



НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С КОСВЕННЫМ АРМИРОВАНИЕМ

А. В. Недорезов

*ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»,
2, ул. Державина, г. Макеевка, ДНР, 86123.
E-mail: a.v.nedorezov@donnasa.ru*

Получена 10 февраля 2021; принята 26 марта 2021.

Аннотация. Представлены результаты анализа напряженно-деформированного состояния железобетонных элементов с косвенным армированием при численных испытаниях на одноосное сжатие, выполненных средствами программных комплексов «Ли́ра САПР» и «ANSYS». В указанных ПК выполнен физически нелинейный расчет железобетонных образцов призм с применением соотношений ортотропной дилатационной модели деформирования бетона. За критерий разрушения образцов-призм при расчете принималось достижение напряжениями в бетоне предельных значений, с учетом неоднородного напряженного состояния по критериям прочности С. Ф. Клованича – Д. И. Безушко и К. J. Willam – E. P. Warnke, а также напряжениями в продольной и поперечной арматуре предела текучести стали. В целом учет физической нелинейности деформирования материалов позволяет с достаточной степенью точности оценивать деформации и несущую способность элементов образцов-призм с косвенным армированием в программных комплексах «Ли́ра САПР» и «ANSYS». Результаты анализа согласуются с действующими нормативными документами. Определены соотношения объемного напряженного состояния в бетоне и напряжений в сетках косвенного армирования в зависимости от процента косвенного армирования для используемых в работе элементов.

Ключевые слова: бетон, косвенное армирование, короткий центрально-сжатый элемент, объемное напряженное состояние, прочность, деформации, критерии прочности, дилатация, модели деформирования бетона.

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ З НЕПРЯМИМ АРМУВАННЯМ

А. В. Недорезов

*ДОНУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»,
2, вул. Державіна, м. Макіївка, ДНР, 86123.
E-mail: a.v.nedorezov@donnasa.ru*

Отримана 10 лютого 2021; прийнята 26 березня 2021.

Анотация. Представлены результаты анализа напряженно-деформованного стану залізобетонних елементів з непрямим армуванням при численних випробуваннях на одноосьове стиснення, виконаних засобами програмних комплексів «Лі́ра САПР» і «ANSYS». У зазначених ПК виконано фізично нелінійний розрахунок залізобетонних зразків призм із застосуванням співвідношень ортотропної дилатаційної моделі деформування бетону. За критерій руйнування зразків-призм при розрахунку приймалося досягнення напруженнями в бетоні граничних значень, з урахуванням неоднорозового напруженого стану за критеріями міцності С. Ф. Клованича – Д. І. Безушко і К. J. Willam – E. P. Warnke, а також напруженнями в подовжній і поперечній арматурі межі текучості сталі. В цілому урахування фізичної нелінійності деформування матеріалів дозволяє з достатнім ступенем точності оцінювати деформації і несучу здатність елементів зразків-призм з непрямим армуванням в програмних комплексах «Лі́ра САПР» і «ANSYS». Результати аналізу узгоджуються з чинними нормативними документами. Визначено співвідношення

объемного напряженного stanu в бетоне и напряжений в сетках непрямого армирования зависят от процента непрямого армирования для используемых в работе элементов.

Ключевые слова: бетон, непрямо армирование, короткий центрально-сжатый элемент, объемный напряженный стан, прочность, деформации, критерии прочности, дилатация, модели деформирования бетона.

STRESS-STRAIN STATE OF REINFORCED CONCRETE ELEMENTS WITH INDIRECT REINFORCEMENT

Andrii Niedoriezov

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture,

2, Derzhavin Str., Makeevka, DPR, 83123.

E-mail: a.v.nedorezov@donnasa.ru

Received 10 February 2021; accepted 26 March 2021.

Abstract. The results of the analysis of the stress-strain state of reinforced concrete elements with indirect reinforcement under uniaxial compression, carried out numerical tests by using the software systems «Lira SAPR» and «ANSYS» are presented in this article. A physically nonlinear calculation of reinforced concrete samples of prisms was performed using the relations of the orthotropic dilatation model of concrete deformation. The criterion for the destruction of prismatic samples in the calculation was the achievement of the maximum values of stresses in concrete, taking into account the non-axial stress state according to the strength criteria of S. F. Klovach – D. I. Bezushko and K. J. Willam – E. P. Warnke, as well as stresses in the longitudinal and transverse reinforcement of the yield strength of steel. In general, taking into account the physical nonlinearity of the deformation of materials allows us to estimate the deformations and the bearing capacity of the elements of samples-prisms with indirect reinforcement in the software complexes «Lira SAPR» and «ANSYS» with a sufficient degree of accuracy. The analysis results are consistent with the current regulatory documents. The relations of the volumetric stress state in concrete and the stresses in the grids of indirect reinforcement are determined, depending on the percentage of indirect reinforcement for the elements used in the work.

Keywords: concrete, indirect reinforcement, short centrally compressed element, volumetric stress state, strength, deformations, strength criteria, dilatation, concrete deformation models.

Косвенное армирование является эффективным способом повышения несущей способности сильно сжатых колонн, а также участков конструкций при местном приложении нагрузки. Экспериментальным и теоретическим исследованиям влияния косвенного армирования на прочность и деформации внецентренно сжатых железобетонных элементов посвящены работы [1–6, 11–13, 16, 17], а изгибаемых – работы [10, 14, 15]. Установлено, что с увеличением коэффициента косвенного армирования отмечается повышение прочности бетона, что связано со сдерживанием косвенной арматурой поперечных деформаций бетона и созданием в конструкциях объемного

напряженного состояния – трехосного сжатия. Отмечено [5, 11, 13], что с повышением прочности бетона эффект от влияния косвенного армирования снижается.

