

УДК 699.841

DOI [10.37153/2618-9283-2022-3-31-39](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2022-3-31-39)

Теоретические и экспериментальные исследования

Повышение сейсмостойкости зданий за счет спирального армирования изгибаемых железобетонных конструкций

Тонких Г.П.¹, Аверин И.А.²

¹ ФБГОУ ВО НИУ МГСУ, ФГБУ ВНИИ ГОЧС

Москва, Российская Федерация

² ФБГОУ ВО НИУ МГСУ

Москва, Российская Федерация

Аннотация: В статье приводятся результаты анализа проведенных ранее исследований напряженно-деформированного состояния изгибаемых железобетонных конструкций с армированием сжатой зоны спиралью с шагом витков 30, 50, 75, 100 и 150 мм. Кроме этого, приводятся данные по численным исследованиям изгибаемых балок со стержневой и спиральной арматурой сжатой зоны с использованием метода конечных элементов в программном комплексе Ansys Mechanical. Полученные результаты за счет работы бетона в спиральях в сложном напряженном состоянии позволяют существенно повысить сейсмостойкость зданий, а также несущую способность монолитных и сборных железобетонных конструкций при действии высокоинтенсивных динамических нагрузок.

Ключевые слова: спиральное армирование, сжатая зона, железобетонные балки, трёхосное сжатие, изгибаемые конструкции

Для цитирования: Тонких Г.П., Аверин И.А. Повышение сейсмостойкости зданий за счет спирального армирования изгибаемых железобетонных конструкций // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2022.№3. С. 31–39
DOI: [10.37153/2618-9283-2022-3-31-39](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2022-3-31-39)

Theoretical and experimental studies

Increase of seismic resistance of buildings due to spiral reinforcement of bent reinforced concrete structures

Tonkikh G.P.¹, Averin I.A.²

¹ Moscow State University of Civil Engineering, Civil Defense National Research Institute.
Moscow, Russian Federation

² Moscow State University of Civil Engineering
Moscow, Russian Federation

Abstract: This article presents the results of the analysis of previously conducted studies of the stress-strain state of bent reinforced concrete structures with reinforcement of the compressed zone with spirals with a pitch of turns of 30, 50, 75, 100 and 150 mm. In addition, data on numerical studies of bent beams with rod and spiral reinforcement of the compressed zone using

@ Г.П. Тонких, И.А. Аверин, 2022

the finite element method in the Ansys Mechanical software package are presented. The obtained results due to the work of concrete in spirals in a complex stressed state can significantly increase the seismic resistance of buildings, as well as the bearing capacity of monolithic and precast reinforced concrete structures under the action of high-intensity dynamic loads.

Keywords: spiral reinforcement, compressed zone, reinforced concrete beams, triaxial compression, bendable structures

For citation: Tonkikh G.P., Averin I.A. Increase of seismic resistance of buildings due to spiral reinforcement of bent reinforced concrete structures. [*Earthquake engineering. Constructions Safety.*] 2022, no.2, pp. 31–39

DOI: [10.37153/2618-9283-2022-3-31-39](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2022-3-31-39)

В практике современного строительства большинство конструкций работает в условиях сложных напряженных состояний, что обуславливает необходимость производить расчет таких конструкций с использованием адекватных моделей деформирования материала. Как известно, бетон является физически неупругим материалом, что требует для объективной оценки напряженно-деформируемого состояния железобетонных конструкций, армированных косвенной арматурой, при которой в полной мере реализуется работа бетона сжатой зоны в условиях сложного напряженного состояния, использования физических соотношений, отражающих упруго-пластический характер деформирования бетона. К настоящему времени разработано достаточно большое количество моделей деформирования, описывающих поведение бетона в условиях неодносного напряженного состояния [2,3].

Наиболее распространенная формула прочности бетона при трехосном сжатии:

$$\sigma_3 = -R_b + \beta_n \sigma_1,$$

где R_b – прочность бетона при одноосном сжатии;

β_n – константа материала (по предложению А.А. Гвоздева $\beta_n = 5$ [1])

σ_3, σ_1 – соответственно, максимальное и максимальное по модулю напряжения сжатия; среднее по модулю напряжения сжатия σ_2 в условие не входит. Однако условие чаще всего относят к случаю, когда $\sigma_2 = \sigma_1$.

