И.К. МАНАЕНКОВ¹¹ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,
г. Москва, Россия

К РАСЧЕТУ КРИВИЗНЫ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК НА ОСНОВЕ ДЕФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

Аннотация. В статье рассмотрены основные предпосылки к расчету железобетонных конструкций на основании деформационной модели. Обозначены основные особенности и возможности расчета. Выбраны диаграммы состояния, позволяющие рассчитывать железобетонные балки, в том числе, с применением косвенного армирования сжатой зоны. Показана возможность учета работы бетона растянутой зоны после образования нормальных трещин путем перехода к диаграмме усредненного деформирования арматуры $\sigma_{sm}-\epsilon_{sm}$ посредством введения в расчеты коэффициента ψ_s . Для трех серий железобетонных балок представлены результаты расчета кривизны в зоне чистого изгиба с учетом коэффициента ψ_s и без. Произведено сравнение с результатами проведенных экспериментов.

Ключевые слова: нелинейная деформационная модель, диаграмма состояния, изгибаемый элемент, косвенное армирование, трещины, кривизна.

I.K. MANAENKOV¹¹National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

ON THE CALCULATION OF CURVATURE OF REINFORCED CONCRETE BEAMS BASED ON THE DEFORMATION MODEL

Abstract. The article considers the basic prerequisites for the calculation of reinforced concrete structures based on the deformation model. The main features and calculation options are indicated. Deformation diagrams have been selected to calculate reinforced concrete beams, including those using indirect reinforcement of the compressed zone. The work of concrete in the stretched area after the formation of normal cracks is taken into account by switching to the diagram of the average deformation of the reinforcement $\sigma_{sm}-\epsilon_{sm}$ by introducing the coefficient ψ_s into the calculations. For three series of reinforced concrete beams the results of calculating the curvature in the zone of pure bending with the coefficient ψ_s and without are presented. Comparison with the results of the experiments is shown.

Keywords: nonlinear deformation model, deformation diagram, bending element, indirect reinforcement, cracks, curvature.

Введение

Современный уровень развития науки и широкое распространение компьютерных технологий позволяют реализовывать на практике методы расчета строительных конструкций, позволяющие описывать напряженно-деформированное состояние (НДС) более приближенно к реальному и учитывать особенности распределения напряжений и деформирования на различных этапах нагружения. При этом для железобетонных конструкций необходимо учитывать ярко выраженный нелинейный характер работы [1,2]. И хотя современные программные комплексы, реализующие метод конечных элементов, представляют различные модели железобетона [3-6], многие из них достаточно сложны и сходимость решения сильно зависит от введенных параметров материала, размеров сетки конечных элементов и других факторов. Сами нелинейные расчеты методом конечных элементов весьма трудоемки, требуют высокой квалификации пользователя и являются «напряженной борьбой за результат»

[5]. В идеале для первичной отработки расчетной схемы требуется натурный эксперимент на простых конструкциях с понятным НДС, по результатам которого апробированную модель применяют для анализа более сложных конструкций.

Также стоит упомянуть о том, что большой проблемой расчета железобетонных конструкций является учет влияния трещин, возникающих в бетоне, как в процессе изготовления, так и в процессе работы под нагрузкой [7,8]. При этом, ввиду неоднородной структуры железобетона, предсказание точного положения трещины является крайне сложной задачей, которая во многом не имеет решения до сих пор [9]. В этой связи учет деградации бетона, вызванной появлением и раскрытием трещин, на практике решается введением в расчет соответствующих зависимостей напряжение-деформация (σ - ε).

Ввиду вышесказанного, для инженерных расчетов российские нормы проектирования железобетонных конструкций [10] предлагают достаточно гибкий инструмент – метод расчета по деформационной модели, который относительно прост в использовании и дает возможность оценить эффективность разрабатываемых конструктивных решений. В основе метода лежит выбор диаграмм состояния бетона и арматуры, позволяющих учесть такие факторы как наличие косвенного армирования [11-17], добавление в состав бетона различных видов фибры [18-20], влияние низких отрицательных и повышенных температур [21,22] и другие [23-26]. Другими важными особенностями деформационной модели являются единый подход к расчетам по прочности, трещиностойкости и деформациям и отсутствие ограничений формы поперечного сечения и расположения арматуры в сечении [21].

