

В.И. ЧЕРНИК¹, С.Э. САМАРИНА²¹Ярославский государственный технический университет (ФГБОУ ВО "ЯГТУ"), г. Ярославль, Россия²Московский государственный строительный университет (ФГБОУ ВО «МГСУ»), г. Москва, Россия

ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ СЖАТОГО БЕТОННОГО ЭЛЕМЕНТА, УСИЛЕННОГО УГЛЕКОМПОЗИТНОЙ ОБОЙМОЙ

Аннотация. Проведен расчет центрально сжатого бетонного образца, усиленного обоймой на основе ленты из углеродного волокна, в программно-аналитическом комплексе *Ansys Mechanical* в модуле *Static Structural*. Обоснованы модели материалов входящих в систему «бетон-обойма» и определяющие их параметры. Получены графики зависимости напряжение-деформация для контрольного и усиленного образца, с применением разных диаграмм деформирования бетона, которые регламентированы действующими российскими нормативными документами. Выявлено, что при описании работы бетона, ограниченного углепластиковой обоймой, соответствие экспериментальным данным достигается при использовании диаграммы деформирования бетона с площадкой текучести. Дана оценка существующего нормативного подхода к определению несущей способности элементов, усиленных обоймами из композитных материалов. Высказаны предложения по назначению иных критериев предельного состояния, которые учитывают реальные деформации усиленного элемента.

Ключевые слова: усиление железобетонных конструкций; *Ansys*; диаграмма деформирования; ограниченный бетон; композитные материалы; углепластиковая обойма; трехосное сжатие.

V.I. CHERNIK¹, S.E. SAMARINA²¹Yaroslavl State Technical University (YSTU), Yaroslavl, Russia²Moscow State University of Civil Engineering (MGSU), Moscow, Russia

NUMERICAL MODEL OF A COMPRESSED CONCRETE ELEMENT STRENGTHENED BY FRP JACKETS

Abstracts. A calculation was made of a centrally compressed concrete specimen reinforced with a tape FRP jackets in the analysis complex *Ansys Mechanical* software in the *Static Structural* module. Substantiated models of materials included in the system of "concrete- FRP jackets" and the parameters that determine them. Stress-strain relation for the control and reinforced samples were obtained using different concrete deformation diagrams, which are regulated by the current Russian regulatory documents. It was revealed that when describing the work of confined concrete by a carbon fiber FRP jackets, the correspondence to experimental data is achieved using a diagram of concrete deformation with a yield point. An assessment of the existing regulatory approach to determining the bearing capacity of elements reinforced with FRP jackets. Suggestions were made for the assignment of other criteria for the limiting state that take into account real deformations.

Keywords: strengthening of reinforced concrete structures; *Ansys*; stress-strain relation; confined concrete; composite materials; FRP jackets; triaxial compression.

Введение

Как было отмечено в работе [1], темпы внедрения композитных материалов при усилении железобетонных конструкций растут с каждым годом, а область их применения постоянно расширяется. В настоящее время устройство внешнего армирования с применением углепластика можно назвать наиболее востребованным способом усиления, который помогает сохранить полезный объем помещений, эстетический облик, не существенно увеличивает изгибную жесткость конструкции, что актуально в сейсмоопасных районах и т.д.

Постоянно возникает необходимость в совершенствовании методики расчета железобетонных конструкций усиленных композитными материалами. Сюда можно отнести: учет начального напряженного состояния, истории нагружения, учет нелинейных свойств бетона, трещинообразования, податливости клеевого соединения.

При расчетном обосновании важно учитывать причины вызывающие необходимость усиления конструкции. Например, коррозионные повреждения под воздействием агрессивной среды качественно меняют специфику работы элемента [2] и соответственно подход к проектированию его усиления.

Возможность возникновения аварийных ситуаций во время эксплуатации зданий и сооружений приводит к необходимости проведения расчетов на особые сочетания нагрузок. Так, например, возникающие при пожарах воздействия высокой температуры в комбинации с динамическими нагрузками требуют учета при проектировании усиления возможное изменение механических характеристик бетона и арматуры [3- 7].

При проведении инженерных расчетов важно знать не только предельные усилия, которые может воспринять сечение, но и правильно описывать характер деформирования элемента под нагрузкой.

В полной мере все это реализуемо только в численной постановке задачи с применением современных программных комплексов.

В работе [8] отмечено, что имеется достаточно публикаций, в которых проводится численный анализ конструкций, усиленных композитными материалами. Стоит отметить, что большинство этих работ посвящены оценке несущей способности изгибаемых элементов [9].

Вопросу моделирования работы сжатых элементов, усиленных обоймами, в отечественной литературе уделено значительно меньше внимания. Имеются, например, результаты численного моделирования сжатой бетонной призмы усиленной металлической обоймой [10]. Получено увеличение несущей способности призмы за счет всестороннего обжатия. Однако не приведено описание модели, характеризующей деформирование бетона, что затрудняет оценку верности полученных в элементах обоймы напряжений.

В исследовании [11] приведены результаты численного моделирования работы сжатой железобетонной стойки, усиленной обоймой из композитных материалов. Данные достаточно хорошо совпадают с экспериментальными. Однако не приведена оценка влияния косвенного армирования в виде хомутов из арматурных стержней, которые должны вносить достаточно большой вклад в напряженно-деформированное состояние элемента. Иными словами, сложно оценить какой вклад в ограничение поперечных деформаций вносит композитная обойма, а какой хомуты.

Аналогичные исследования проведены в [12]. Отличительной особенностью проведенного моделирования является учет слоистой структуры композитной обоймы. Поведение бетона описывалось с использованием модели Друкера-Прагера. Дано сопоставление с результатами натурных экспериментов.

Целью настоящей работы является численный анализ работы центрально сжатого образца, усиленного обоймой из композитных материалов, в ПК Ansys Mechanical с применением различных диаграмм деформирования бетона, которые регламентированы СП 63.13330.2012. Приводится обоснование применяемых в расчете моделей материала.

Стоит отметить, что современная методика расчета сжатых элементов, усиленных обоймами из углекомпозита, связывает момент наступления предельного состояния с достижением напряжений в композитной обойме величины равной их расчетному сопротивлению, т.е. с разрывом обоймы. В данном исследовании на основании результатов численного расчета приводятся соображения по назначению иных критериев предельного состояния, учитывающих реальные деформации, возникающие в системе «бетон-обойма».

Модели и методы

Известно, что поведение бетона в условиях многоосного напряженно-деформированного состояния (НДС) существенно зависит от соотношения главных напряжений, а так же режима нагружения. Связанно это с силовой ортотропией деформирования бетона, проявляющейся в результате процесса направленного уплотнения и разуплотнения его структуры [13].

