

С.И. МЕРКУЛОВ¹¹ФГБОУ ВО «Курский государственный университет», г. Курск, Россия

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ СОСТАВНОГО СЕЧЕНИЯ ПРИ ВНЕЦЕНТРЕННОМ СЖАТИИ

Аннотация. Приведены результаты исследования несущей способности и деформативности внецентренно сжатых железобетонных составных элементов малой гибкости, изготовленных добетонированием сборных элементов до проектных размеров сечения. Исследованы совместная работа в составном сечении бетонов с различными прочностными и деформативными характеристиками при кратковременном и длительном нагружении, влияние предыстории нагружения на деформативность длительно нагруженных внецентренно сжатых железобетонных элементов, выявлен механизм перераспределения внутренних усилий между составными частями сечения в процессе нагружения и во времени, установлен характер разрушения опытных образцов. Установлено, что совместная работа бетонов с различными деформативными характеристиками значительно увеличивает предельную сжимаемость этих бетонов. При длительном действии внецентренно приложенной нагрузки на элементы малой гибкости выявлена возможность достижения предельного состояния второй группы.

Ключевые слова: бетон, составное сечение, внецентренное сжатие, предельная сжимаемость бетона, деформативность бетона, ползучесть

S.I. MERKULOV¹¹Kursk State University, Kursk, Russia

EXPERIMENTAL RESEARCHES REINFORCED CONCRETE CONSTRUCTIONS COMPOSITE SECTION WITH OFF-CENTER COMPRESSION

Abstract. The results of a study of the bearing capacity and deformability of non-centrally compressed reinforced concrete composite elements of low flexibility, made by concreting prefabricated elements to the design cross-section dimensions, are presented. The joint work in the composite section of concretes with various strength and deformation characteristics under short-term and long-term loading, the influence of loading history on the deformability of long-term loaded non-centrally compressed reinforced concrete elements, the mechanism of redistribution of internal forces between the components of the section during loading and over time, the nature of destruction of prototypes is established. It has been established that the joint work of concretes with various deformative characteristics significantly increases the ultimate compressibility of these concretes. With prolonged action of an off-center applied load on elements of low flexibility, the possibility of reaching the limiting state of the second group was revealed.

Keywords: concrete, composite section, off-center compression, ultimate compressibility of concrete, deformability of concrete, creep

Введение

Железобетонные конструкции составного сечения находят широкое применение в капитальном строительстве. В частности, составные конструкции применяются в зданиях и сооружениях металлургии, горнообработывающей и химической промышленности, энергетики, сложных подземных сооружений, в мостостроении, для которых не применимы полносборные решения.

© Меркулов С.И., 2025

Составные конструктивные решения реализуются в перекрытиях и покрытиях зданий, при этом обеспечивается совместная работа ограждающих и несущих конструкций междуэтажных перекрытий и покрытий, повышая жесткость каркаса, снижая расход бетона и арматуры. Составные железобетонные конструкции эффективно использовать при усилении эксплуатируемых конструкций [1-7]. Особенностью составных железобетонных конструкций является совместная работа двух и более бетонов с различными прочностными и деформативными характеристиками. Еще более сложное взаимодействие составных частей сечения имеет место в усиленных железобетонных конструкциях. Работа в составе конструкций бетонов с различными прочностными и деформативными свойствами, при наличии в одном из бетонов повреждений силового и не силового (температурного, влажностного, коррозионно-агрессивного) характера; наличие в усиливаемом элементе напряженно-деформируемого состояния, обусловленного предысторией нагружения; влияние технологических воздействий при проведении работ по усилению на напряженное состояние усиливаемого элемента и в целом на усиленную конструкцию; многообразие конструктивных решений усиления железобетонных конструкций; изменение граничных условий и трансформация внутренних и внешних связей до и после осуществления усиления; адаптация конструкций и конструктивных систем к внешним воздействиям; трансформация конструктивных систем зданий и сооружений в процессе эксплуатации и в результате усиления [5,6,8,9]. При разработке методик расчета железобетонных конструкций необходимо правильно оценить работы [9-14]. Особым образом в железобетонных конструкциях составного сечения проявляется нелинейность деформирования бетонов, определяя нестационарность напряженно-деформированного состояния конструкций, сложный характер перераспределения усилий между бетонами и арматурой по мере роста нагрузки и во времени. Инженерный метод нелинейной теории железобетона, предложенный В.М.Бондаренко, позволяет сформулировать исходные положения и гипотезы, построить разрешающие уравнения составных конструкций с учетом закономерностей физически нелинейно деформируемого тела, предыстории нагружения, совместность действия силовых и средовых факторов [15-17]. Однако необходимо для разработки расчетной методики железобетонных конструкций составного сечения экспериментально определить качественные и количественные характеристики напряженно-деформированного состояния таких конструкций при различных нагружениях.