Целью работы является выбор диаграмм состояния для вычисления кривизны железобетонных балок в зоне чистого изгиба на основании деформационной модели, отработка методики расчета и сравнение полученных результатов с экспериментальными данными.

Модели и методы

Были изготовлены и испытаны 3 серии железобетонных балок [12,13], каждая из которых включала два образца с различными коэффициентами косвенного армирования сжатой зоны и образец без косвенного армирования. Серии отличались площадью армирования растянутой зоны A_s , которое выполнялось из двух стержней класса А400 $\varnothing 22$, $\varnothing 25$, $\varnothing 28$ для серий I, II, III соответственно. Косвенное армирование в сжатой зоне балок выполнялись в виде поперечных сварных сеток, изготовленных посредством контактной точечной сварки из арматуры $\varnothing 6$ В500. Размеры поперечного сечения балок 150x200 мм, рабочий пролет 1500 мм. Балки испытывались по схеме чистого изгиба, нагрузка посредством распределительной траверсы прикладывалась в третях пролета (рисунок 1, 2). Прогибы балок измерялись цифровыми прогибомерами. Для замера кривизны в зоне чистого изгиба на боковую поверхность балки наклеивались тензорезисторы, также тензодатчики клеились на нижнюю продольную арматуру перед заливкой балок.

Рисунок 1 – Схема испытания балок:

П – прогибомер; М – мессура на основе индикатора часового типа; 1-14 – тензорезисторы

Рисунок 2 – Подготовка балки к испытаниям

Все тензодатчики размещались в двух сечениях, попарно дублируя друг друга, и при обработке результатов производилось осреднение показаний. Для контроля на верхней и нижней гранях балки размещались мессуры на основе индикаторов часового типа. Нагрузка прикладывалась ступенями с десятиминутными выдержками, во время которых производилось снятие показаний приборов.

Прочность R_b и начальный модуль упругости бетона E_{b0} определялись по результатам испытаний на сжатие бетонных призм размерами 10x10x40 см. Прочность продольного R_s и косвенного $R_{s,xy}$ армирования определялись по результатам испытаний стержней на растяжение. Характеристики опытных балок и полученные по результатам испытаний значения изгибающего момента трещинообразования M_{crc} и максимального изгибающего момента M_{ult} приведены в таблице 1. Так как косвенное армирование балок включается в работу постепенно с ростом нагрузки и деформаций сжатой зоны, а первые трещины в растянутой зоне образуются при небольших значениях нагрузки, то косвенное армирование не оказывает существенного влияния на величину M_{crc} [17] и для большей точности в таблице принято среднее значение по каждой серии.

Таблица 1 – Характеристики испытываемых железобетонных балок

Шифр образца	R_b , МПа	E_{b0} , МПа·10 ³	A_s , см ²	R_s , МПа	$\mu_{s,xy}$	$R_{s,xy}$, МПа	M_{crc} , кНм	M_{ult} , кНм
БС-I-0	28,4	30,9	7,33	439	-	-	9,3	38,9
БС-I-1					0,025	492		43,2
БС-I-2					0,05	492		43,1
БС-II-0	30,1	31,4	9,43	437	-	-	10,0	45,2
БС-II-1					0,025	492		53,2
БС-II-2					0,05	492		56,4
БС-III-0	28,6	30,9	12,4	411	-	-	10,2	39,6
БС-III-1					0,025	492		48,1
БС-III-2					0,05	492		52,5