Одним из видов косвенного армирования сжатой зоны изгибаемых железобетонных конструкций является спиральное армирование. На данный момент практически отсутствуют экспериментальные исследования по оценке напряженно-деформированного состояния изгибаемых конструкций со спиральным армированием сжатой зоны. В данной работе проанализированы две таких экспериментальных работы.

Первая из них проводилась в «26 Центральном научно-исследовательском институте» Министерства обороны Российской Федерации [5, 6]. В данном эксперименте проводились опыты с исследованием изгибаемых шарнирных балок со спиральным армированием сжатой зоны спиралью с шагом витков 30 мм и сравнение их с балками стандартного армирования (рис. 1).

Целью исследований [5, 6] было получение экспериментально-теоретических данных о несущей способности изгибаемых железобетонных конструкций при трехосном сжатии бетонного ядра внутри спиралей. Стоит отметить, что количество арматуры в сжатой зоне балок со стержневой арматурой составило 14,94 кг, а со спиральным армированием с шагом витков спирали 30 мм – 7,85 кг, а с шагом 50 мм – 4.76 кг.

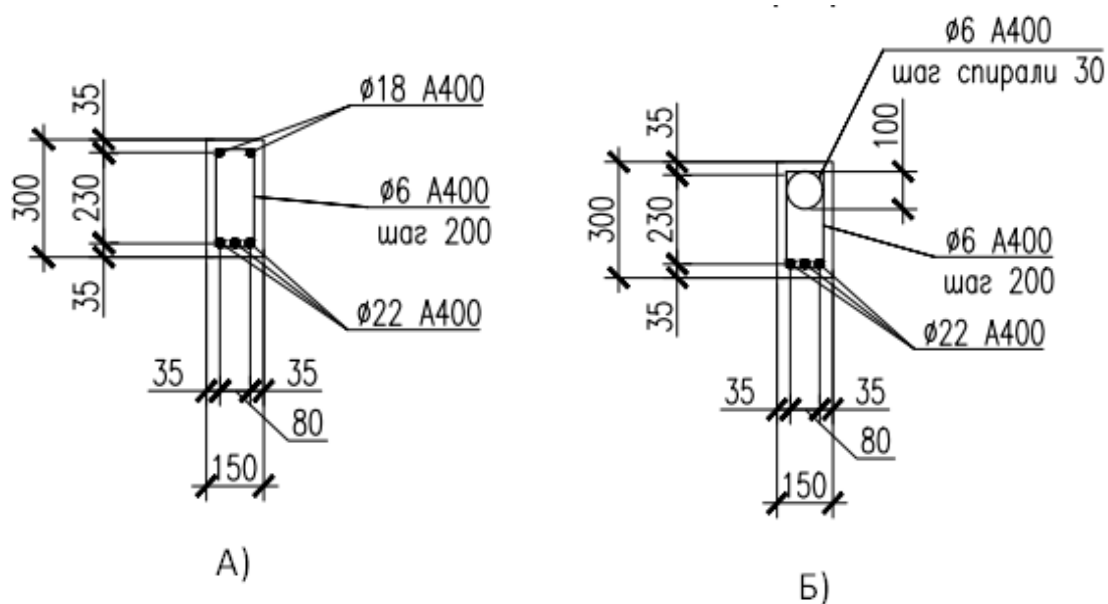


Рисунок 1 – Схема армирования испытываемых образцов.
А) – стержневое армирование Б) – спиральное армирование

Figure 1 – Scheme of reinforcement of test samples.
A) – bar reinforcement B) – spiral reinforcement

Нагружение балок в эксперименте происходило при помощи гидравлического домкрата «Станкоимпорт SD 0881» с максимальным усилием 50 тонн. Нагрузка передавалась через траверсу в третях пролета балки. Для измерения деформаций на концах и в середине пролета были установлены прогибомеры Аистова.

В ходе проведенного эксперимента было установлено, что несущая способность спирально-армированных балок в среднем на 25 % выше, чем со стержневой арматурой. Также в ходе данного эксперимента определена удельная энергоемкость балок со стержневым и спиральным армированием, которая составила соответственно 111,8 (кгс·м)/м и 1256,5 (кгс·м)/м. Таким образом, балка со спиральным армированием обладает энергоемкостью в 11,3 раза больше, чем со стандартным армированием. Кроме этого, из-за ограниченного хода домкрата, не удалось довести балки со спиральным армированием до полного обрушения. После снятия нагрузки балка возвращалась практически в первоначальное состояние, что повторялось не менее 3-х раз.