Как отмечается в монографии [14], бетону присущи два основных характера разрушения. А именно, хрупкое с разделением на отдельные части и, так называемое, псевдопластическое разрушение, являющееся следствием постепенного накопления повреждений в структуре бетона. Причем, первое реализуется при различных комбинациях не одноосного растяжения и растяжения-сжатия, а второе – в случае трехосного сжатия.

В расчетной модели учет псевдопластического разрушения бетона может быть выполнен либо путем выключения из работы части материала при достижении некоторого критерия прочности (пластичности), либо заданием площадки текучести или нисходящей ветви диаграммы деформирования, которая учитывала бы его разупрочнение.

Для исследования работы бетонного образца, усиленного облойкой из углекомполита, в состоянии трехосного сжатия используется реализованная в ПК Ansys Mechanical псевдопластическая модель Друкера-Прагера, которая модифицирована под специфические свойства бетона (Drucker-Prager Concrete) [15]. Классическая модель Друкера и Прагера [16] разработана для описания пластической работы глинистых грунтов и использует феноменологический подход для описания процесса направленного уплотнения и разуплотнения структуры.

Поверхность текучести при этом однозначно определяется заданием констант материала соответствующих бетону данного класса. А именно, предел прочности бетона при одноосном сжатии R_c , предел прочности при одноосном растяжении R_t и предел прочности при двухосном сжатии R_b . В данной работе первые две характеристики условно приняты равными соответствующим значениям расчетных сопротивлений бетона для предельных состояний второй группы, т.е. $R_c = R_{b,ser}$ и $R_t = R_{bt,ser}$.

Задача по назначению предела прочности при двухосном сжатии несколько усложнена в виду неоднозначности рекомендаций представленных в нормативной и научно-технической литературе [17]. Прочность бетона при двухосном сжатии представляется зависимостью

$$R_{b2} = kR_c \quad (1)$$

где $k = 1...1,4$ – коэффициент увеличения прочности бетона при двухосном сжатии;

В одной из основополагающих работ [18] на основании данных испытаний бетонных образцов получена поверхность прочности, которая в области двухосного сжатия дает условие

$$R_{b2} = \frac{1 + 3,65\alpha}{(1 + \alpha)^2} R_c \quad (2)$$

где $\alpha = \frac{\sigma_2}{\sigma_3}$; $\sigma_1 = 0$; $\sigma_3 < \sigma_2 < 0$ – главные напряжения.

При $\sigma_3 = \sigma_2$ получим

$$R_{b2} = 1,1625R_c \quad (3)$$

В работе [19] представлено аналогичное условие

$$R_{b2} = 1,2R_c \quad (4)$$

Там же дается граница его применимости

$$|\sigma_m| \leq \sqrt{3R_c} \quad (5)$$

где $\sigma_m = \frac{(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{3}$ – среднее напряжение.

Помимо этого, в нормах [20] при отсутствии экспериментальных данных прочность бетона при двухосном сжатии рекомендуется определять как:

$$R_{b2} = \left(1,2 - \frac{R_c}{1000}\right) R_c \quad (6)$$

Для тяжелого бетона класса В25 ($R_c = R_{b,ser} = 18,5 \text{ МПа}$) получим:

$$R_{b2} = 1,1815 R_c \quad (7)$$

Так же, стоит отметить результаты испытаний, приведенные в работе [17], которые не дают увеличения прочности бетона при равномерном двухосном сжатии по сравнению с одноосным, т.е. $R_{b2} = R_c$.

Многообразие представленных зависимостей затрудняет назначение величины прочности бетона при двухосном сжатии. Для проведения инженерных расчетов без особого ущерба для точности можно воспользоваться условием (4), которое и принято в настоящей работе.

Помимо приведенных выше характеристик, так же задаются параметры, описывающие функции упрочнения и разупрочнения материала, которые определяют псевдопластические свойства бетона. В случае если данные функции не заданы материал является идеально пластичным. Поскольку, исследуемый образец работает в области трехосного сжатия, ограничимся описанием функций упрочнения/разупрочнения только при сжатии. В общем виде они даются зависимостью:

$$\Omega_c = f(\kappa) \quad (8)$$

где $\Omega_c = \frac{\sigma_c}{R_c}$ – уровень приращения сжимающих напряжений; κ – переменная упрочнения.

Переменная упрочнения численно равна величине относительных пластических деформаций

$$\kappa = \varepsilon_b^{pl} = \varepsilon_b^{tot} - \varepsilon_b^{el} \quad (9)$$

где ε_b^{tot} , ε_b^{el} – соответственно полные и упругие относительные деформации бетона.

ПК Ansys Mechanical предоставляет разные формы задания функций упрочнения/разупрочнения, а именно линейная, экспоненциальная, энергетическая и функции для армированного бетона, при так называемом «размазанном армировании». В данной работе принята экспоненциальная форма задания функций упрочнения/разупрочнения (см. рисунок 1а), как наиболее сопоставимая с криволинейной диаграммой деформирования бетона по СП 63.13330.2012.

При этом функции упрочнения/разупрочнения записываются в виде системы:

$$\begin{cases} \Omega_c = \Omega_{ci} + (1 - \Omega_{ci}) \sqrt{2 \frac{\kappa}{\kappa_{cm}} - \frac{\kappa^2}{\kappa_{cm}^2}}, & \kappa \leq \kappa_{cm} \\ \Omega_c = 1 - (1 - \Omega_{cu}) \left(\frac{\kappa - \kappa_{cm}}{\kappa_{cu} - \kappa_{cm}} \right)^2, & \kappa_{cm} < \kappa < \kappa_{cu} : \\ \Omega_c = \Omega_{cr} + (\Omega_{cu} - \Omega_{cr}) \exp \left(2 \frac{\Omega_{cu} - 1}{\kappa_{cu} - \kappa_{cm}} \cdot \frac{\kappa - \kappa_{cu}}{\Omega_{cu} - \Omega_{cr}} \right), & \kappa \geq \kappa_{cu} \end{cases} \quad (10)$$

где Ω_{ci} – уровень сжимающих напряжений, отвечающих пределу упругости бетона;

Ω_{cu} – уровень сжимающих напряжений при переходе от степенного закона функции разупрочнения к экспоненциальному;

Ω_{cr} – уровень остаточных сжимающих напряжений;

κ_{cm} – предельные пластические деформации при одноосном сжатии;

κ_{cu} – пластические деформации при переходе от степенного закона функции разупрочнения к экспоненциальному.