В качестве объекта теоретических исследований напряженно-деформированного состояния рассмотрены центрально сжатые железобетонные элементы с косвенным армированием на основе результатов испытаний образцов-призм, представленных в работе А. В. Корсуна [6].

Железобетонные образцы представлены призмами размерами 150×150×600 и 250×250×650 мм, армированными поперечными сетками в сочетании с продольной арматурой. В качестве

продольной рабочей арматуры принята арматура $\varnothing 10$ и $\varnothing 14$ мм класса А-III, соответственно. Геометрические характеристики и схема армирования элементов образцов-призм представлены на рисунке 1, характеристики материалов представлены в таблице 1, характеристики механических свойств арматурной стали и бетона – в таблицах 2 и 3.

В численных исследованиях оценка НДС элементов выполнена с использованием ПК «Лира САПР» и ANSYS Workbench 14.5. С использованием указанных ПК выполнен физически нелинейный расчет железобетонных образцов призм с неоднородным распределением свойств бетона по площади поперечного сечения.

В расчетах с использованием ПК «Лира САПР» моделирование бетона образцов-призм выполнено с помощью объемных физически нелинейных универсальных пространственных 8-узловых изопараметрических конечных элементов (КЭ, тип 236), моделирование поперечной и продольной арматуры – физически нелинейными КЭ ферменного стержня (тип 204).

В расчетах с использованием ANSYS Workbench 14.5 моделирование бетона образцов-призм выполнено с помощью объемных однород-

но структурных сплошных 20-узловых конечных элементов (КЭ, тип SOLID 185), моделирование поперечной и продольной арматуры выполнено балочным конечным элементом (тип BEAM 188).

Для описания нелинейных диаграмм деформирования бетона бетонных образцов-призм применялся встроенный в ПК «Лира САПР» экспоненциальный закон деформирования (11), трехлинейный закон деформирования (13), кусочно-линейный закон деформирования (14), закон деформирования Гениева (18) и модернизированный закон деформирования, внедренный с помощью программируемого приложения USERMAT в ПК ANSYS Workbench 14.5. Модернизация USERMAT заключалась в изменении алгоритма для применения соотношений ортотропной дилатационной модели деформирования бетона, представленного в работе [8].

Анализ результатов расчета бетонных образцов-призм с учетом встроенных в ПК «Лира САПР» нелинейных законов деформирования и программируемого приложения USERMAT в ANSYS Workbench 14.5 представлен на рисунке 2. Наилучшая сходимость результатов экспериментальных [6] и численных исследований

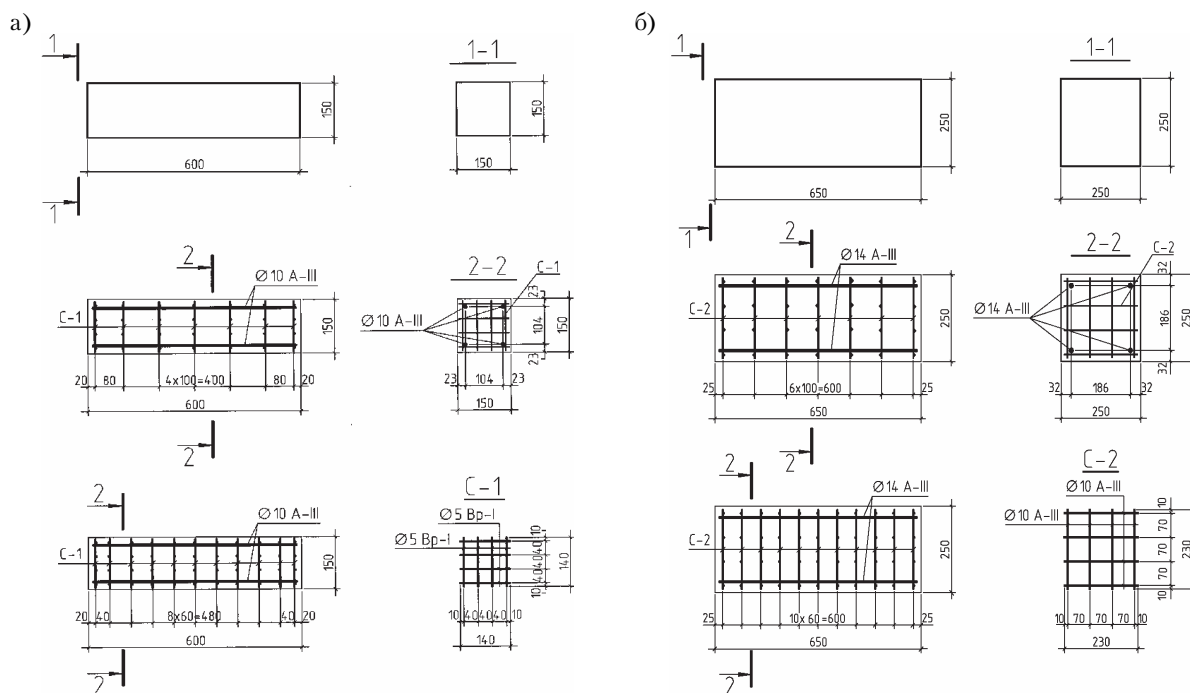


Рисунок 1. Схемы продольного и поперечного армирования железобетонных образцов-призм размерами 150×150×600 мм ($\mu_{xy} = 1,3\%$ и $\mu_{xy} = 2,2\%$) (а) и 250×250×650 мм ($\mu_{xy} = 3,0\%$ и $\mu_{xy} = 5,0\%$) (б).