Цель исследований состояла в изучении прочности и деформативности железобетонных конструкций составного сечения при кратковременном и длительном действии нагрузки, в выявлении закономерностей в перераспределении внутренних усилий между составными частями конструкции внецентренно сжатых элементов, а также влияния предыстории нагружения на несущую способность и деформативность железобетонных конструкций составного сечения.

Метод

В рамках работы были испытаны масштабные образцы составного сечения. Проведены испытания при кратковременном и длительном действии нагрузки. Образцы для кратковременных испытаний обозначены как К-1...К-3, для длительных испытаний Д-1...Д-3. Сечения опытных образцов включают сборный элемент, который добетонировался до полного размера сечения (см. рис.1). Размеры образцов 150x180x1400 мм. Образцы изготовлены из тяжелого бетона: сборная часть из бетона В40, монолитная – из бетона В20. В опытных образцах серий К-1,2 и Д-1,2 продольная арматура $\varnothing 6$ А-240, в образцах серий К-3 и Д-3 - $\varnothing 15$ К1400. Сборные элементы образцов серий К3 и Д3 выполнены предварительно напряженными, что моделирует наличие напряженного состояния в железобетонных конструкциях на момент их усиления. Сборный элемент образцов серий К-3 и Д-3 имеет тавровое сечения для обеспечения устойчивости элемента в момент обжатия. Для предотвращения проскальзывания арматуры К1400 в момент обжатия в торцах на канаты

установлены спирали $\varnothing 36$ мм из проволоки $\varnothing 3$. Обжатие сборных элементов выполнили через 14 суток после бетонирования. В момент обжатия уровень напряжений составил 0,6 от прочности бетона, т.е. в бетоне сборного элемента до домоноличивания проявляются неупругие деформации.