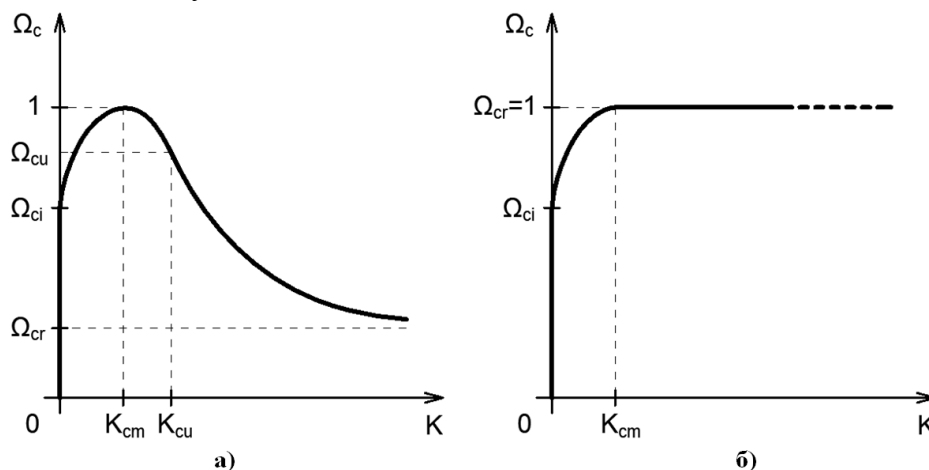


Рисунок 1 – Графики функций упрочнения/разупрочнения при сжатии: а) при криволинейной диаграмме деформирования, б) при двух- или трехлинейной диаграмме деформирования

В свою очередь, криволинейная диаграмма деформирования для тяжелого бетона класса В25 по СП 63.13330.2012 задается в виде:

$$\varepsilon_b = \frac{\sigma_b}{E_b \nu_b} \quad (11)$$

где $E_b = 30000 \text{ МПа}$ – начальный модуль упругости бетона;

ν_b – коэффициент изменения секущего модуля;

Для восходящей ветви:

$$\nu_b = 0,3083 + 0,6917 \sqrt{1 - 1,2293\eta + 0,2293\eta^2} \quad (12)$$

Для нисходящей ветви:

$$\nu_b = 0,3083 - 0,3237 \sqrt{1 - 0,4632\eta - 0,5368\eta^2} \quad (13)$$

где $\eta = \frac{\sigma_b}{R_{b,ser}}$ – уровень приращения сжимающих напряжений.

Каждому параметру, который входит в систему (10), поставим в соответствие значение криволинейной диаграммы деформирования бетона.

Параметр упрочнения, определяющий предельные пластические деформации при одноосном сжатии κ_{cm} , получим из условия (9)

$$\kappa_{cm} = \bar{\varepsilon}_b - \bar{\varepsilon}_{b,el} \quad (14)$$

где $\bar{\varepsilon}_b = 0,002$ – предельные полные деформации бетона в вершине диаграммы при $\bar{\sigma}_b = R_{b,ser} = 18,5 \text{ МПа}$;

$\bar{\varepsilon}_{b,el}$ – предельные упругие деформации бетона, определяемые по формуле.

$$\bar{\varepsilon}_{b,el} = \frac{\bar{\sigma}_b}{E_b} = \frac{18,5}{30000} = 6,167 \cdot 10^{-4} \quad (15)$$

Из (14) получим

$$\kappa_{cm} = 20 \cdot 10^{-4} - 6,167 \cdot 10^{-4} = 0,00138 \quad (16)$$

Параметру, определяющему переход от степенного закона функции разупрочнения к экспоненциальному κ_{cu} , будет соответствовать относительная пластическая деформация в точке перегиба нисходящей ветви диаграммы деформирования. Перегиб функции находится в точке, в которой ее вторая производная существует и равна нулю, т.е.

$$\frac{d^2 \varepsilon_b(\sigma_b)}{d\sigma_b^2} = 0 \quad (17)$$

Известно, что

$$d\varepsilon_b = \frac{1}{E_b \nu_b^k} d\sigma_b \quad (18)$$

где ν_b^k – коэффициент изменения касательного модуля, связанный с коэффициентом изменения секущего модуля ν_b соотношением (для нисходящей ветви).

$$\frac{1}{\nu_b^k} = \frac{1}{\nu_b} - \frac{0,3237\sigma_b(0,4632 + 1,0736\eta)}{-37\nu_b^2 \sqrt{1 - 0,4632\eta - 0,5368\eta^2}} \quad (19)$$

Тогда условие (21) примет вид

$$\frac{d^2 \varepsilon_b}{d\sigma_b^2} = \frac{d}{d\sigma_b} \left(\frac{d\varepsilon_b}{d\sigma_b} \right) = \frac{1}{E_b} \cdot \frac{d}{d\sigma_b} \left(\frac{1}{\nu_b^k(\sigma_b)} \right) = 0 \quad (20)$$

или

$$\frac{d}{d\sigma_b} \left(\frac{1}{\nu_b^k(\sigma_b)} \right) = \frac{d}{d\sigma_b} \left(\frac{1}{\nu_b} - \frac{0,3237\sigma_b(0,4632 + 1,0736\eta)}{-37\nu_b^2 \sqrt{1 - 0,4632\eta - 0,5368\eta^2}} \right) = 0 \quad (21)$$

Находя производную и приводя подобные получаем уравнение шестого порядка относительно η

$$-0,3687\eta^6 - 0,4332\eta^5 + 0,2798\eta^4 - 0,1307\eta^3 + 0,1445\eta^2 + 0,1376\eta + 0,0220 = 0 \quad (22)$$

Отыскивая действительный корень на отрезке $[0; 1]$ находим

$$\eta = \Omega_{cu} = 0,832 \quad (23)$$

Напряжения в точке перегиба

$$\sigma_b^{cu} = \eta \bar{\sigma}_b = 0,832 \cdot 18,5 = 15,392 \text{ МПа} \quad (24)$$

Упругие деформации бетона при работе на нисходящей ветви уменьшаются за счет релаксации напряжений. Поэтому относительные упругие деформации бетона в точке перегиба нисходящей ветви диаграммы деформирования найдем как

$$\varepsilon_{b,el}^{cu} = \frac{\sigma_{b,el}^{cu}}{E_b} = \frac{15,392}{30000} = 5,131 \cdot 10^{-4} \quad (25)$$

Тогда, параметр κ_{cu} с учетом формулы (9) составит

$$\kappa_{cu} = \varepsilon_b^{cu} - \varepsilon_{b,el}^{cu} = 34,5 \cdot 10^{-4} - 5,131 \cdot 10^{-4} = 0,00294 \quad (26)$$

где ε_b^{cu} – полные относительные деформации в точке перегиба по формуле (11).

Уровень сжимающих напряжений, отвечающих пределу упругости бетона, принимается равным нулю, т.е.

$$\Omega_{ci} = \eta_{ci} = \frac{\sigma_{b,el}}{R_c} = 0 \quad (27)$$

Таким образом, считается, что бетон работает в упруго-пластической стадии уже на начальных этапах нагружения.

Уровень остаточных сжимающих напряжений Ω_{cr} , при переходе бетона в идеально пластическое состояние условно принят равным 0,25.