Для вычисления кривизны балок в зоне чистого изгиба и последующего сравнения с результатами экспериментов была написана программа для ЭВМ, реализующая метод расчета по деформационной модели. Для сжатой зоны бетона с косвенным армированием использовалась диаграмма состояния из работы [14]. Для остальной зоны бетона применена криволинейная диаграмма состояния, предложенная в работах Карпенко Н.И. [25,26]. В растянутой зоне после образования нормальных трещин возможно учесть сдерживающее влияние бетона между трещинами на деформации растянутой арматуры:

$$\varepsilon_{sm} = \frac{\sigma_s}{E_s} - \Delta\varepsilon_{scr} \quad (1)$$

Это влияние учитывают посредством эмпирического коэффициента, предложенного Мурашевым В.И.:

$$\psi_s = c - e\varphi_{sl}\varphi_m \leq 1, \quad (2)$$

где φ_{sl} – коэффициент, учитывающий длительность действия нагрузки и профиль арматурного стержня;

$$\varphi_m = \frac{\sigma_{scr}}{\sigma_s};$$

c, e – константы, значения которых в [10] принимаются 1,0 и 0,8 соответственно.

Но зависимость (2) не подходит для выполнения расчетов по деформационной модели, та как необходимо перейти к вычислению коэффициента ψ_s через относительные деформации арматуры ε_s .

В этой связи в [10] предложена зависимость:

$$\psi_s = \frac{1}{1 + 0,8 \frac{\varepsilon_{scr}}{\varepsilon_s}}, \quad (3)$$

где ε_{scr} – относительная деформация растянутой арматуры в сечении с трещиной сразу после образования сквозной нормальной трещины.

Переход к диаграмме усредненного деформирования арматуры с учетом влияния растянутого бетона между трещинами показан на рисунке 3.

Рисунок 3 – Переход от диаграммы свободного деформирования арматуры σ_s - ε_s к диаграмме усредненного деформирования арматуры σ_{sm} - ε_{sm}

Участок 0-1 (см. рисунок 3) соответствует свободному деформированию арматуры. Участок 3-4 (параллельный участку 0-1) – усредненному деформированию арматуры. На этом участке деформации арматуры вычисляются с учетом коэффициента ψ_s . Для перехода к участку 3-4 на диаграмме необходим участок 2-3. В точке 2 при достижении бетоном предельных деформаций растяжения начинается формирование нормальной трещины, которая становится сквозной (разрастается на всю ширину сечения) при достижении точки 3. Работу растянутого бетона на участке 2-3 учитывают по диаграмме деформирования бетона с нисходящей ветвью, либо уменьшением площади сечения растянутого бетона по мере образования трещины [25].

Таким образом, последовательность расчета кривизны балки в зоне чистого изгиба следующая:

- 1) Определяется значение изгибающего момента трещинообразования M_{crc} (по экспериментальным данным или расчету [26]);
- 2) Вычисляется относительная деформация арматуры ε_{scr} ;
- 3) Строится диаграмма усредненного деформирования арматуры $\sigma_{sm}-\varepsilon_{sm}$;
- 4) Выполняется расчет кривизны $1/r$ на основании методики расчета по деформационной модели [10].

Результаты исследования и их анализ

Были выполнены расчеты на основании деформационной модели кривизны балок в зоне чистого изгиба на различных этапах нагружения с учетом влияния растянутого бетона $(1/r)_m^{рас.}$ (принималась диаграмма $\sigma_{sm}-\varepsilon_{sm}$) и без учета $(1/r)^{рас.}$ (принималась диаграмма $\sigma_s-\varepsilon_s$). Сравнение теоретических результатов с экспериментальными значениями кривизны $(1/r)^{экс.}$ представлено в таблице 2 и в графической форме на рисунке 4.

Рисунок 4 – Сравнение экспериментальных и теоретических значений кривизны балок в зоне чистого изгиба:

а) БС-I-0; б) БС-I-1; в) БС-I-2; г) БС-II-0; д) БС-II-1; е) БС-II-2; ж) БС-III-0; и) БС-III-1; к) БС-III-2

■ – $(1/r)^{экс.}$; ● – $(1/r)_m^{рас.}$; + – $(1/r)^{рас.}$.