Во второй работе, выполненной в австралийском университете Вуллонгонга [7], также исследовались изгибаемые балки со спиральным армированием сжатой зоны. Целью исследования [7] было изучение влияния шага спирали на пластические свойства балок. В ходе проведения эксперимента использовался шаг витков спирали 30, 50, 75, 100 и 150 мм. Стоит отметить, что спираль в сжатой зоне устанавливалась только в середине пролета балок. На рис.2 видно, что при нагрузке бетон внутри спирали не разрушается, при этом прогиб балки значительно превышал прогиб эталонных балок со стержневым армированием.



Рисунок 2 – Общий вид образца со спиральным армированием после нагрузки

Figure 2 – General view of the sample with spiral reinforcement after loading

В ходе эксперимента было установлено, что балки с шагом спирали 30 и 50 мм разрушались пластично под нагрузкой, в то время как балки с шагом 75,100 и 150 мм разрушались практически так же, как и балки со стержневой арматурой. На графике (рис.3) показаны прогибы балок от нагрузки. Из графиков видно, что прогибы балок с шагом витков спирали 30 мм и 50 мм более чем в 7 раз превышают прогибы балок с шагом 150 мм и с традиционным армированием стержневой арматурой.

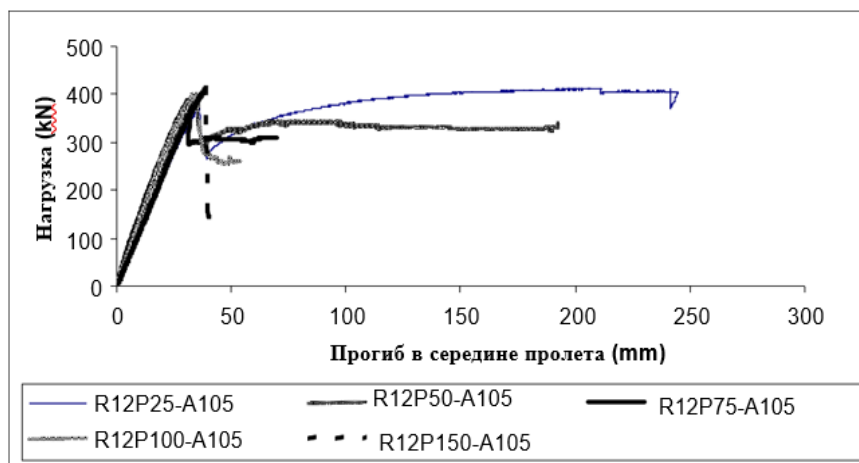


Рисунок 3 – Зависимость прогибов от нагрузки в ходе эксперимента [7]

Figure 3 – The dependence of deflections on the load during the experiment [7]

В рамках настоящей работы выполнено численное исследование изгибаемых балок со стержневой и спиральной арматурой сжатой зоны. Расчетный анализ выполнен методом конечных элементов в программном комплексе Ansys Mechanical. Моделирование балок производилось в программе для функционального трехмерного твердотельного моделирования – ANSYS Discovery Space Claim. Для бетона использовались объемные конечные элементы, арматура задавалась в виде стержневых элементов (рис. 4).

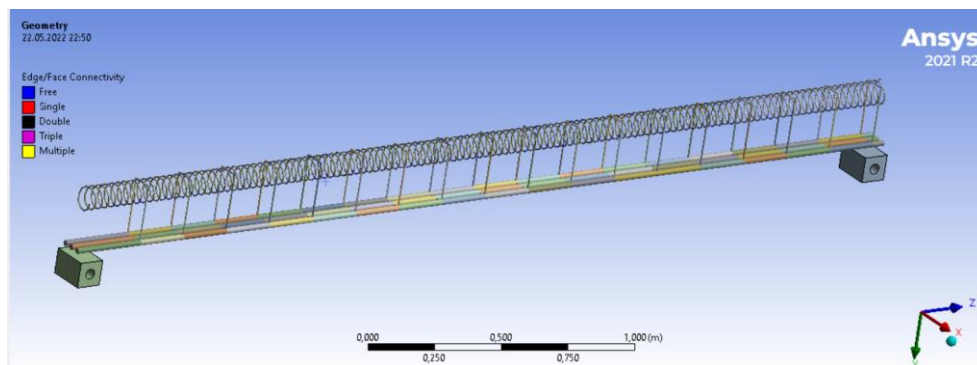


Рисунок 4 – Модель спирально-армированной балки

Figure 4 – Spiral-reinforced beam model

Поведение бетона в условиях трёхосного напряженно-деформированного состояния, которое формируется внутри спирали, зависит от главных напряжений и режима нагружения. Это связано с силовой ортотропией деформирования бетона из-за процесса направленного уплотнения и разуплотнения его структуры [3].