Помимо криволинейной диаграммы деформирования бетона СП 63.13330.2012 допускает применение двух- или трехлинейной диаграммы. Характерной их особенностью является наличие площадки текучести после достижения напряжений в бетоне его расчетного сопротивления. В этом случае, величину уровня остаточных сжимающих напряжений Ω_{cr} при достижении предельных относительных деформаций для функции разупрочнения следовало бы принимать равной единице (рисунок 1б).

Параметры модели Друкера-Прагера, принятые при проведении численного расчета, соответствуют тяжелому бетону класса В25 и приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры, описывающие модель Друкера-Прагера (бетон В25)

Параметр модели Друкера-Прагера	Обозначение	Величина
Предел прочности при одноосном сжатии	R_c	18,5 МПа
Предел прочности при одноосном растяжении	R_t	1,55 МПа
Предел прочности при двухосном сжатии	R_b	22,2 МПа
Предельные пластические деформации при одноосном сжатии	κ_{cm}	0,00138
Пластические деформации при переходе от степенного закона функции разупрочнения к экспоненциальному	κ_{cu}	0,00294
Уровень сжимающих напряжений при переходе от степенного закона функции разупрочнения к экспоненциальному	Ω_{cu}	0,832
Уровень сжимающих напряжений, отвечающих пределу упругости бетона	Ω_{ci}	0
Уровень остаточных сжимающих напряжений при использовании криволинейной диаграммы деформирования бетона	$\Omega_{cr,1}$	0,25
Уровень остаточных сжимающих напряжений при использовании диаграммы деформирования бетона с площадкой текучести	$\Omega_{cr,2}$	1

При описании поведения обоймы из однонаправленного углекомполита принята модель линейно-упругого ортотропного материала. Характеристики материала вдоль направления волокон соответствуют аналогичным для системы внешнего армирования на основе ленты из углеродного волокна CarbonWrap® Tape-230/300: модуль упругости $E_f = 245 ГПа$, расчетное сопротивление $R_f = 2700 МПа$, толщина волокна $t_f = 0,128 мм$. Толщина обоймы соответствует трем слоям ленты и равна 0,384 мм.

Как отмечено в работе [21], основной проблемой при описании работы композитных материалов является недостаточность исходных данных об упругих свойствах материала в направлениях перпендикулярных направлению распространения волокон. Там же предлагается прием вычисления этих характеристик на основе модели трансверсально изотропного материала. В направлении поперек волокон жесткость обоймы, условно, считается близкой к нулевой.

Контакт между обоймой и бетоном принят неразрывным (Bonded) [22] на всех этапах нагружения. Граничные условия для системы соответствуют стойке шарнирноопертой с двух сторон и наложены таким образом, что не стесняют поперечных деформаций бетонного образца. Это позволяет добиться равномерного НДС по всей длине стойки.

Исследуется работа цилиндрических образцов, выполненных из тяжелого бетона класса В25. Диаметр поперечного сечения равен $D = 250 мм$, длина – $L = 1250 мм$. Размеры образцов подобраны таким образом, чтобы исключить из рассмотрения влияние продольного изгиба ($L/D = 5$ – короткий стержень).

Для сопоставления результатов численного моделирования с экспериментальными воспользуемся диаграммой деформирования усиленного бетона, которая предложена в работе [23]. Диаграмма получена по результатам обработки большого массива данных натурных испытаний цилиндрических образцов, усиленных стекло- и углекомпозитными обоями. Особенностью диаграммы является линейная зависимость напряжений от деформаций после разупрочнения бетона в отличие от нелинейной зависимости, которая имеет место при использовании косвенного стального армирования [24, 25]. Диаграмма описывается следующей системой

$$\begin{cases} \sigma_c = E_c \varepsilon_c - \frac{(E_c - E_2)^2}{4 f_{co}} \varepsilon_c^2, & 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_t \\ \sigma_c = f_{co} + E_2 \varepsilon_c, & \rho_K \geq 0,01 \\ \sigma_c = f_{co} + \frac{f_{co} - f_{cu}}{\varepsilon_{cu} - \varepsilon_{co}} (\varepsilon_c - \varepsilon_{co}), & \rho_K < 0,01 \end{cases} \quad \varepsilon_t < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu} \quad (28)$$

где $f_{co} = R_{b,ser} = 18,5 \text{ МПа}$ – расчетное сопротивление бетона при расчете по второй группе предельных состояний;

$E_c = E_b = 30000 \text{ МПа}$ – начальный модуль упругости бетона;

E_2 – модуль упругости усиленного бетона на линейном участке диаграммы деформирования, определяемый по формуле:

$$E_2 = \frac{f_{cc} - f_{co}}{\varepsilon_{cu}} \quad (29)$$

где f_{cc} – предел прочности, усиленного образца;

ε_{cu} – относительная деформация соответствующая f_{cc} .

Как показывают исследования в общем случае наклон линейного участка диаграммы, характеризующий модулем упругости E_2 , зависит не только от свойств применяемых армирующих волокон, но и от типа связующей матрицы [26].

Величины f_{cc} и ε_{cu} определяются из условий

$$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = 1 + 3,5(\rho_K - 0,01)\rho_\varepsilon \quad (30)$$

$$\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{co}} = 1,75 + 6,5\rho_K^{0,8} \rho_\varepsilon^{1,45} \quad (31)$$

где ρ_K – коэффициент жесткости обоймы, равный

$$\rho_K = \frac{2E_f t_f}{\frac{f_{co}}{\varepsilon_{co}} D} = \frac{2 \cdot 245000 \cdot 0,384}{\frac{18,5}{0,002} \cdot 250} = 0,0813 > 0,01 \quad (32)$$

где ε_{co} – предельные относительные деформации для неусиленного бетона в вершине диаграммы равные $\varepsilon_{co} = \bar{\varepsilon}_b = 0,002$.

ρ_ε – коэффициент деформаций, определяемый по формуле:

$$\rho_\varepsilon = \frac{\varepsilon_{f,ult}}{\varepsilon_{co}} = \frac{0,011}{0,002} = 5,5 \quad (33)$$

где $\varepsilon_{f,ult}$ – предельные относительные деформации материала обоймы, равные

$$\varepsilon_{f,ult} = \frac{R_f}{E_f} = \frac{2700}{245000} = 0,011 \quad (34)$$

Из условий (29), (30) и (31) соответственно находим $E_2 = 1047 \text{ МПа}$, $f_{cc} = 43,845 \text{ МПа}$ и $\varepsilon_{cu} = 0,0242$.