Таблица 2 – Сравнение экспериментальных и теоретических значений кривизны балок в зоне чистого изгиба.

Шифр образца	M , МПа	$(1/r)^{экс.}$, $м^{-1} \cdot 10^3$	ψ_s	$(1/r)_m^{рас.}$, $м^{-1} \cdot 10^3$	$\frac{(1/r)^{экс.}}{(1/r)_m^{рас.}}$	$(1/r)^{рас.}$, $м^{-1} \cdot 10^3$	$\frac{(1/r)^{экс.}}{(1/r)^{рас.}}$
БС-I-0	12,3	6,71	0,624	5,36	1,25	7,11	0,94
	16,4	9,27	0,690	7,71	1,20	9,66	0,96
	20,5	11,76	0,736	10,23	1,15	12,34	0,95
	24,6	15,30	0,772	12,95	1,18	15,20	1,01
	28,7	18,58	0,799	15,93	1,17	18,34	1,01
	32,8	22,65	0,822	19,33	1,17	21,97	1,03
	36,9	27,85	0,842	23,65	1,18	26,69	1,04
БС-I-1	12,3	5,82	0,624	5,28	1,10	7,00	0,83
	16,4	9,15	0,690	7,59	1,20	9,51	0,96
	20,5	11,28	0,736	10,08	1,12	12,15	0,93
	24,6	14,24	0,772	12,74	1,12	14,95	0,95
	28,7	17,37	0,799	15,63	1,11	17,98	0,97
	32,8	21,09	0,821	18,84	1,12	21,37	0,99
	36,9	25,02	0,840	22,59	1,11	25,34	0,99
БС-I-2	12,3	6,39	0,624	5,19	1,23	6,89	0,93
	16,4	8,43	0,690	7,46	1,13	9,35	0,90
	20,5	11,06	0,736	9,89	1,12	11,93	0,93
	24,6	14,22	0,772	12,48	1,14	14,66	0,97
	28,7	17,16	0,799	15,29	1,12	17,61	0,97
	32,8	20,32	0,821	18,37	1,11	20,84	0,98
	36,9	24,14	0,840	21,91	1,10	24,59	0,98
БС-II-0	12,3	5,79	0,607	4,75	1,22	6,28	0,92
	16,4	7,73	0,674	6,82	1,13	8,58	0,90
	20,5	10,38	0,722	9,03	1,15	10,88	0,95
	24,6	13,27	0,758	11,41	1,16	13,38	0,99
	28,7	16,00	0,787	13,99	1,14	16,09	0,99
	32,8	19,60	0,810	16,88	1,16	19,13	1,02
	36,9	23,28	0,830	20,31	1,15	22,85	1,02
БС-II-1	12,3	5,51	0,607	4,84	1,14	6,39	0,86
	16,4	7,49	0,674	6,95	1,08	8,68	0,86
	20,5	10,12	0,722	9,21	1,10	11,08	0,91
	24,6	12,67	0,758	11,62	1,09	13,62	0,93
	28,7	15,44	0,787	14,23	1,08	16,35	0,94
	32,8	18,59	0,810	17,10	1,09	19,36	0,96
	36,9	21,90	0,830	20,36	1,08	22,81	0,96
БС-II-2	12,3	4,95	0,607	4,68	1,06	6,19	0,80
	16,4	6,93	0,674	6,72	1,03	8,40	0,83
	20,5	9,51	0,722	8,89	1,07	10,71	0,89
	24,6	12,34	0,758	11,21	1,10	13,21	0,93
	28,7	14,87	0,787	13,71	1,09	15,91	0,93
	32,8	17,42	0,810	16,43	1,06	18,61	0,94
	36,9	20,52	0,829	19,49	1,05	21,84	0,94
БС-III-0	12,3	4,95	0,602	4,44	1,12	5,72	0,87
	16,4	6,97	0,670	6,35	1,10	7,78	0,90
	20,5	9,37	0,718	8,41	1,11	9,97	0,94
	24,6	11,97	0,755	10,65	1,12	12,31	0,97
	28,7	14,66	0,784	13,11	1,12	14,89	0,98
	32,8	18,13	0,808	15,92	1,14	17,87	1,01
	36,9	22,03	0,829	19,47	1,13	21,74	1,01