Численные исследования выполнены на основе физического эксперимента [5], но с расширением вариантов спирального армирования (с использованием методики [7]) с шагом витков спирали 30, 50, 75, 100 мм.

На рис. 5 представлены результаты расчетов прогибов балок от нагрузки. На графике видно, что балки БС-30 и БС-50 показывают наилучший результат по критерию деформативности, при котором прогибы практически в 4 раза превышают прогибы балок со стержневой арматурой и балок с шагом витков 75 и 100 мм. Кроме этого, несущая способность балок БС-30 и БС-50 на 25–30 % превышает несущую способность балок со стержневой арматурой и балок с шагом витков 75 и 100 мм, что полностью подтверждает результаты физических экспериментов.

Результаты численных исследований показывают, что за счет работы в условиях сложного напряженного состояния значительно повысились пластичность и деформативность образцов. У балок БС-75 и БС-100 характер разрушения схож с образцом БС-1, то есть происходит упруго-пластическое разрушение, что также совпадает с результатами экспериментальных исследований.

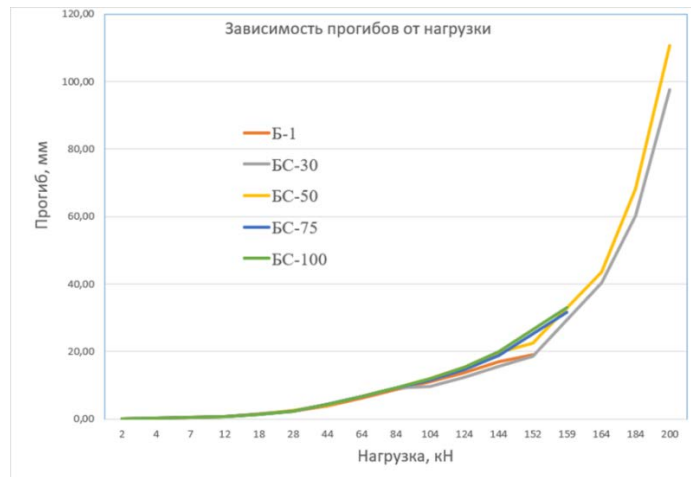


Рисунок 5 – Зависимость прогибов от нагрузки, полученных в Ansys Mechanical

Figure 5 – The dependence of deflections on the load obtained by Ansys Mechanical

В численных исследованиях зафиксировано сложное напряженное состояние бетона, ограниченного спиралью, характеризуемое наличием трех главных напряжений σ_1 , σ_2 , σ_3 . На рис. 6, 7, 8 показаны главные напряжения при нагрузках, близких к разрушающим.

Из полученных данных видно, что все три главных напряжения присутствуют в образцах БС-30 и БС-50 внутри спирали, увеличивая прочность и деформативность бетона. При этом существует явная корреляция напряжений в зависимости от шага спиралей, что согласуется с экспериментом [5] и [7].

По существу, установлено формирование напряженного состояния, определяемого стесненными условиями деформирования, которые обеспечиваются работой спирального армирования.