Деформации, соответствующие переходу от параболического участка диаграммы к линейному, определяются по формуле

$$\varepsilon_t = \frac{2 f_{co}}{E_c - E_2} = \frac{2 \cdot 18,5}{30000 - 1047} = 0,0013 \quad (35)$$

Тогда систему (28) запишем в виде

$$\begin{cases} \sigma_c = 30000\varepsilon_c - 11328057\varepsilon_c^2, & 0 \leq \varepsilon_c \leq 0,0013 \\ \sigma_c = 18,5 + 1047\varepsilon_c & 0,0013 < \varepsilon_c \leq 0,0242 \end{cases} \quad (36)$$

Нагружение системы реализовано путем задания перемещения верхней образующей плоскости бетонного образца в несколько шагов по линейному закону. Этот прием позволяет проследить нисходящую ветвь диаграммы деформирования бетона. Нагружение кратковременное – эффект ползучести не рассматривается. Начальные напряжения в момент устройства обоймы усиления приняты нулевыми.

Результаты исследования и их анализ

В первую очередь производится расчет неусиленного контрольного образца. Смещение верхнего торца в предельной стадии и диаграмма деформирования дана на рисунке 2.

Как видно из сопоставления с теоретическими данными модель достаточно хорошо описывает деформирование образца с несущественными отличиями, вызванными различной формой задания функций, описывающих диаграммы (см. выражения (10) и (11)).

Дальнейшее увеличение смещения верхнего торца с практической точки зрения не представляет интереса, поскольку СП 63.13330.2012 ограничивают уровень приращения сжимающих напряжений на нисходящей ветви условием $\eta \geq 0,85$.

Далее проводится испытание образца, усиленного обоймой. При этом используются две диаграммы деформирования, а именно: криволинейная с нисходящей ветвью и диаграмма с площадкой текучести.

Видно (см. рисунок 3), что на начальном этапе деформирования результаты, полученные по двум диаграммам, одинаково описывают поведение образца. Наблюдается это до напряжений равных уровню начала разупрочнения бетона, который незначительно выше расчетного сопротивления материала (около 15%) за счет действия всестороннего обжатия.

Далее график напряжения-деформации для криволинейной диаграммы переходит на нисходящую ветвь, что свидетельствует о начале разупрочнения бетона. За счет удерживающей способности обоймы нисходящая ветвь более пологая, чем для неусиленного образца.

Напротив, при использовании диаграммы деформирования с площадкой текучести имеет место рост напряжений по линейному закону. Полученная по результатам численного расчета диаграмма довольно хорошо совпадает с теоретической по [23]. Расхождение при определении предельных напряжений для усиленного образца составило всего +0,3%.

Сравнивая полученные результаты, очевидно, что наиболее обоснованным при проведении расчетов элементов, усиленных композитными обоймами, является применение диаграммы деформирования с площадкой текучести.

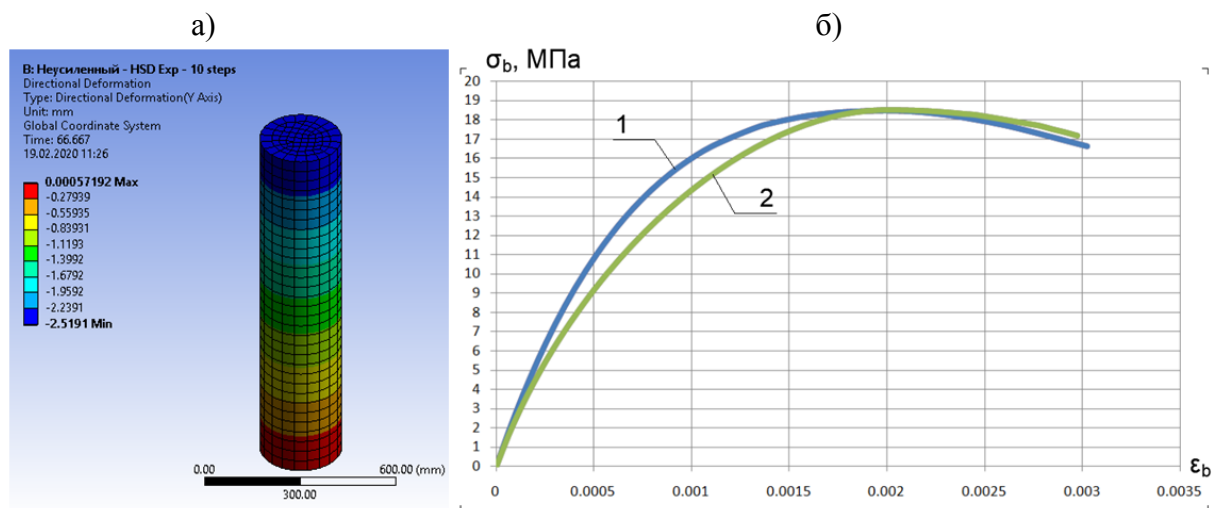


Рисунок 2 – Результаты численного расчета неусиленного образца в ANSYS: а) смещение верха образца в предельной стадии; б) диаграммы деформирования:
 1 – криволинейная по СП 63.13330.2012, 2 – по результатам численного расчета неусиленного образца в ANSYS