Окончание таблицы 2

БС-III-1	12,3	4,36	0,602	4,44	0,98	5,72	0,76
	16,4	6,56	0,670	6,36	1,03	7,79	0,84
	20,5	9,13	0,718	8,42	1,08	9,98	0,91
	24,6	11,55	0,755	10,66	1,08	12,32	0,94
	28,7	14,21	0,784	13,09	1,09	14,87	0,96
	32,8	16,90	0,808	15,83	1,07	17,74	0,95
	36,9	20,15	0,828	19,06	1,06	21,18	0,95
БС-III-2	12,3	4,32	0,602	4,36	0,99	5,62	0,77
	16,4	6,61	0,670	6,24	1,06	7,65	0,86
	20,5	8,99	0,718	8,25	1,09	9,78	0,92
	24,6	11,4	0,755	10,42	1,09	12,06	0,95
	28,7	13,79	0,784	12,78	1,08	14,52	0,95
	32,8	16,65	0,807	15,40	1,08	17,27	0,96
	36,9	19,52	0,827	18,44	1,06	20,48	0,95

Можно наблюдать качественное соответствие расчетного характера нарастания кривизны в зоне чистого изгиба опытным данным. При этом, нужно отметить, что для испытанных образцов фактическая кривизна, а, следовательно, и прогиб, оказались больше теоретического значения, вычисленного с учетом коэффициента ψ_s . Разница составила от 1% до 25%. Между тем при расчетах без учета ψ_s на поздних этапах деформирования разница в пределах 6%. Это свидетельствует о том, что коэффициент ψ_s , рассчитанный по методике [10] несколько переоценивает сдерживающее влияние растянутого бетона на деформации арматуры для испытанных образцов. Возможно, это связано с достаточно большим диаметром продольного армирования в испытанных балках $\varnothing 22$ - $\varnothing 28$ при относительно небольшом размере поперечного сечения бетона.

Выводы

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

- 1) Деформационная модель обеспечивает единый подход к расчету железобетонных конструкций по 1 и 2 группам предельных состояний и при этом дает возможность использовать различную форму поперечного сечения и конструктивные мероприятия, меняющие прочностные и деформационные характеристики бетона, например, косвенное армирование;
- 2) Характер деформирования балок в зоне чистого изгиба по результатам расчета по деформационной модели хорошо соответствует экспериментальным данным;
- 3) Учет коэффициента ψ_s для испытанных образцов приводит к занижению расчетной кривизны балок в зоне чистого изгиба, что свидетельствует о необходимости дальнейшего совершенствования методики расчета и установления границ применимости коэффициента ψ_s .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арленинов П.Д., Крылов С.Б. Современное состояние нелинейных расчетов железобетонных конструкций // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2017. № 3. С. 50-53.
2. Tamrazyan A., Avetisyan L. Comparative analysis of analytical and experimental results of the strength of compressed reinforced concrete columns under special combinations of loads. В сборнике: MATEC Web of Conferences. 2016. С. 01029.
3. Wu, Jian-Ying A geometrically regularized gradient-damage model with energetic equivalence // Journal of Intelligent Manufacturing. 2019. Vol. 328. Pp. 612-637.
4. Wolfs R.J.M.; Bos F.P.; Salet T.A.M. Early age mechanical behaviour of 3D printed concrete: Numerical modelling and experimental testing // Cement and Concrete Research. 2018. Vol. 106. Pp. 103-116.

