономерности поведения гибких шарнирно опертых железобетонных элементов из высокопрочного бетона в зависимости от величины эксцентриситета приложения кратковременной нагрузки.

7. Целесообразным следует считать использование разработанных методик при расчете пространственных железобетонных конструкций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ДСТУ Б В.2.6-156:2010 [Чинний від 2011-06-01]. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2011. – 118 с.
2. **Гічко, В. В.** Несуча здатність гнучких позacentрово стиснутих стійок деформаційним методом / В. В. Гічко // Будівельні конструкції : міжвідомчий наук.-тех. зб. – 2011. – № 74, кн. 1. – С. 623–628.
3. **СНиП 52.01-2003.** Бетонные и железобетонные конструкции. Нормы проектирования. – М. : Госстрой России, 2004. – 194 с.
4. **Бамбура, А. М.** Визначення стійкості залізобетонних гнучких позacentрово стиснутих елементів за спрощеною методикою / А. М. Бамбура, В. В. Гічко // Будівельні конструкції : міжвідомчий наук.-тех. зб. – 2013. – № 78, кн. 2. – С. 64–71.
5. **Гічко, В. В.** Експериментальні дослідження напружено-деформованого стану позacentрово стиснутих гнучких стійок / В. В. Гічко // Вісн. Одеської державної академії будівництва та архітектури. – 2010. – № 38. – С. 138–143.
6. **Бамбура, А. Н.** Исследование кратковременной устойчивости сжатых железобетонных элементов при нешарнирном закреплении на концах: дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / Бамбура Андрей Николаевич. – Киев, 1978. – 199 л.
7. **Каюмов, Р. Х.** Устойчивость гибких железобетонных стержней из высокопрочного бетона : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / Каюмов Рашид Хайретдинович. – Киев, 1972. – 201 л.
8. **Лычѳв, А. С.** Надѳжность железобетонных конструкций : учеб.-метод. пособие / А. С. Лычѳв, В. П. Корякин. – Куйбышев, 1974. – 123 с.

Статья сдана в редакцию 11 декабря 2014 года

Виталий Викторович Гичко, научный сотрудник, Государственный научно-исследовательский институт строительных конструкций. E-mail: wit.82@ukr.net.

Vitaly Viktorovich Gichko, research fellow, State Research Institute of Steel Structures. E-mail: wit.82@ukr.net.