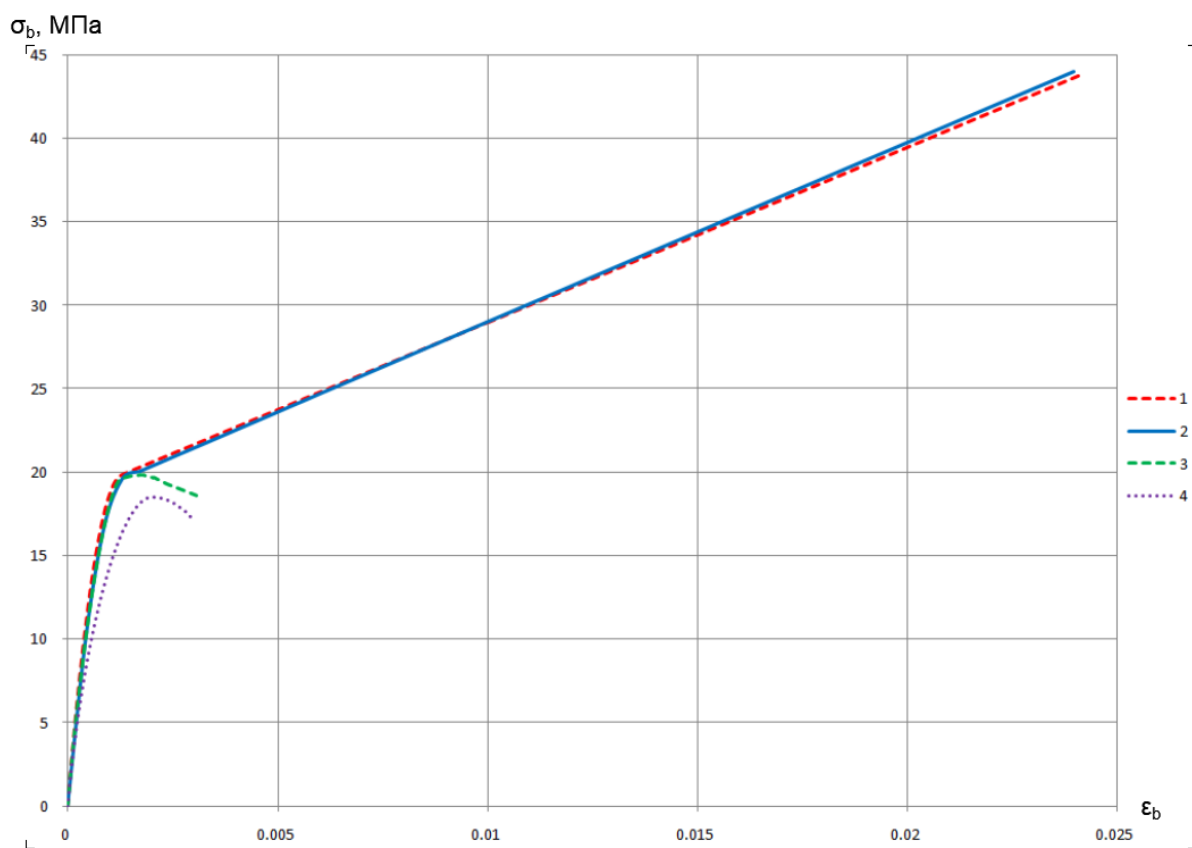


Рисунок 3 – Диаграммы деформирования:
 1 – теоретическая по [20], 2 – по результатам численного расчета усиленного образца в ANSYS с применением функции разупрочнения с площадкой текучести, 3 – то же, с нисходящей ветвью, 4 – по результатам численного расчета неусиленного образца в ANSYS

После достижения критерия текучести Друкера-Прагера бетон, заключенный в обойму, начинает разупрочняться, что на практике должно сопровождаться интенсивным образованием трещин и их раскрытием. Формально, система «бетон-обойма» не теряет несущую способность, поскольку поперечные деформации бетона по-прежнему ограничены, а напряжения в элементе растут, вплоть до разрыва композита. При этом жесткость самой обоймы не способна эффективно противостоять раскрытию трещин, о чем косвенно свидетельствует смещение верхнего торца образца в предельной стадии, составляющее около 30 мм.

Сомнения вызывает эксплуатационная пригодность бетона в обойме, который к этому моменту постепенно утрачивает структурную целостность и находится в виде разрозненной (разупрочненной) массы. Если в случае сплошной обоймы обильное трещинообразование не так критично, то при устройстве разреженной обоймы возможно раздробление и выпадение бетона на участках между бандажами. Кроме того, возникает потребность оценки влияния таких повреждений на изгибную жесткость колонн при наличии случайных эксцентриситетов.

В данный момент, СП 164.1325800.2014 «Усиление железобетонных конструкций композитными материалами. Правила проектирования» не учитывает возникновение высоких необратимых деформаций для сжатых элементов. Расчетное сопротивление бетона сжатию с учетом объемного напряженного состояния определяется из условия

$$R_{b3} = R_b + k_{ef} k_e R_f \mu_f \quad (37)$$

где k_{ef} и k_e – коэффициенты эффективности обоймы, зависящие от формы поперечного сечения элемента и наличия разрывов по высоте обойм; R_f – расчетное сопротивление материала обоймы; μ_f – коэффициент армирования.

Анализируя вышеприведенную формулу, можно отметить, что разрушение элемента наступает с достижением напряжений в композитном материале расчетного сопротивления.

Встает вопрос о более точном назначении критерия предельного состояния системы, который, по мнению авторов, должен учесть не только прочностные свойства материалов, но и реальные деформации, которые возникают в бетоне.

Здесь можно порекомендовать подход приведенный, например, в работе [27], в которой несущая способность трубобетонного стержня характеризуется силой P соответствующей некоторой наперед заданной относительной деформации ε_{ult} . Величина предельной деформации при этом может назначаться из разных соображений. Например, это могут быть деформации, соответствующие некоторой величине раскрытия трещин или деформации, определяющие дальнейшую эксплуатационную пригодность конструкции по технологическим условиям эксплуатации. Так же, ограничение может быть связано с условиями работы усиленного элемента в составе некоторой конструктивной системы, с учетом реальных диаграмм деформирования.

Помимо этого, важен учет истории нагружения и начального НДС, возникающего до усиления. Наличие начальных деформаций приводит к увеличению суммарных деформаций в предельной стадии работы элемента.

Очевидно, что для обеспечения нормальной эксплуатации усиленных композитными обоймами конструкций необходимо ограничение предельных деформаций на этапе проектирования. Данные ограничения должны обосновываться экспериментально с учетом вышеприведенных условий.

Выводы

Выполненное численное моделирование работы бетонного стержня в углепластиковой обойме позволило выявить следующие особенности работы системы "бетон-обойма":

1. Описание работы бетона, заключенного в обойму из композитных материалов, с помощью модели Друкера-Прагера необходимо производить, используя функцию разупрочнения материала с площадкой текучести, взамен функции с нисходящей ветвью, которая

не дает роста напряжений в момент разупрочнения бетона, что не удовлетворяет экспериментальным данным.

2. При проведении расчетов согласно отечественным нормам соответствие опытным данным достигается путем применения двух- или трехлинейной диаграммы деформирования бетона, либо заменой нисходящей ветви криволинейной диаграммы на площадку текучести.