5. Фялко С.Ю. Применение метода конечных элементов к анализу прочности и несущей способности тонкостенных железобетонных конструкций с учетом физической нелинейности. М.: Издательство АСВ, 2018. 192 с.
6. Perelmuter A.V., Fialko S.Y. Problems of computational mechanics relate to finite-element analysis of structural constructions // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2005. Vol. 2. No.1. Pp. 72-86.
7. Contact technologies in design of reinforced concrete beams with cracks / S.B. Krylov, V.I. Travush, A.S. Krylov, D.V. Konin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering electronic publishing. 2018. Vol. 456. 012004.
8. Тамразян А.Г., Орлова М.А. Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния железобетонных изгибаемых элементов с трещинами // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. № 6 (53). С. 98-105.
9. Rabczuk T., Belytschko T. Application of particle methods to static fracture of reinforced concrete structures // International journal of fracture. 2006. Vol. 137. Pp. 19-49.
10. СП 63.13330.2018 «СНиП 52-01-2003 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения» – М.: Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации, 2018.
11. Ahmed M., Liang Q.Q., Patel V.I. et al. Numerical analysis of axially loaded circular high strength concrete-filled double steel tubular short columns // Thin-Walled Structures, 2019. Vol. 138. P. 105-116.
12. Tamrazyan A.G., Manaenkov I.K., Koroteev D.D. Study of Reinforced Concrete Beams with Indirect Reinforcement of Compressed Zone in the Form of Cross Welded Mesh // J.Mech.Cont.& Math. Sci., 2019. No. 1S. P. 621-631.
13. Манаенков И.К. Экспериментальные исследования железобетонных балок с косвенным армированием сжатой зоны поперечными сварными сетками // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2018. № 5 (377). С. 243-247.
14. Манаенков И.К. К совершенствованию диаграммы сжатого бетона с косвенным армированием // Строительство и реконструкция. 2018. № 2 (76). С. 41-50.
15. Krishan A.L., Chernyshova E.P., Sabirov R.R. On deformation charting for concrete filled steel tube columns concrete core and steel shell // Applied Mechanics and Materials. 2018. T. 878. С. 126-131.
16. Лапшинов А.Е., Тамразян А.Г. К влиянию поперечного армирования на прочность и деформативность сжатых бетонных элементов, армированных композитной полимерной арматурой // Строительство и реконструкция. 2018. № 4 (78). С. 20-30.
17. Расторгуев Б.С., Ванус Д.С. Расчет изгибаемых железобетонных элементов с косвенным сетчатым армированием сжатой зоны // Промышленное и гражданское строительство. 2010. № 12. С. 58-60.
18. Nurtudinov M., Solovyev V., Panchenko A. Influence of composite fibers on the properties of heavy concrete // MATEC Web of Conferences 5. Сер. "5th International Scientific Conference "Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education", IPICSE 2016". 2016. UNSP 04026.
19. Модели нелинейного деформирования углеродофибробетона при статическом и кратковременном динамическом воздействиях / В.С. Плевков, В.В. Белов, И.В. Балдин., А.В. Невский // Вестник гражданских инженеров. 2016. № 3 (56). С. 72-82.
20. The strength and strain of high-strength concrete elements with confinement and steel fiber reinforcement including the conditions of the effect of elevated temperatures / V.Korsun, S. Mashtaler, N. Vatin, A. Korsun, A. Franchi, P. Crespi // Procedia Engineering. 2015. Vol. 117. Pp. 970-979.
21. Трекин Н.Н., Онана Ж. Использование деформационной модели для определения трещиностойкости изгибаемых элементов с учетом повышенных температур // Промышленное и гражданское строительство. 2017. № 6. С. 34-38.
22. О диаграммном методе определения параметрических точек процесса микротрещинообразования в бетонных элементах при осевом сжатии в условиях действия низкой отрицательной температуры / Н.И. Карпенко, В.Н. Ярмаковский, С.Н. Карпенко, Д.З. Кадиев // Жилищное строительство. 2019. № 6. С. 3-9.
23. Колчунов В.И., Колчунов В.И., Федорова Н.В. Деформационные модели железобетона при особых воздействиях // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 8. С. 54-60.
24. Адищев В.В., Иванов А.И., Петрова О.В. Корректность применения нелинейных диаграмм деформирования бетона в расчете внецентренно сжатых колонн: в сб.: "Лолейтовские чтения-150" / под ред. А.Г. Тамразяна. 2018. С. 25-31.
25. Карпенко Н.И., Карпенко С.Н. К построению физических соотношений в инкрементальной форме для расчета железобетонных конструкций с трещинами / Тр. 1-й Всероссийской конф. «Бетон на рубеже третьего тысячелетия». М., 2001. Кн. 2. С. 765-777.
26. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. М.: Стройиздат, 1996. 416 с.
27. Трекин Н.Н., Кодыш Э.Н., Трекин Д.Н. Расчет по образованию нормальных трещин на основе деформационной модели // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 7. С. 74-78.