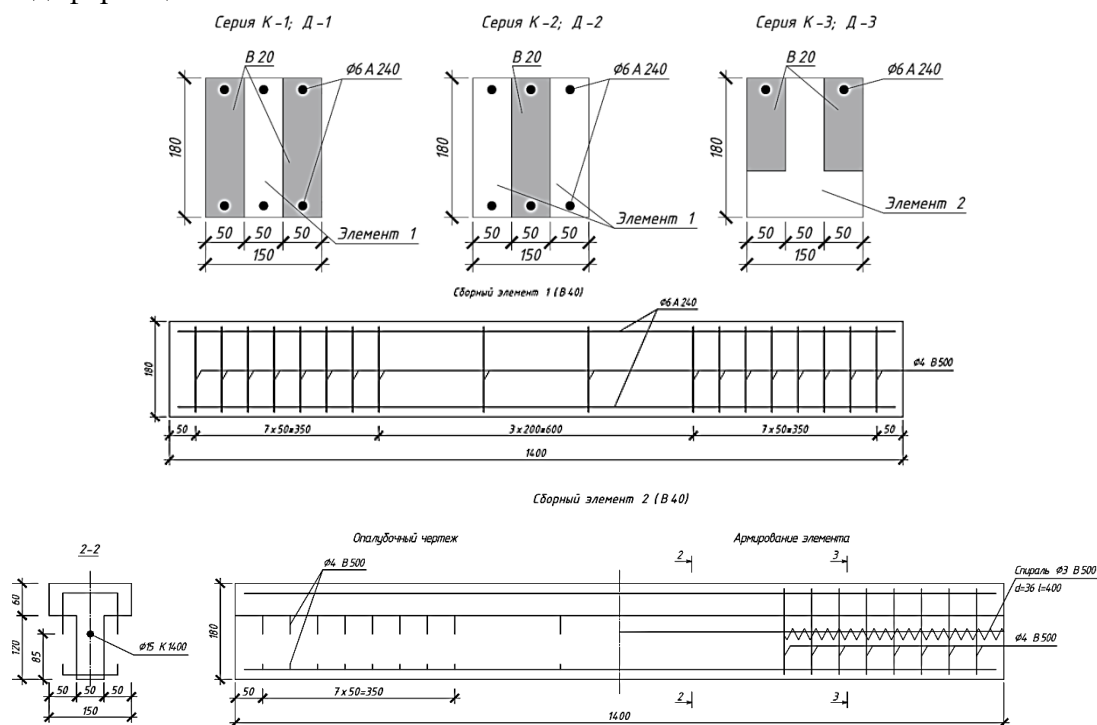


Рисунок 1 – Конструкция опытных образцов

Контролируемая величина напряжений предварительного натяжения составила 1060 МПа. Сборные элементы добетонированы в возрасте 28 суток. Прочностные и деформативные характеристики бетонов определяли испытанием кубов размерами 10x10x10 см и призм размерами 10x10x40 см в соответствии с ГОСТ Р 53321-2008, ГОСТ 24452-80, поделены прочность бетона (R, R_b), модуль упругости бетона (E_b), предельная сжимаемость бетона (ϵ_{bu}) (см. таблицу 1).

Таблица 1 – Прочностные и деформативные характеристики бетонов

Бетон	Возраст бетона, сут	R , МПа	R_b , МПа	$E_b \times 10^{-3}$, МПа	$\epsilon_{bu} \times 10^5$
В20	28	24,0	20,4	20,6	282
	60	25,3	20,9	20,4	280
	90	26,8	21,5	20,2	278
	240	27,4	21,7	20,1	260
В40	28	42,8	34,4	34,2	217
	60	44,1	35,0	33,8	210
	90	44,7	35,3	34,6	210
	240	45,8	36,4	34,6	202

Результаты и обсуждения

Кратковременные испытания образцов на внецентренное сжатие выполнены на прессе ПММ-200. Нагружение проводили согласно ГОСТ 8829-94 поэтапно ступенями до 5% от разрушающей нагрузки, на каждой ступени осуществлялась выдержка образца под нагрузкой в течение 10 минут. Эксцентриситет приложения нагрузки 3 см (в ядровой точке). Нагрузка

прикладывалась через опорные устройства, позволяющие корректировать эксцентриситет и обеспечивать нулевые деформации на менее сжатой грани образца. На момент испытаний возраст бетона элементов 1 и 2 составил 58-60 суток, возраст бетона домоноличивания – 28-30 суток. Для измерения деформаций на опытных образцах установлены: в средней части на сжатой грани на участке 50 см вдоль каждой из составных частей сечения наклеены тензодатчики, датчики в середине пролета наклеены и в поперечном направлении, на боковых поверхностях по высоте сечения наклеены тензодатчики и установлены индикаторы МИГ-1 с ценой деления 0,001мм. Для фиксации горизонтальных перемещений в середине и на опорах образцов установлены прогибомеры. Такая установка приборов позволяет проследить изменение деформаций образцов в процессе испытаний, соотношение поперечных и продольных деформаций определяет проявление неупругих деформаций бетона. В результате испытаний определены разрушающая нагрузка (N_u), предельная сжимаемость бетонов (ϵ_{bu}), прогиб на этапах нагружения (f). Результаты приведены в табл. 2. Предложенная методика [5] позволяет проследить перераспределение внутренних усилий между частями составного сечения, с увеличением нагрузки усилие передается с бетона В20 на бетон В40 и на арматуру (см. рис.2). Совместная работа бетонов в составе конструкции значительно увеличило сжимаемость бетона В40.

Таблица 2 – Результаты кратковременных испытаний (средние по серии)

Образец	N_u , кН	ϵ_{bu} , $\times 10^5$	Прогиб f (мм) при N/N_u			
			0,2	0,4	0,6	0,8
К-1	542,0	396	0,58	1,27	2,38	4,51
К-2	716,0	308	0,48	1,12	2,36	4,38
К-3	623,0	313	0,51	1,19	2,31	4,46