Таблица 1. Характеристика опытных коротких колонн

№ п/п	Шифр образцов-призм	Схема испытания	Сечения образцов-призм, мм	Опытная величина разруш. напряж., МПа	Кол-во, диаметр и класс прод. арм-ры	Кол-во, диаметр и класс арм-ры в одном направл. сеток косвенного арм.	Шаг сеток косвен. арм., мм
1	КС-15-а	«а» – без косв. арм.	150×150×600	69,2	–	–	–
2	КС-15-б-ш.8	«б» – с косв. арм.		97,1	4 ø10 А-III	4 ø5 Вр-I	80
3	КС-15-б-ш.4	«б» – с косв. арм.		100,1	4 ø10 А-III	4 ø5 Вр-I	40
4	КС-25-а	«а» – без косв. арм.	250×250×600	82,5	–	–	–
5	КС-25-б-ш.10	«б» – с косв. арм.		108,0	4 ø14 А-III	4 ø10 А-III	100
6	КС-25-б-ш.6	«б» – с косв. арм.		122,1	4 ø14 А-III	4 ø10 А-III	60

Таблица 2. Характеристики свойств арматурной стали

№ п/п	Класс арматуры	Диаметр, мм	Предел текучести σ_T , МПа	Временное сопротивление σ_B , МПа	Относит. удлинение, %	Примечания
1	А-III	14	390	590	14,0	По ГОСТ 5781-82
2		10				
3	Вр-I	5	492	542	3,0	По ГОСТ 6727-80

Таблица 3. Характеристики механических свойств бетона

№ п/п	Наименование образцов-призм	Призменная прочность R_b , МПа	Начальный модуль упругости E_0 , МПа	Предельные значения линейных компонентов деформаций		Коэффициент Пуассона, μ
				Сжатие, $\varepsilon_{сз} \cdot 10^3$	Растяжение, $\varepsilon_{сл} \cdot 10^5$	
1	КС-15-а, КС-15-б	69,2	33 600	–2,60	18	0,18
2	КС-25-а, КС-25-б	82,5	33 600	–3,09	18	0,18

автора достигнута при использовании закона номер (14) ПК «Лира САПР» и модернизированного закона деформирования программируемого приложения USERMAT в ANSYS Workbench 14.5. Разница деформаций, полученных по результатам сравнения эксперимента и численных исследований по указанным моделям, не превысила 5 %.

Параметры диаграмм деформирования бетона определялись с использованием выражений,

представленных в работе [8], разработанных на основе проведенных экспериментально-теоретических исследований.

Общий вид расчетной модели представлен на рисунке 3. Загружение образцов-призм вертикальной сосредоточенной узловой нагрузкой выполнялось пошагово в соответствии со схемой испытания от предельной разрушающей нагрузки таблице 1. Закрепление образцов-призм

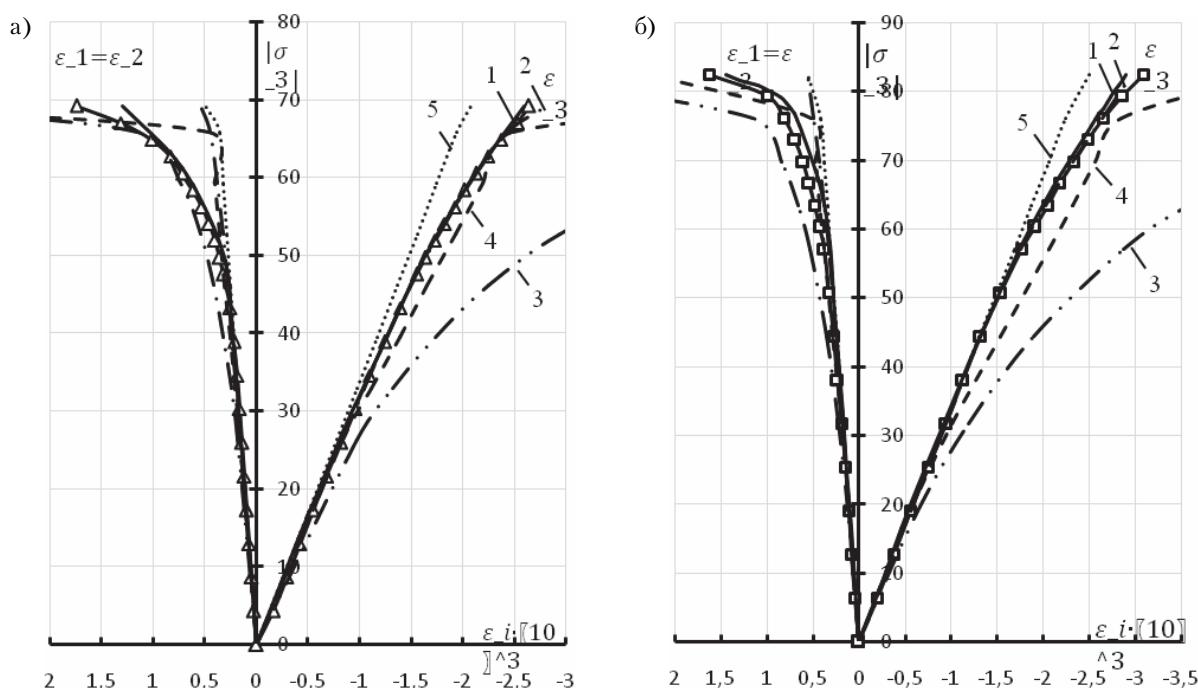


Рисунок 2. Изменение компонент линейных деформаций бетонных образцов-призм размерами: а) 150×150×600 мм; б) 250×250×650 мм в условиях одноосного сжатия. Теоретические кривые по законам нелинейного деформирования:

1 — — — — — ANSYS Workbench*

3 — · — — — — закон № 11 ПК «Ли́ра САПР»

5 ··········· закон № 18 ПК «Ли́ра САПР»

* — расчет с использованием выражений, представленных в работе [8], внедренных в программируемое приложение USERMAT ПК ANSYS Workbench 14.5

2 — - — — — закон № 14 ПК «Ли́ра САПР»

4 — - - - - закон № 13 ПК «Ли́ра САПР»

осуществлялось по торцам образцов-призм: неподвижному торцу запрещались перемещения по направлениям X, Y, Z; подвижному торцу, к которому прикладываются усилия, запрещались перемещения по направлениям X, Y.

За критерий разрушения образцов-призм при расчете принималось достижение:

- напряжениями в бетоне предельных значений (таблица 3), с учетом не одноосного напряженного состояния по критериям прочности С. Ф. Клованича – Д. И. Безушко [9] и К. J. Willam – Е. Р. Warnke [18], сопоставительный анализ критериев прочности для бетона представлен в работе [7];
- напряжениями в продольной и поперечной арматуре предела текучести стали согласно таблице 2.

Результаты расчета образцов-призм с учетом нелинейной работы материалов в ПК «Ли́ра САПР» и ANSYS Workbench 14.5 приведены в таблице 4.

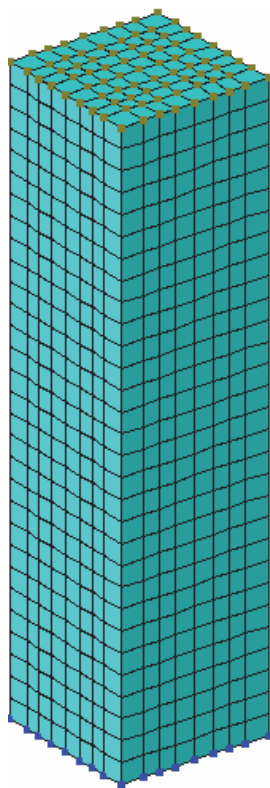
Использование в расчетах коэффициента поперечных деформаций $\mu = 0,18$ привело к недооценке от 330 до 358 % величины напряжения бокового обжатия бетона, обусловленного сетками косвенного армирования.

Учет фактического изменения коэффициента поперечных деформаций с увеличением уровня нагружения с учетом развития процессов дилатации вплоть до величины $\mu=0,5$ позволило учесть значительное повышение напряжения бокового обжатия бетона в горизонтальных направлениях, особенно при уровнях нагружения, близких к разрушающей нагрузке.

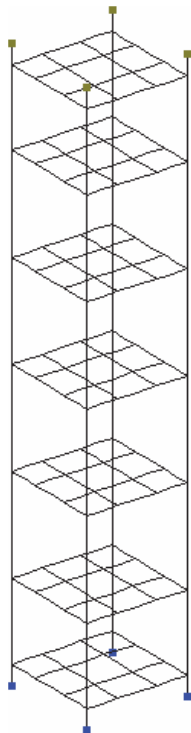
Результаты вычисления напряжений в поперечных направлениях для элементов с различными размерами и процентами косвенного армирования приведены в таблице 4 и рисунках 4–6. Напряжения в арматуре при учете фактического изменения коэффициента поперечных деформаций увеличились в 3,3 ÷ 3,58 раза.

а)

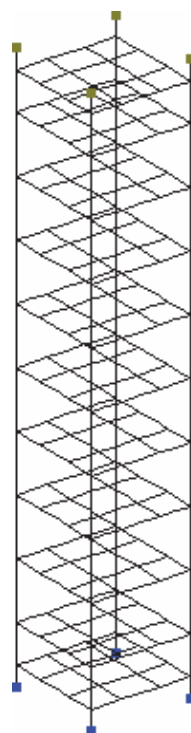
Размеры 150×150×600 (мм)