REFERENCES

1. Arleninov P.D., Krylov S.B. Sovremennoe sostoyanie nelineynykh raschetov zhelezobetonnykh konstruktсий // Seysmostoykoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzheniy. 2017. № 3. S. 50-53.
2. Tamrazyan A., Avetisyan L. Somparative analysis of analytical and experimental results of the strength of compressed reinforced concrete columns under special combinations of loads. V sbornike: MATEC Web of Conferences. 2016. S. 01029.
3. Wu, Jian-Ying A geometrically regularized gradient-damage model with energetic equivalence // Journal of Intelligent Manufacturing. 2019. Vol. 328. Pp. 612-637.
4. Wolfs R.J.M.; Bos F.P.; Salet T.A.M. Early age mechanical behaviour of 3D printed concrete: Numerical modelling and experimental testing // Cement and Concrete Research. 2018. Vol. 106. Pp. 103-116.
5. Fialko S.YU. Primenenie metoda konechnykh elementov k analizu prochnosti i nesushchey sposobno-sti tonkostennykh zhelezobetonnykh konstruktсий s uchetom fizicheskoy nelineynosti. M.: Izdatel'stvo ASV, 2018. 192 s.
6. Perelmuter A.V., Fialko S.Y. Problems of computational mechanics relate to finite-element analysis of structural constructions // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2005. Vol. 2. No.1. Pp. 72-86.
7. Contact technologies in design of reinforced concrete beams with cracks / S.B. Krylov, V.I. Travush, A.S. Krylov, D.V. Konin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering electronic publishing. 2018. Vol. 456. 012004.
8. Tamrazyan A.G., Orlova M.A. Eksperimental'nye issledovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya zhelezobetonnykh izgibaemykh elementov s treshchinami // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. 2015. № 6 (53). S. 98-105.
9. Rabczuk T., Belytschko T. Application of particle methods to static fracture of reinforced concrete structures // International journal of fracture. 2006. Vol. 137. Pp. 19-49.
10. SP 63.13330.2018 "SNiP 52-01-2003 Betonnye i zhelezobetonnye konstruktсии. Osnovnye polo-zheniya" - M.: Ministerstvo stroitel'stva i zhilishchno-kommunal'nogo khozyaystva Rossiyskoy Federatsii, 2018.
11. Ahmed M., Liang Q.Q., Patel V.I. et al. Numerical analysis of axially loaded circular high strength concrete-filled double steel tubular short columns // Thin-Walled Structures, 2019. Vol. 138. P. 105-116.
12. Tamrazyan A.G., Manaenkov I.K., Koroteev D.D. Study of Reinforced Concrete Beams with Indirect Reinforcement of Compressed Zone in the Form of Cross Welded Mesh // J.Mech.Cont.& Math. Sci., 2019. No. 1S. P. 621-631.
13. Manaenkov I.K. Eksperimental'nye issledovaniya zhelezobetonnykh balok s kosvennym armirovaniem szhatoy zony poperechnymi svarnymi setkami // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti. 2018. № 5 (377). S. 243-247.
14. Manaenkov I.K. K sovershenstvovaniyu diagrammy szhatogo betona c kosvennym armirovaniem // Stroitel'stvo i rekonstruktsiya. 2018. № 2 (76). S. 41-50.
15. Krishan A.L., Chernyshova E.P., Sabirov R.R. On deformation charting for concrete filled steel tube columns concrete core and steel shell // Applied Mechanics and Materials. 2018. T. 878. S. 126-131.
16. Lapshinov A.E., Tamrazyan A.G. K vliyaniyu poperechnogo armirovaniya na prochnost' i deformativnost' szhatykh betonnykh elementov, armirovannykh kompozitnoy polimernoy armaturoy // Stroitel'stvo i rekonstruktsiya. 2018. № 4 (78). S. 20-30.
17. Rastorguev B.S., Vanus D.S. Raschet izgibaemykh zhelezobetonnykh elementov s kosvennym setchatym armirovaniem szhatoy zony // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2010. № 12. S. 58-60.
18. Nurtudinov M., Solovyev V., Panchenko A. Influence of composite fibers on the properties of heavy concrete // MATEC Web of Conferences 5. Ser. "5th International Scientific Conference "Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education", IPICSE 2016". 2016. UNSP 04026.
19. Modeli nelineynogo deformirovaniya uglerodofibrobeta pri staticheskom i kratkovremennom dinamicheskom vozdystviyakh / V.S. Plevkov, V.V. Belov, I.V. Baldin., A.V. Nevskiy // Vestnik grazhdanskikh inzhenerov. 2016. № 3 (56). S. 72-82.
20. The strength and strain of high-strength concrete elements with confinement and steel fiber reinforcement including the conditions of the effect of elevated temperatures / V.Korsun, S. Mashtaler, N. Vatin, A. Korsun, A. Franchi, P. Crespi // Procedia Engineering. 2015. Vol. 117. Pp. 970-979.
21. Trekin N.N., Onana ZH. Ispol'zovanie deformatsionnoy modeli dlya opredeleniya treshchinostoyko-sti izgibaemykh elementov s uchetom povyshennykh temperatur // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2017. № 6. S. 34-38.
22. O diagrammnom metode opredeleniya parametricheskikh toчек protsessa mikrotreshchinoobrazovaniya v betonnykh elementakh pri osevom szhatii v usloviyakh deystviya nizkoy otritsatel'noy temperatury / N.I. Karpenko, V.N. Yarmakovskiy, S.N. Karpenko, D.Z. Kadiev // Zhilishchnoe stroitel'stvo. 2019. № 6. S. 3-9.
23. Kolchunov V.I., Kolchunov V.I., Fedorova N.V. Deformatsionnye modeli zhelezobeta pri oso-bykh vozdystviyakh // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2018. № 8. S. 54-60.