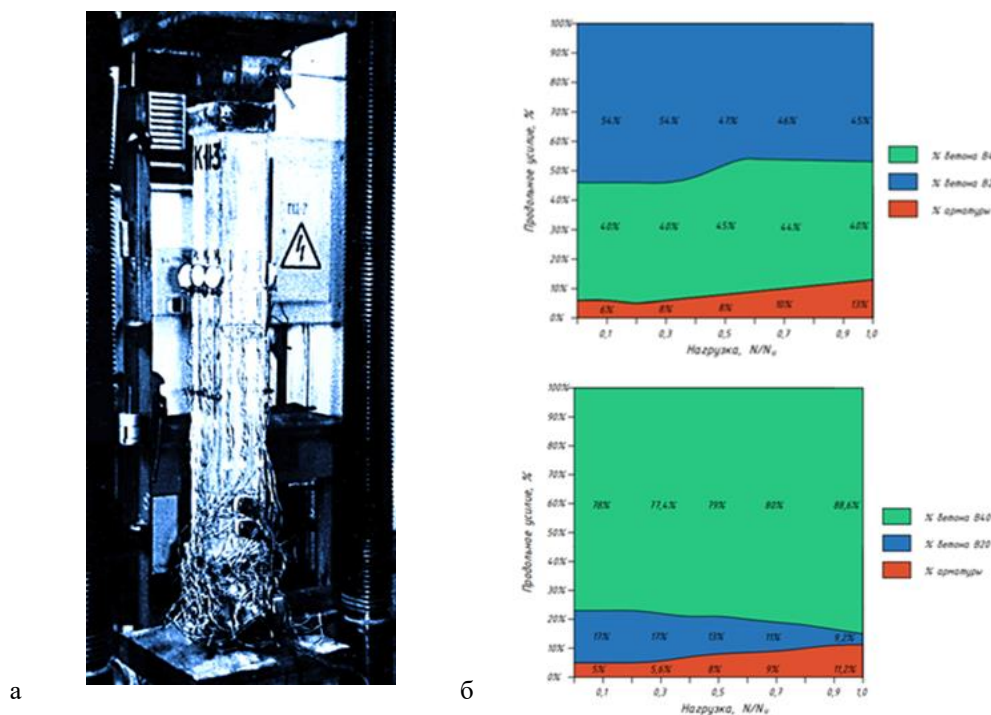


Рисунок 2 – Кратковременные испытания составных элементов

а-общий вид испытаний; б- диаграмма деформаций сечения элемента на примере образцов с эксцентриситетом 3,0 см

Длительные испытания опытных образцов проводили в пружинных установках мощностью 750 кН. Величина длительной нагрузки назначалась так, чтобы начальные напряжения в бетонах превышали границу проявления не упругих свойств и были ниже предела длительной статической прочности бетонов, величина длительной нагрузки принята 0,75 N_u . Нагрузка прикладывалась через ножевые опоры с эксцентриситетом 3 см на границы

ядра сечения. величину длительной нагрузки периодически контролировали по манометру насосной станции и по величине осадки пружин, в случае снижения нагрузки до 3% усилие восстанавливали. В процессе испытаний замерили продольные деформации образцов индикаторами МИГ-1 с ценой деления 0,001мм на боковых гранях и на наиболее сжатой грани, также фиксировали прогибы образцов. Одновременно с основными испытаниями проводили испытания бетонных призм 10х10х40см: ненагруженных для измерения температурно-влажностных деформаций, нагруженных в пружинных установках до уровня $0,75R_b$.

Таблица 3 – Длительные деформации бетона (призм)

Длительность наблюдения, сут	Длительные деформации бетонных призм ($\varepsilon \times 10^5$)				
	Деформации усадки		Деформации нагруженных бетонных призм		
	Бетон В20	Бетон В40	Бетон В20 нагружен в возрасте 60 сут при $\eta=0,75$	Бетон В40 нагружен	
				нагружен в возрасте 14 сут при $\eta=0,6$	нагружен в возрасте 90 сут при $\eta=0,75$
14	19,0	18,4	123,0	139,6	92,0
28	31,3	31,4	174,0	169,0	118,0
60	40,5	46,9	223,0	217,0	140,7
90	44,6	53,9	245,6	234,1	154,3
150	46,0	54,1	264,3	254,9	167,5
240	46,2	54,6	276,9	264,8	174,4

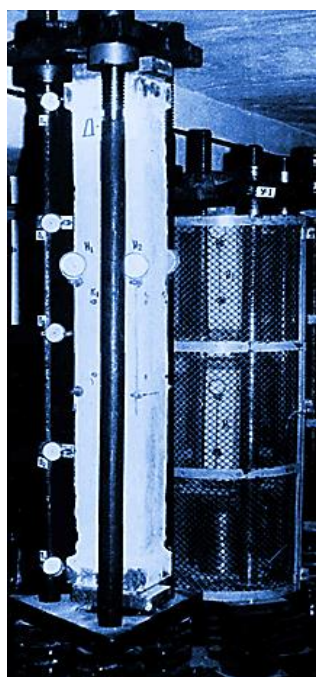
Примечание: $\eta = \sigma_{bi}/R_b$ – уровень длительного нагружения призм, σ_{bi} – начальные напряжения в бетоне, R_b – прочность бетона