$$\mu_{xy} = 1,31 \%$$

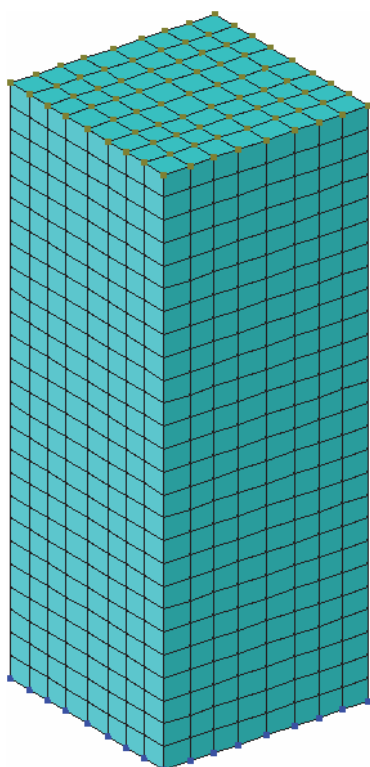


$$\mu_{xy} = 2,18 \%$$

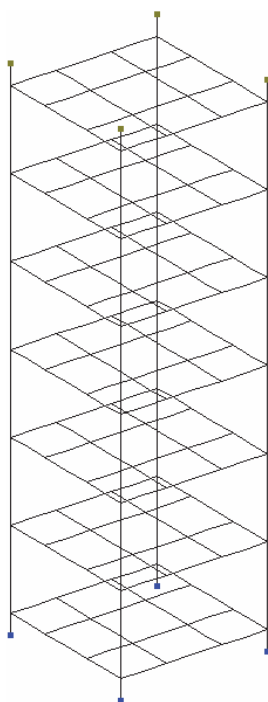


б)

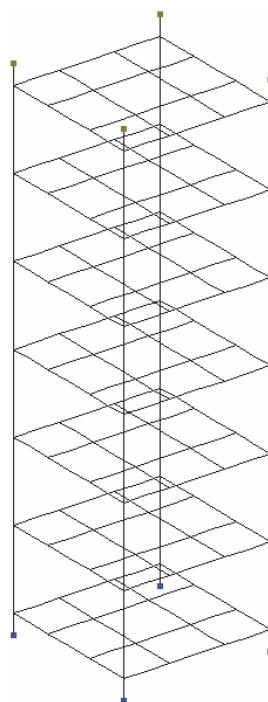
Размеры 250×250×650 (мм)



$$\mu_{xy} = 3,0 \%$$

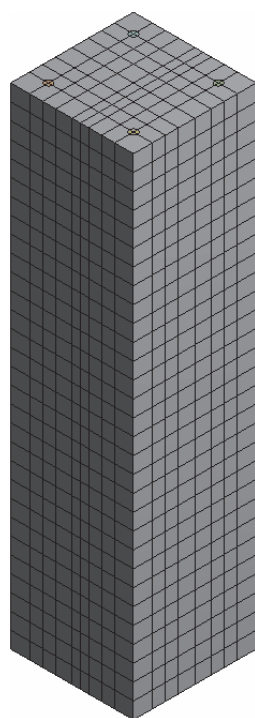


$$\mu_{xy} = 5,0 \%$$

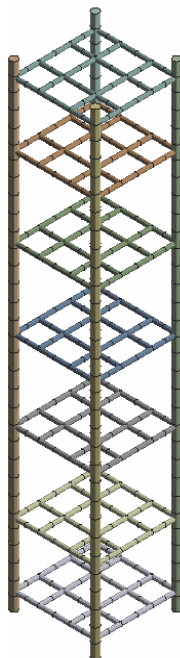


в)

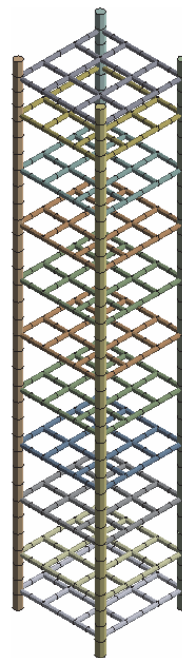
Размеры 150×150×600 (мм)



$\mu_{xy} = 1,31 \%$

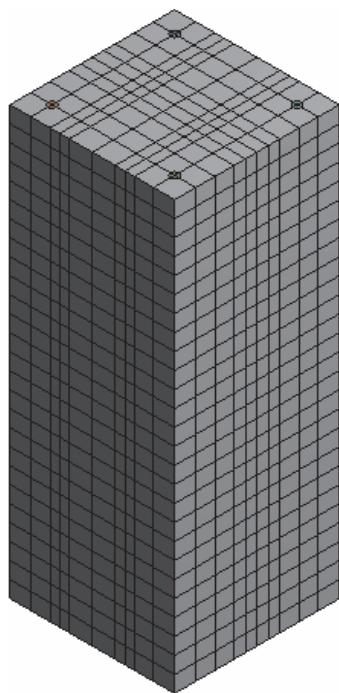


$\mu_{xy} = 2,18 \%$

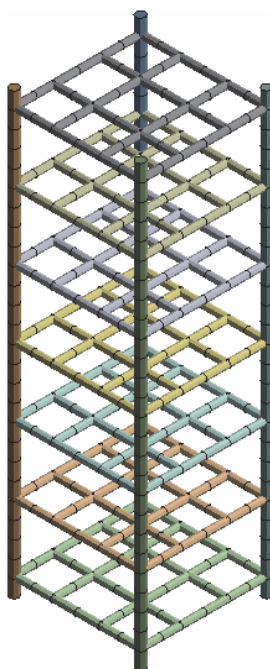


г)

Размеры 250×250×650 (мм)



$\mu_{xy} = 3,0 \%$



$\mu_{xy} = 5,0 \%$

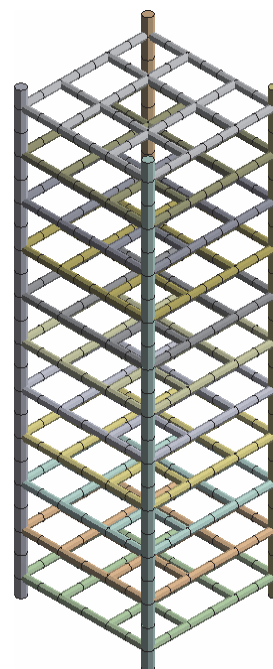


Рисунок 3. Конечно элементные модели образцов-призм размером 150×150×600 мм (а, в) и 250×250×650 мм (б, г) с коэффициентом косвенного армирования $\mu_{xy} = 1,3 \%$, $\mu_{xy} = 2,2 \%$ (а, в) и $\mu_{xy} = 3,0 \%$, $\mu_{xy} = 5,0 \%$ (б, г). Модели выполнялись с использованием ПК «Лири САПР» (а, б) и ANSYS Workbench 14.5 (в, г).