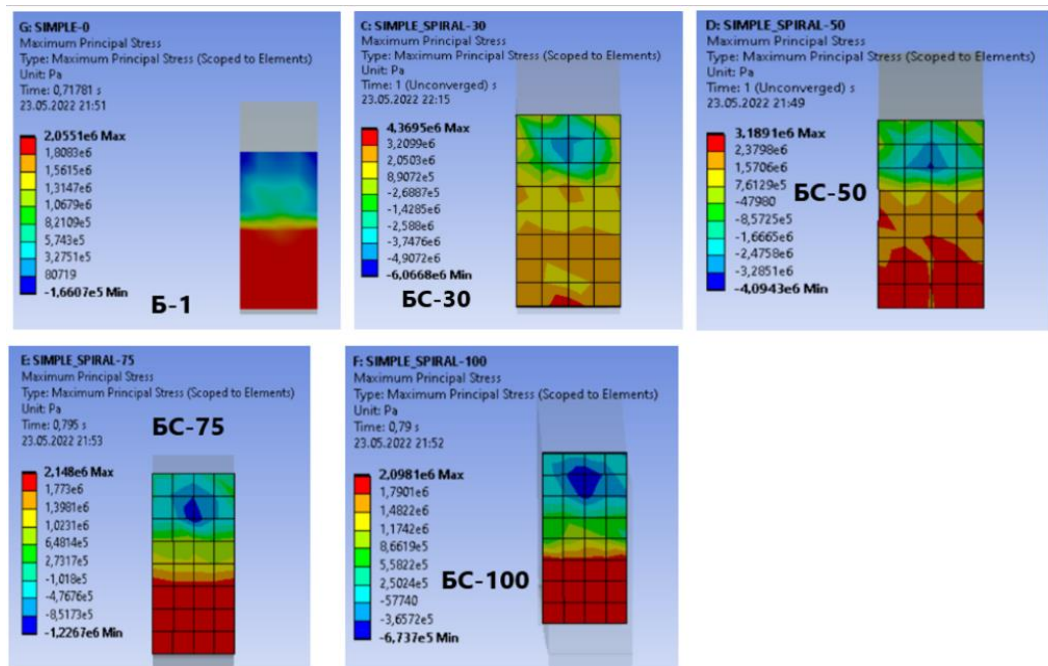


Рисунок 6 – Главное нормальное напряжение σ_1

Figure 6 – The main normal stress σ_1

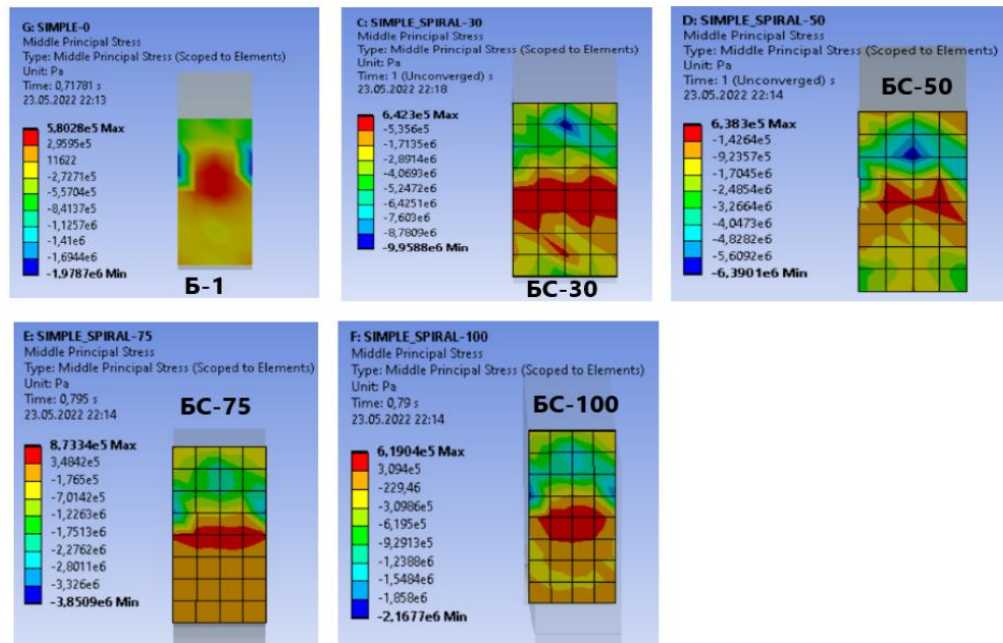


Рисунок 7 – Главное нормальное напряжение σ_2

Figure 7 – The main normal stress σ_2

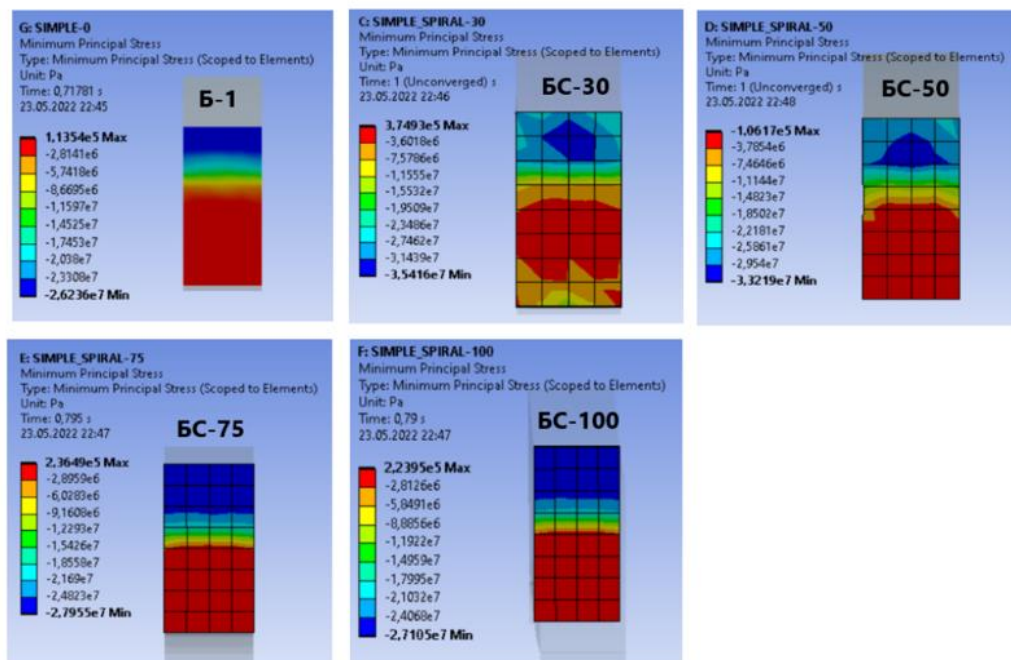


Рисунок 8 – Главное нормальное напряжение σ_3

Figure 8 – The main normal stress σ_3

Численные исследования демонстрируют существенное увеличение предельных разрушающих нагрузок, что соответствует результатам физических экспериментов. Некоторые различия наблюдаются в том, что нагрузка для элементов со спиральным

армированием возрастает линейно, отсутствуют скачки по нагрузкам, что наблюдается при отслоении бетона в экспериментальных исследованиях. Это происходит из-за того, что в модели не учтен процесс формирования и раскрытия трещин, и строить предположение об их наличии можно лишь по напряжениям.

Необходимо отметить, что разработанная модель не идеально представляет физический эксперимент, но позволяет получить концептуальное понимание о работе сжатого бетона, армируемого спиралью. В дальнейших исследованиях необходима доработка и усовершенствование компьютерного моделирования.

Выводы

1. Установка спиралей в сжатой зоне изгибаемых железобетонных элементов – эффективный метод повышения несущей способности, пластичности и энергоемкости железобетонных конструкций. При этом расход арматуры в сжатой зоне уменьшается в 2–3 раза в зависимости от шага витков спиралей.