Наиболее интенсивный рост деформаций наблюдается в первые 120 суток до 3 раз, а за период 210 суток до 3.6 раза. К концу длительных испытаний деформации сжатой зоны образцов Д-1, Д-2 достигли $560...600 \times 10^{-5}$, что значительно превышает ε_{bu} при испытании бетонных призм. В момент нагружения длительной нагрузки образцов серии Д-3 деформации сжатой зоны составили 187×10^{-5} , деформации бетона элемента 2 с учетом деформаций от обжатия при отпуске преднапряженной арматуры составили 250×10^{-5} , суммарные деформации бетона сборного элемента составили 920×10^{-5} . В результате действия длительной нагрузки прогибы образцов серий Д-1, Д-2, Д-3 соответственно составили 9,5мм; 11,0мм и 11,4мм при длине образцов 1400мм.

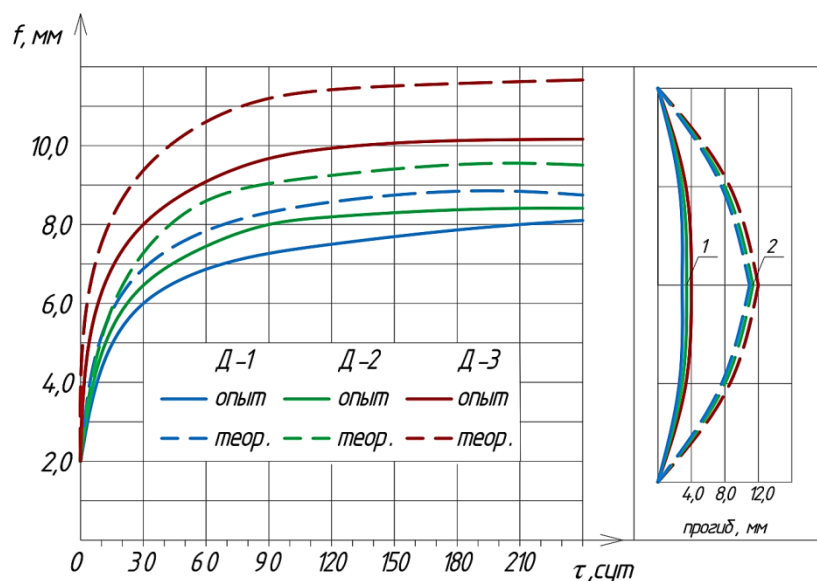
Таблица 4 – Результаты длительных испытаний (средние по серии)

Образец	Нагрузка		Относительные деформации сжатия бетона ($\varepsilon \times 10^5$)						
	N_l , кН	N_l / N_u	При нагру- жении	Через 1 день	Через 15 дней	Через 30 дней	Через 60 дней	Через 210 дней	Восстано- вившаяся при разгрузке
Д-1	406	0,75	157	232	327	420	478	566	166
Д-2	551	0,77	171	249	352	447	496	593	184
Д-3	468	0,75	187	280	446	516	578	669	204

По окончании длительных испытаний образцы серий Д-1, Д-2, Д-3 разгружались и затем были испытаны кратковременной нагрузкой до разрушения. Несущая способность (средняя по серии) образцов серии Д-1 составила 532 кН, Д-2 – 683 кН, Д-3 – 617 кН.



а



б

Рисунок 3 – Длительные испытания составных элементов

а-общий вид испытаний; б-график изменения прогибов внецентренно сжатых элементов в момент нагружения (а) и к концу наблюдения

Одновременно были испытаны образцы этих серий, которые не подвергались нагружению, несущая способность образцов серии Д-1 составила 591 кН, Д-2 – 781 кН, Д-3 – 667кН. Длительное действие нагрузки с последующей разгрузкой снизило несущую способность внецентренно сжатых элементов на величину до 15%, что объясняется структурными нарушениями бетонов.

Закключение

В результате выполненных экспериментальных исследований железобетонных внецентренно сжатых элементов составного сечения при различных режимах нагружения установлено следующее:

1. Получены экспериментальные данные о напряженно-деформированном состоянии внецентренно-сжатых железобетонных элементов при кратковременном и длительном действии нагрузок, установлен характер разрушения и механизм перераспределения внутренних усилий между частями составного сечения с ростом нагрузки.