Таблица 4. Результаты расчета образцов-призм

№ п/п	Наименование параметров	Значения параметров							
1	Размеры образцов, мм	150×150×600				250×250×650			
2	Косвенное армирование μ_{xy} , %	1,31		2,18		3,0		5,0	
3	Значение коэффициента поперечных деформаций, учитываемое в расчете, μ	0,18	0,5	0,18	0,5	0,18	0,5	0,18	0,5
4	Призменная прочность R_b , МПа	69,2				82,5			
5	Опытная величина разрушающих напряжений, МПа, под чертой – $R_b/\sigma_z^{\text{разр}}$	<u>91,7</u> (1,33)		<u>100,1</u> (1,45)		<u>108,0</u> (1,31)		<u>122,1</u> (1,48)	
6	Приведенное сопротивление бетона сжатию с учетом косвенного армирования $R_{b,\text{red}}$, ф.104 [19], МПа, под чертой – $R_b/ R_{b,\text{red}}$	<u>87,54</u> (1,27)		<u>95,68</u> (1,38)		<u>110,71</u> (1,34)		<u>121,57</u> (1,47)	
7	Приведенное сопротивление бетона сжатию с учетом косвенного армирования $R_{b\text{s,loc}}$, ф.8.84 [20], МПа, под чертой – $R_b/ R_{b\text{s,loc}}$	<u>80,18</u> (1,16)		<u>87,49</u> (1,26)		<u>97,24</u> (1,18)		<u>109,69</u> (1,33)	
8	Предел текучести арматуры σ_T , МПа	492				390			
9	Напряжения в арм. стержнях сеток косвенного армирования, МПа	92,2	251,1	102,4	278,6	116,3	327,2	127,7	362,2
10	Поперечные напряжения в бетоне между сетками косвенного армирования, МПа	–0,36	–1,1	–1,0	–4,4	–1,3	–3,9	–2,7	–5,9
11	Увеличение прочности бетона, между сетками, по критерию прочности [9] (σ_i/R_b)	1,04	1,14	1,12	1,7	1,14	1,51	1,29	1,79
12	Поперечные напряжения в бетоне в уровне сетки косвенного армирования, МПа	–0,85	–2,12	–0,98	–3,01	–1,48	–4,57	–2,58	–8,15
13	Увеличение прочности бетона, в уровне сетки, по критерию прочности [9] (σ_i/R_b)	1,1	1,31	1,12	1,42	1,16	1,65	1,28	2,31

Максимальная величина поперечных напряжений бокового обжатия в бетоне для элементов с размерами 150×150×600 мм с коэффициентом косвенного армирования $\mu_{xy} = 1,31\%$ и $\mu_{xy} = 2,18\%$ составили –1,1 и –4,2 МПа, соответственно. А для образцов размерами 250×250×650 мм с коэффициентом косвенного армирования $\mu_{xy} = 3,0\%$ и $\mu_{xy} = 5,0\%$ составили –3,91 и –8,59 МПа, соответственно.

Заключение

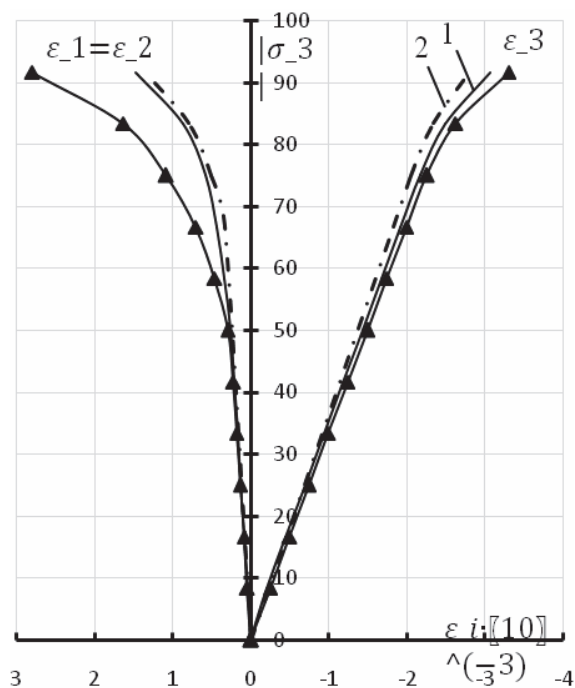
Результаты выполненных численных исследований коротких сжатых элементов с косвенным армированием свидетельствуют о том, что учет дилатационных эффектов в поперечных направлениях элемента приводит к существенному уточнению напряжений бокового обжатия бетона и напряжений в сетках косвенного армирования, что, в свою очередь, привело к уточнению (повышению на величину до 32 %) оценки прочности бетона в стесненных условиях. В то же время использование в расчетах уточненных

выражений, представленных в работе [8], позволило получить хорошую сходимость результатов вычислений с данными экспериментальных исследований [6].