3. Предельное состояние короткой стойки в ряде случаев необходимо связывать с возникновением некоторой контролируемой осевой деформации, при которой дальнейшая нормальная эксплуатация конструкции невозможна. Причем напряжения в композитной обойме к этому моменту могут не достигать расчетного сопротивления материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Давидюк А.Н., Спивак Н.А. Применение высокопрочных композитов для усиления железобетонных конструкций // Бетон и железобетон. 2016. № 2. С. 13-16.
2. Tamrazyan A., Popov D. Reduce of bearing strength of the bent reinforce-concrete elements on a sloping section with the corrosive damage of transversal armature // В сборнике: MATEC Web of Conferences. 2017. С. 162. DOI: 10.1051/mateconf/201711700162.
3. Тамразян А.Г., Аветисян Л.А. Экспериментальные исследования внецентренно сжатых железобетонных элементов при кратковременных динамических нагрузках в условиях огневых воздействий // Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 4. С. 24-28.
4. Tamrazyan A. Reduce the impact of dynamic strength of concrete under fire conditions on bearing capacity of reinforced concrete columns // Applied Mechanics and Materials. 2014. Т. 475-476. С. 1563-1566. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.475-476.1563.
5. Тамразян А.Г. Оценка риска и надежности несущих конструкций и ключевых элементов - необходимое условие безопасности зданий и сооружений // Вестник ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко "Исследования по теории сооружений". 2009. № 1. С. 160-171.
6. Тамразян А.Г. К оценке риска чрезвычайных ситуаций по основным признакам его проявления на сооружение // Бетон и железобетон. 2001. № 5. С. 8-10.
7. Тамразян А.Г., Филимонова Е.А. Рациональное распределение жесткости плит по высоте здания с учетом работы перекрытия на сдвиг // Вестник МГСУ. 2013. № 11. С. 84-90.
8. Анализ экспериментальных исследований по усилению железобетонных конструкций полимерными композитными материалами. Часть 1. Отечественные эксперименты при статическом нагружении / И.И. Овчинников, Овчинников И.Г., Г.В. Чесноков, Е.С. Михалдыкин // Интернет-журнал Науковедение. 2016. Том 8. №3. С. 1-25. [Электронный ресурс] URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/24TVN316.pdf> (дата обращения: 24.01.2020).
9. Вопросы усиления железобетонных конструкций композитами: 1. Экспериментальные исследования особенностей усиления композитами изгибаемых железобетонных конструкций / И.Г. Овчинников, Ш.Н. Валиев, И.И. Овчинников, В.С. Зиновьев, А.Д. Умиров // Интернет-журнал Науковедение. 2012. № 4. С. 1-22 [Электронный ресурс] URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/7tvn412.pdf> (дата обращения: 24.01.2020).
10. Мосин М.В. Результаты компьютерного моделирования трехосного напряженного состояния сжатой бетонной призмы усиленной металлической облойкой // Вестник СибАДИ. 2017. № 3. С. 144-151.
11. Alrayes O. Modelling of circular concrete columns with CFRP sheets under monotonic loads by ATENA-3D // Bauhaus Summer School inForecast Engineering: Global Climate change and the challenge for built environment17-29 August 2014. Weimar. Germany. 2014. 15 c.
12. Matias J.V. Numerical modelling of circular concrete columns strengthened with hybrid FRP jackets [Электронный ресурс]. URL: https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/1689244997256103/Extended_Abstract_Jorge_Matias_final.pdf (дата обращения: 26.01.2020).
13. 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. 96-124.
14. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. Москва: Стройиздат, 1996. 416 с.
15. Давидюк А.Н. Бетонные и железобетонные конструкции. Нелинейные расчеты при проектировании. Москва: М-во строительства и жилищно-коммунального хозяйства Рос. Федерации, 2017. 107 с.
16. Drucker D.C., Prager W. Soil mechanics and plastic analysis or limit design // Quarterly of Applied Mathematics. 1952. Том 10. № 2. С. 157-165.
17. Теличко В.Г. Исследование прочности при двухосном сжатии бетона класса В-25 / Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2009. С. 89-94.
18. Kupfer H.B., Gerstle K.H. Behavior of Concrete Under Biaxial Stresses. J. Eng. Mech. Div. ASCE. 1973. № 99(4). С. 852-866.

19. Верификационный отчет по ПК ANSYS Mechanical. Москва: ЗАО НИЦ «СтаДиО», ГОУ ВПО МГСУ. Свидетельство РААСН о верификации ПС № 02/ANSYS/2009 от 10.07.2009 года. Том 1. 638 с.
20. Fédération internationale du Béton. fib Model Code for Concrete Structures 2010. Wilhelm Ernst & Sohn. Berlin. ISBN: 978-3-433-03061-5. 2013. 436 с.
21. Скворцов Ю.В. Методические указания к лабораторным занятиям по дисциплине механика композиционных материалов. Самара., 2013. 99 с.
22. Федорова Н.Н. Основы работы в ANSYS 17. Москва: ДМК Пресс, 2017. 210 с.
23. Refinement of a design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete / J.G. Teng, T. Jiang, L. Lam, Y.Z. Luo // Journal of Composites for Construction. 2009. № 13(4). С. 269-278. DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000012
24. Тамразян А.Г., Манаенков И.К. Учет свойств ограниченного бетона при расчете несущей способности плит перекрытий // Строительство: наука и образование. 2014. № 1. С. 2. [Электронный ресурс] URL: http://www.nso-journal.ru/public/journals/1/issues/2014/01/2_Tamrazyan.pdf (дата обращения: 24.01.2020)
25. Манаенков И.К. К совершенствованию диаграммы сжатого бетона с косвенным армированием // Строительство и реконструкция. 2018. №2 (76). С. 41-50.
26. Donnini J., Corinaldesi V. Concrete columns confined with different composite materials. MATEC Web Conf. 2018. Том 199. 5 с. doi.org/10.1051/mateconf/201819909012
27. Кикин А.И. Конструкции из стальных труб, заполненных бетоном. Москва: Стройиздат, 1974. 144 с.