2. Компонировка составного сечения оказывает влияние на несущую способность и в большей степени на деформативность при внецентренном сжатии. С увеличением в сечении доли бетона В20 и снижением доли бетона В40 разрушающая нагрузка снизилась на 30%, при этом прогиб увеличился в 1,7 раза. Совместная работа бетонов в составном сечении в «связанных» условиях увеличила их предельную сжимаемость.

3. Выявлен механизм перераспределения внутренних усилий между частями составного сечения. В отдельных случаях внутренние усилия в частях сечения могут изменяться до 1,5 раз.

4. Длительные испытания элементов составного сечения при внецентренном сжатии элементов малой гибкости показали, что возможно достижения предельного состояния второй группы, при этом деформации сжатия бетона превысили более, чем в 3,5 раза деформации при начальном нагружении, а прогибы элементов в 4.5 раза. Для железобетонных внецентренно сжатых элементов, подверженных нагружению постоянной статической нагрузкой на уровне

75% от разрушающей и последующей их разгрузкой, наблюдалось снижение разрушающей нагрузки в последующих испытаниях, что связано со структурными нарушениями бетонов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баширов Х.З., Колчунов В.И., Федоров В.С., Яковенко И.А. Железобетонные составные конструкции зданий и сооружений. – М.: АСВ. 2017. 248 с.
2. Федоров В.С., Баширов Х.З., Колчунов В.И. Элементы теории расчета железобетонных конструкций//Academia. Архитектура и строительство. 2014. - №2. – С.226-228.
3. Колчунов В.И., Панченко А.А. Расчет составных тонкостенных конструкций. – М.: АСВ. 1999. 281 с.
4. Рогатнев, Ю.Ф., Потапов Ю.Б., Барабаш Д.Е., Панфилов Д.В., Джавид М.М. Расчет прогибов железобетонных изгибаемых элементов с верхним слоем из высококачественного бетона – Научный вестник МГСУ. 2016. - №3. - С. 26-36.
5. Меркулов С.И. Основы теории реконструкции железобетона. – Курск: Курский гос. техн. унив. 2009. 248 с.
6. Сафина Л.Х. Пути развития теории реконструируемого железобетона//Промышленное и гражданское строительство. 2023 №3. – С. 48-54.
7. Король Е.А. Трехслойные ограждающие железобетонные конструкции из легких бетонов и особенности их расчета. – М.: АСВ. 2001. 256с.
8. Бондаренко В.М., Меркулов С.И. К вопросу развития теории реконструированного железобетона// Бетон и железобетон. 2005. №1. С.25.
9. Бондаренко В.М., Меркулов С.И. Методологические основы теории конструктивной безопасности реконструированного железобетона// Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. . 2008. №3. С.77-80.
10. Тамразян А.Г., Есаян С.Г. Механика ползучести бетона. – М.: МГСУ. 2012. 524с.
11. Гаустов К.З. Нелинейная теория ползучести бетона и расчет железобетонных конструкций. – М.: Физматлит. 2006. 248 с.
12. Крылов С. Б., Гончаров Е.Е. Использование реологических моделей при моделировании ползучести бетона // Промышленное и гражданское стр-во. – 2013. – № 2. – С. 32-33.
13. Hidalgo P.A., Jordan R.M., Martinez M.P. An analytical model to predict the inelastic behavior of shear-wall, reinforced concrete structures//Engineering Structures, 24,1, Jan/ 2022, p. 85-98.
14. Boualam N., Muller A. Zum Einfluss des Zements auf das Kriech- und Schwindverhalten von Beton und Mortel//Ibautil:
15. 14. Internationale Baustofftagung, Weimar, 20-23. Sep., Bd. 1. Weimar: Bauhaus-Univ. Weimar/ 2000. – pp. 1/0485-1/0494.
16. Бондаренко В.М., Бондаренко С.В. Инженерные методы нелинейной теории железобетона. – М.: Стройиздат, 1982. 287 с.
17. Бондаренко В.М., Колчунов В.И. Расчетные модели силового сопротивления железобетона. – М.: АСВ, 2004. 472 с.
18. Бондаренко В.М., Боровских А.В., Марков С.В., Римшин В.И. Элементы теории реконструкции железобетона.- Н.Новгород: Нижегород. гос. архит.-строит. унив. 2002. 190 с.