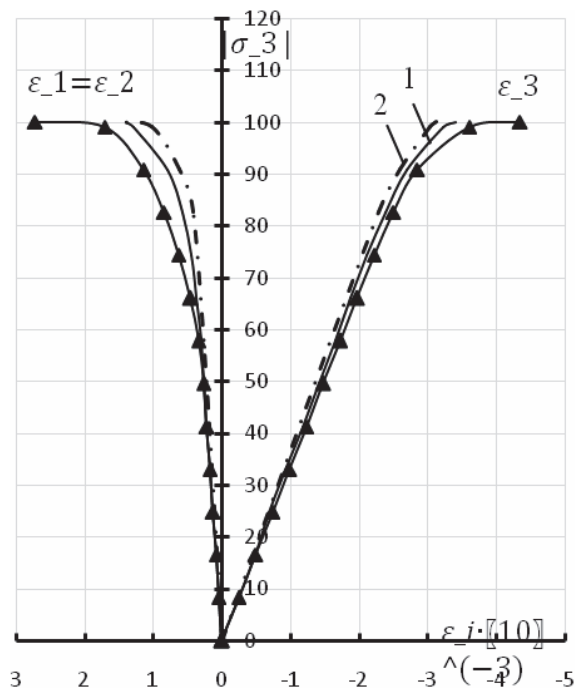
В целом учет физической нелинейности деформирования материалов позволяет с достаточной степенью точности оценивать деформации и несущую способность элементов образцов-призм с косвенным армированием. Результаты выполненных расчетов с использованием ПК «Лири САПР» и ANSYS Workbench 14.5 хорошо согласуются с данными экспериментальных исследований, результатами инженерных расчетов [20] и свидетельствуют, что наличие косвенного армирования может приводить к повышению несущей способности одноосно нагруженных образцов-призм в 1,33÷1,48 раза.

Сдерживание поперечных деформаций бетона за счет сеток поперечного косвенного армирования приводит в условиях одноосного нагружения к возникновению в бетоне одноосно нагруженных образцов-призм объемного

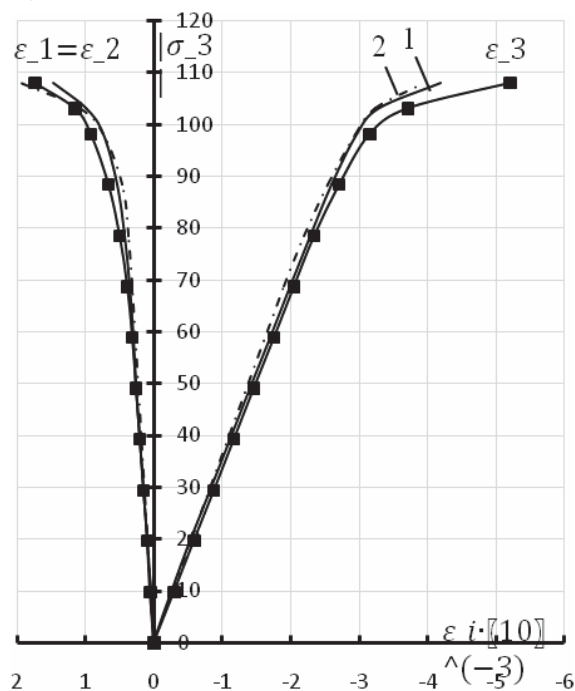
а)



б)



в)



г)

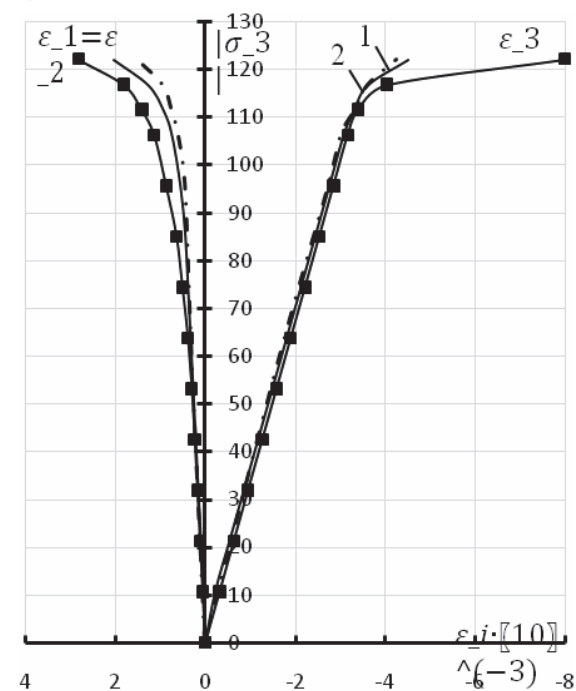


Рисунок 4. Изменение компонент линейных деформаций железобетонных образцов-призм размерами 150×150×600 мм (а, б) и 250×250×650 мм (в, г) с коэффициентом косвенного армирования $\mu_{xy} = 1,3 \%$ (а), $\mu_{xy} = 2,2 \%$ (б), $\mu_{xy} = 3,0 \%$ (в), $\mu_{xy} = 5,0 \%$ (г) в условиях одноосного сжатия.

Теоретические кривые по законам нелинейного деформирования:

1 ———— — ANSYS Workbench *

2 — — — — — закон №14 ПК «Лира САПР»

* — см. примечания к рисунку 3.