REFERENCES

1. Davidyuk A. N., Spivak N. A. Primenenie vysokoprochnykh kompozitov dlya usileniya zhelezobetonnykh konstrukcij [The use of high-strength composites for strengthening reinforced concrete structures]. *Beton i zhelezobeton*. 2016. No. 2. Pp. 13-16. (rus)
2. Tamrazyan A., Popov D. Reduce of bearing strength of the bent reinforce-concrete elements on a sloping section with the corrosive damage of transversal armature. MATEC Web of Conferences 2017. p. 00162. DOI: 10.1051/mateconf/201711700162.
3. Tamrazyan A.G., Avetisyan L.A. Eksperimental'nye issledovaniya vnecentrenno szhatykh zhelezobetonnykh elementov pri kratkovremennykh dinamicheskikh nagruzheniyah v usloviyakh ognevyykh vozdeystviy [Experimental studies of eccentrically compressed reinforced concrete elements under short-term dynamic loading under conditions of firing]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2014. No. 4. Pp 24-28. (rus)
4. Tamrazyan A. Reduce the impact of dynamic strength of concrete under fire conditions on bearing capacity of reinforced concrete columns. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vol. 475-476. Pp. 1563-1566. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.475-476.1563
5. Tamrazyan A.G. Otsenka riska i nadezhnosti nesushchikh konstruktsiy i klyuchevykh elementov - neobkhodimoye usloviye bezopasnosti zdaniy i sooruzheniy. Vestnik TSNIISK im. V.A. Kucherenko "Issledovaniya po teorii sooruzheniy". 2009. № 1. S. 160-171.
6. Tamrazyan A.G. K otsenke riska chrezvychaynykh situatsiy po osnovnym priznakam yego proyavleniya na so-oruzheniye. Beton i zhelezobeton. 2001. № 5. S. 8-10.
7. Tamrazyan A.G., Filimonova Ye.A. Ratsional'noye raspredeleniye zhestkosti plit po vysote zdaniya s uche-tom raboty perekrytiya na sdvig. Vestnik MGSU. 2013. № 11. S. 84-90.
8. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Chesnokov G.V., Mikhaldykin E.S. Analiz eksperimental'nykh issledovaniy po usileniyu zhelezobetonnykh konstruktsiy polimernymi kompozitnymi materialami. Chast' 1. Otechestvennye eksperimenty pri staticheskoy nagruzhenii [Analysis of experimental studies on strengthening of reinforced concrete structures with polymer composite materials. Part 1. Domestic experiments under static loading]. *Internet-zhurnal Naukovedenie*. 2016. Vol. 8, No. 3, Pp. 1-25 [online] URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/24TVN316.pdf> (date of application: 24.01.2020) (rus)
9. Ovchinnikov I.G., Valiev S.N., Ovchinnikov I.I., Zinoviev V.S., Umirov A.D. Voprosy usileniya zhelezobetonnykh konstruktsiy kompozitami: 1. Eksperimental'nye issledovaniya osobennostey usileniya kompozitami izgibaemykh zhelezobetonnykh konstruktsiy [Use the composites for strengthening reinforced concrete: 1. Experimental studies of the composites strengthening for flexural reinforced concrete structures]. 2012. No. 4. Pp. 1-22. [online] URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/7tvn412.pdf> (date of application: 24.01.2020) (rus)
10. Mosin M.V. Rezul'taty komp'yuternogo modelirovaniya trekhosnogo napryazhennogo sostoyaniya szhatoy betonnoy prizmy usilennoy metallicheskoj obojmoy [The results of computer simulation of a triaxial stress state of a compressed concrete prism reinforced with a metal clip]. *Vestnik SibADI*. 2017. No. 3. Pp. 144-151. (rus)
11. Alrayes O. Modelling of circular concrete columns with CFRP sheets under monotonic loads by ATENA-3D. Bauhaus Summer School inForecast Engineering: Global Climate change and the challenge for built environment17-29 August 2014. Weimar. Germany. 2014. 15 p.
12. J.V. Matias. Numerical modelling of circular concrete columns strengthened with hybrid FRP jackets. [online] URL: https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/1689244997256103/ExtendedAbstract_Jorge_Matias_final.pdf (date of application: 26.01.2020).
13. Korsun V.I., Nedorezov A.N. Variant opisaniya zakonomernostey uprugoplasticheskogo i psevdoplasticheskogo deformirovaniya betona v usloviyakh ob'emnogo napryazhennogo sostoyaniya [A variant of the

- description of the regularities of elastoplastic and pseudoplastic deformation of concrete under the conditions of a volumetric stress state]. *Sovremennoe promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2014. Vol. 10, No. 2. Pp. 96–124. (rus)
14. Karpenko N.I. Obshchie modeli mekhaniki zhelezobetona [General models of the mechanics of reinforced concrete]. Moscow: Strojizdat. 1996. 416 p. (rus)
15. Davidiyuk A.N. Betonnye i zhelezobetonnye konstrukcii. Nelinejnye raschety pri proektirovanii [Concrete and reinforced concrete structures. Nonlinear calculations in the design]. Moscow. Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation. 2017. 107 p. (rus)
16. Drucker D.C., Prager W. Soil mechanics and plastic analysis or limit design. Quarterly of Applied Mathematics. 1952. Vol. 10, No. 2. Pp. 157–165.
17. Telichko V.G. Issledovanie prochnosti pri dvuhosnom szhatii betona klassa B-25 [Strength study under biaxial compression of concrete of class B-25]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2009. Pp 89–94. (rus).
18. Kupfer H. B., Gerstle K. H. Behavior of Concrete Under Biaxial Stresses. J. Eng. Mech. Div. ASCE. 1973. No. 99(4). Pp. 852–866
19. Verifikacionnyj otchet po PK ANSYS Mechanical [ANSIS Mechanical PC verification report]. Moscow: ZAO NIC «StaDiO», GOU VPO MGSU. Svidetel'stvo RAASN o verifikacii PSN[№] 02/ANSYS/2009 ot 10.07.2009 goda. Vol. 1. 638 p. (rus)
20. Fédération internationale du Béton. fib Model Code for Concrete Structures 2010. Wilhelm Ernst & Sohn. Berlin. ISBN: 978-3-433-03061-5. 2013. 436 p.
21. Skvortsov Y.V. Metodicheskie ukazaniya k laboratornym zanyatiyam po discipline mekhanika kompozitsionnykh materialov [Guidelines for laboratory studies in the discipline of mechanics of composite materials]. Samara. 2013. 99 p. (rus).
22. Fedorova N.N. Osnovy raboty v ANSYS 17 [Fundamentals of work in ANSYS 17]. Moscow: DMK Press. 2017. 210 p. (rus).
23. Teng J.G., Jiang T., Lam L., Luo Y.Z. Refinement of a design-oriented stress–strain model for FRP-confined concrete. Journal of Composites for Construction. 2009. No. 13(4). Pp. 269–278. DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000012
24. Tanuazyan A.G., Manaenkov I.K. Uchet svoystv ogranichenogo betona pri raschete nesushchej sposobnosti plit perekrytij [Taking into account the properties of limited concrete when calculating the bearing capacity of floor slabs]. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie*. 2014. No. 1. p. 2. [online] URL: http://www.nso-journal.ru/public/journals/1/issues/2014/01/2_Tamrazyan.pdf (date of application: 24.01.2020) (rus)
25. Manaenkov I.K. K sovershenstvovaniyu diagrammy szhatogo betona s kosvennym armirovaniem [To improve the diagram of compressed concrete with indirect reinforcement]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2018. No. 2 (76). Pp. 41–50.
26. Donnini J., Corinaldesi V. Concrete columns confined with different composite materials. MATEC Web Conf. 2018. Vol. 199. 5 p. doi.org/10.1051/mateconf/201819909012
27. Kikin A.I. Konstrukcii iz stal'nyh trub, zapolnennyh betonom [Structures of steel pipes filled with concrete]. 1974. 144 p. (rus).

Информация об авторах

Черник Владимир Игоревич

Ярославский государственный технический университет (ФГБОУ ВО "ЯГТУ"), г. Ярославль, Россия, аспирант.
E-mail: chernik_vi@mail.ru

Самарина Светлана Эдуардовна

Московский государственный строительный университет (ФГБОУ ВО «МГСУ»), г. Москва, Россия, преподаватель кафедры железобетонных и каменных конструкций НИУ МГСУ.
E-mail: zubareva494@mail.ru

Information about authors

Chernik Vladimir I.

Yaroslavl State Technical University (YSTU), Yaroslavl, Russia, postgraduate student
E-mail: chernik_vi@mail.ru

Samarina Svetlana E.

Moscow State University of Civil Engineering (MGSU), Moscow, Russia, lecturer of the department of reinforced concrete and masonry structures MGSU.
E-mail: zubareva494@mail.ru