REFERENCES

1. Bashirov Kh.Z., Kolchunov V.I., Fedorov V.S., Yakovenko I.A. *Reinforced concrete composite structures of buildings and structures*. Moscow: DIA, 2017. 248 p.
2. Fedorov V.S., Bashirov H.Z., Kolchunov V.I. Elements of the theory of calculation of reinforced concrete structures. *Academia. Architecture and construction*. 2014. No. 2. Pp. 226–228.
3. Kolchunov V.I., Panchenko A.A. *Calculation of composite thin-walled structures*. Moscow: ASV, 1999. 281 p.
4. Rogatnev Yu.F., Potapov Yu.B., Barabash D.E., Panfilov D.V., Javid M.M. Calculation of deflections of reinforced concrete bendable elements with a top layer of high-quality concrete. *Scientific Bulletin of MGSU*. 2016. No. 3. Pp. 26–36.
5. Merkulov S.I. *Fundamentals of the theory of reconstruction of the ironstone*. Kursk: Kursk State Technical University, 2009. 248 p.
6. Safina L.H. Ways of developing the theory of reconstructed reinforced concrete. *Industrial and civil construction*. 2023. No. 3. Pp. 48–54.

7. Korol E.A. *Three-layer enclosing reinforced concrete structures made of light concrete and features of their calculation*. Moscow: ASV, 2001. 256 p.
8. Bondarenko V.M., Merkulov S.I. On the development of the theory of reconstructed reinforced concrete. *Concrete and reinforced concrete*. 2005. No. 1. P. 25.
9. Bondarenko V.M., Merkulov S.I. Methodological foundations of the theory of structural safety of reconstructed reinforced concrete. *Construction mechanics of engineering structures and structures*. 2008. No. 3. Pp. 77–80.
10. Tamrazyan A.G., Yesayan S.G. *Mechanics of concrete creep*. Moscow: MGSU, 2012. 524 p.
11. Gaustov K.Z. *Nonlinear theory of concrete creep and calculation of reinforced concrete structures*. Moscow: Fizmatlit, 2006. 248 p.
12. Krylov S.B., Goncharov E.E. The use of rheological models in modeling concrete creep. *Industrial and civil construction*. 2013. No. 2. Pp. 32–33.
13. Yukhnov I.V., Yaziev B.M., Chepurmenko A.S., Litvinov S.V. Longitudinal bending of a flexible reinforced concrete strut under nonlinear creep. *Modern problems of science and education*. 2014. No. 5. P. 182.
14. Hidalgo P.A., Jordan R.M., Martinez M.P. An analytical model to predict the inelastic behavior of shear-wall, reinforced concrete structures. *Engineering Structures*. 2022. Vol. 24. No. 1. Pp. 85–98.
15. Boualam N., Muller A. Zum Einfluss des Zements auf das Kriech- und Schwindverhalten von Beton und Mortel. *Ibausil: 14. Internationale Baustofftagung, Weimar, 20-23. Sep.* Weimar: Bauhaus-Univ. Weimar, 2000. Bd. 1. Pp. 1/0485–1/0494.
16. Bondarenko V.M., Bondarenko S.V. *Engineering methods of nonlinear theory of reinforced concrete*. Moscow: Stroyizdat, 1982. 287 p.
17. Bondarenko V.M., Kolchunov V.I. *Computational models of the strength resistance of reinforced concrete*. Moscow: DIA, 2004. 472 p.
18. Bondarenko V.M., Borovskikh A.V., Markov S.V., Rimshin V.I. *Elements of the theory of reinforced concrete reconstruction*. Nizhny Novgorod: Nizhegorod State Architectural Institute, 2002. 190 p.

Информация об авторах

Меркулов Сергей Иванович

ФГБОУ ВО «Курский государственный университет», г. Курск, Россия,
чл.-корр. РААСН, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой,
E-mail: mersi.dom@yandex.ru

Information about authors

Merkulov Sergey Iv.

Kursk State University, Kursk, Russia,
Corresponding Member of the Russian Academy of Natural Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department,
E-mail: mersi.dom@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 02.04.2025
Одобрена после рецензирования 10.06.2025
Принята к публикации 11.06.2025

The article was submitted 02.04.2025
Approved after reviewing 10.06.2025
Accepted for publication 11.06.2025