2. По результатам исследований несущая способность железобетонных конструкций со спирально армированной сжатой зоной на 25% выше, чем со стержневой арматурой.

3. Наиболее эффективный шаг спиралей – 30 и 50 мм. С увеличением шага спирали снижается эффект от спирального армирования в виде повышения прочности бетона за счет сложного напряженного состояния внутри спирали. Балки с шагом спиралей 30 и 50 мм выдерживают нагрузку 200 кН, при разрушении других образцов (с шагом 75 – 100 мм) – 160 кН.

4. Энергоемкость балок с шагом витков спирали 30 мм и 50 мм составляет – 1256,5 (кгс·м)/м, что более чем в 11 раз превышает энергоемкость традиционно армированных балок и балок с шагом витков спиралей 75 мм и 100 мм.

5. Косвенное спиральное армирование сжатой зоны меняет характер разрушения балок, значительно увеличивая пластическую стадию деформирования. При этом на порядок возрастают предельные прогибы с сохранением высокой остаточной несущей способности.

6. Проведенный численный расчет изгибаемых балок со спиральным армированием сжатой зоны, проведенный в программном комплексе Ansys Mechanical, показал достаточно хорошую сходимость с результатами экспериментальных исследований. В дальнейших исследованиях необходима доработка и усовершенствование методики компьютерного моделирования.

Список литературы

1. Гвоздев А.А. Прочность бетона при двухосном напряженном состоянии [Текст] / А.А. Гвоздев, П.М. Бич // Бетон и железобетон. 1974. №7. С. 10–11.