24. Adishchev V.V., Ivanov A.I., Petrova O.V. Korrektnost` primeneniya nelineynykh diagramm deformirovaniya betona v raschete vnetsentrenno szhatykh kolonn: v sb.: "Loleytovskie chteniya-150" / pod red. A.G. Tamrazyana. 2018. S. 25-31.
25. Karpenko N.I., Karpenko S.N. K postroeniyu fizicheskikh sootnosheniy v inkremental`noy forme dlya rascheta zhelezobetonnykh konstruktsey s treshchinami / Tr. 1-y Vserossiyskoy konf. "Beton na rubezhe tret`e-go tysyacheletiya". M., 2001. Kn. 2. S. 765-777.
26. Karpenko N.I. Obshchie modeli mekhaniki zhelezobetona. M.: Stroyizdat, 1996. 416 s.
27. Trekin N.N., Kodysh E.N., Trekin D.N. Raschet po obrazovaniyu normal`nykh treshchin na osnove deformatsionnoy modeli // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel`stvo. 2016. № 7. S. 74-78.

Информация об авторах:

Манаенков Иван Константинович

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Москва, Россия,

канд. техн. наук, доцент кафедры железобетонных и каменных конструкций.

E-mail: manaenkov.i.k@gmail.com

Information about authors:

Manaenkov Ivan K.

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia, candidate in tech. sc., associated prof. of the dep. of reinforced concrete and stone structures.

E-mail: manaenkov.i.k@gmail.com