2. Гениев Г.А. Теория пластичности бетона и железобетона [Текст] / Г.А. Гениев, В.Н. Киссюк, Г.А. Тюпин. М.: Стройиздат, 1974. 316 с.

3. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона [Текст] / Н.И. Карпенко. М.: Стройиздат, 1996. 416 с.

4. Корсун В.И., Недорезов А.Н. Вариант описания закономерностей упругопластического и псевдопластического деформирования бетона в условиях объемного напряженного состояния // Современное промышленное и гражданское строительство. 2014. Том 10. № 2. С.147–168.

5. Тонких Г.П., Алексашкин А.Н., Курбацкий Е.Н. Экспериментальные исследования железобетонных конструкций со спиральным армированием. Научно-техническая конференция «Сейсмостойкость крупных транспортных сооружений в сложных инженерно-геологических условиях». М.: АО ЦНИИС. 1999. С.173–183.

6. Тонких Г.П., Алексашкин А.Н. Эффективность спирально-армированного железобетона [Текст] / Некоторые научно-технические проблемы военно-строительной науки. Научно-технический сборник к 50-летию 26 ЦНИИ МО РФ. М.: 1996. С. 584–593.
7. Hadi M., Elbasha N. Displacement ductility of helically confined HSC beams / M. Hadi, N. Elbasha. The Open Construction and Building Technology Journal, 2008, no. 2, pp. 270–279.

References

1. Gvozdev A.A. Prochnost' betona pri dvukhosnom napryazhennom sostoyanii [Tekst] / A.A. Gvozdev, P.M. Bich. Beton i zhelezobeton. 1974. №7. Pp. 10–11. [In Russian]
2. Geniev G.A. Teoriya plastichnosti betona i zhelezobetona [Tekst] /G.A. Geniev, V.N. Kissyuk, G.A. Tyupin. M.: Strojizdat, 1974. 316 p. [In Russian]
3. Karpenko N.I. Obshchie modeli mekhaniki zhelezobetona [Tekst] / N.I. Karpenko. M.: Strojizdat, 1996. 416 p. [In Russian]
4. Korsun V.I., Nedorezov A.N. Variant opisaniya zakonomernostej uprugoplasticheskogo i psevdoplasticheskogo deformirovaniya betona v usloviyakh ob"emnogo napryazhennogo sostoyaniya. Sovremennoe promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2014. Tom 10. № 2. pp.147–168. [In Russian]
5. Tonkikh G.P., Aleksashkin A.N., Kurbackij E.N. Ehksperimental'nye issledovaniya zhelezobetonnykh konstrukcij so spiral'nym armirovaniem. Nauchno-tekhnicheskaya konferenciya «Sejmsostojkost' krupnykh transportnykh sooruzhenij v slozhnykh inzhenerno-geologicheskikh usloviyakh». M.: AO CNIIS. 1999. Pp.173–183. [In Russian]
6. Tonkikh G.P., Aleksashkin A.N. Ehffektivnost' spiral'no-armirovannogo zhelezobetona [Tekst]. Nekotorye nauchno-tekhnicheskije problemy voenno-stroitel'noj nauki. Nauchno-tekhnicheskij sbornik k 50-letiyu 26 CNII MO RF. M.: 1996. Pp. 584–593. [In Russian]
7. Hadi M., Elbasha N. Displacement ductility of helically confined HSC beams / M. Hadi, N. Elbasha. The Open Construction and Building Technology Journal, 2008, no. 2, pp. 270–279.

Информация об авторах /Information about authors

Тонких Г.П., доктор технических наук, профессор кафедры ЖБК ФБГОУ ВО НИУ МГСУ, г.н.с. ФГБУ ВНИИ ГОЧС. Москва, Российская Федерация
E-mail: 5059144@mail.ru

Tonkikh G.P., Doctor of Sciences (Engineering), Professor at Moscow State University of Civil Engineering, chief researcher at Civil Defense National Research Institute. Moscow, Russian Federation
E-mail: 5059144@mail.ru

Аверин И.А., магистр кафедры ЖБК ФБГОУ ВО НИУ МГСУ. Москва, Российская Федерация

E-mail: averinia@inbox.ru

Averin I.A., Master of Moscow State University of Civil Engineering. Moscow, Russian Federation

E-mail: averinia@inbox.ru