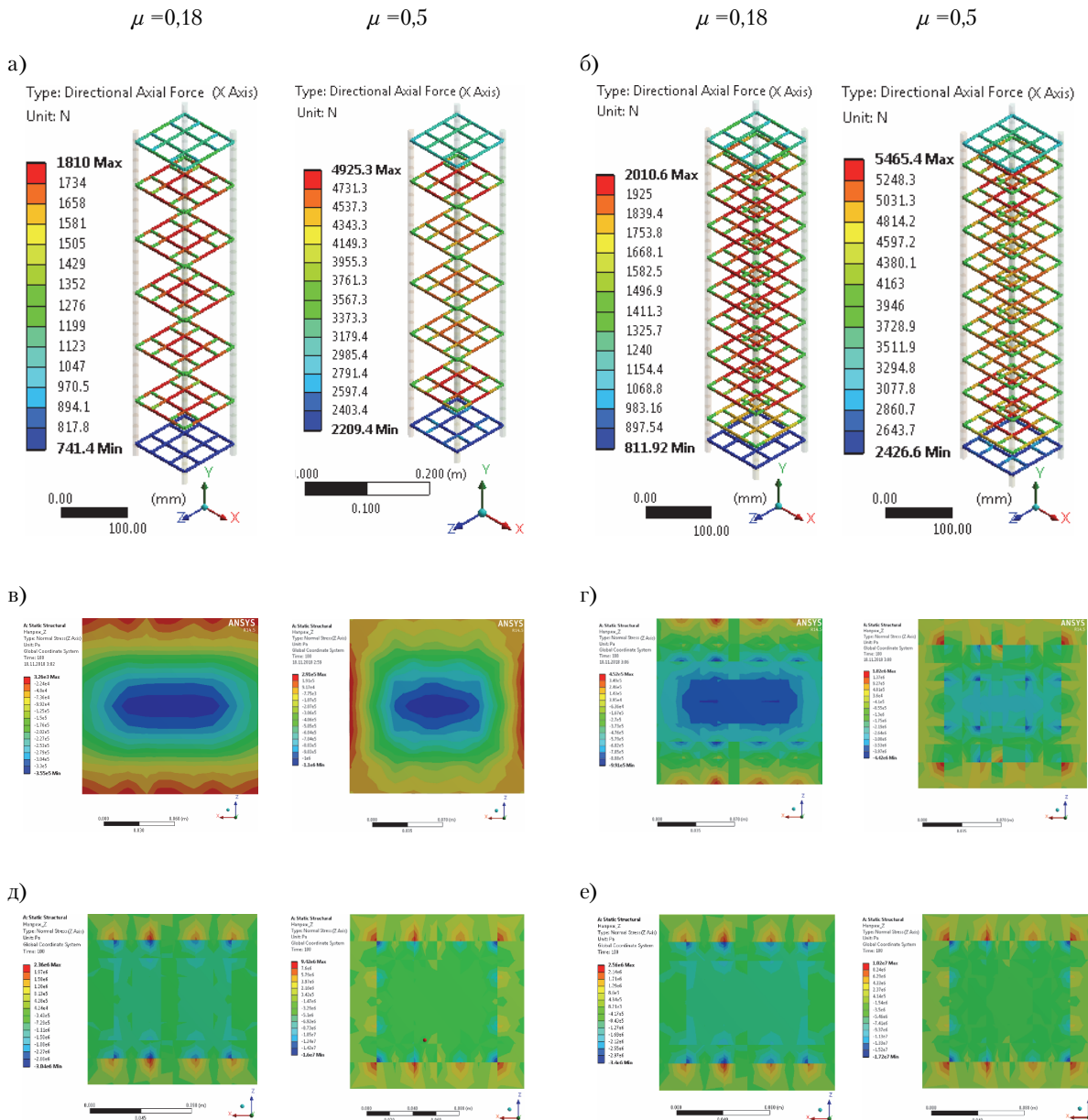


Рисунок 5. Численные исследования НДС железобетонных образцов-призм 150×150×600 мм с коэффициентом косвенного армирования $\mu_{xy} = 1,3 \%$ (а, в), $\mu_{xy} = 2,2 \%$ (б, г); а, б – изополя усилий в арматурных стержнях сеток косвенного армирования для $\mu_{xy} = 1,3 \%$ (а) и $\mu_{xy} = 2,2 \%$ (б) при коэффициенте поперечных деформаций $\mu = 0,18$ и $0,5$; в, г – изополя напряжений по площади поперечного сечения между сетками косвенного армирования для $\mu_{xy} = 1,3 \%$ (в) и $\mu_{xy} = 2,2 \%$ (г) при $\mu = 0,18$ и $0,5$; д, е – изополя напряжений по площади поперечного сечения в уровнях сеток косвенного армирования для $\mu_{xy} = 1,3 \%$ (д) и $\mu_{xy} = 2,2 \%$ (е) при $\mu = 0,18$ и $0,5$.

напряженного состояния – трехосного сжатия с соотношением напряжений $\sigma_1:\sigma_2:\sigma_3 = -0,07:-0,07:-1$ при проценте косвенного армирования 5%. Снижение интенсивности косвенного армирования до 1,31% изменяет пропорции трехосного сжатия до $\sigma_1:\sigma_2:\sigma_3 = -0,03:-0,03:-1$. Результаты моделирования объемного напряженного

состояния средствами ПК «Лира САПР» в сочетании с соотношениями в работе [8] достаточно хорошо соответствуют результатам экспериментальных исследований.

Механические свойства железобетонных элементов с косвенным армированием можно изучать численным анализом их компьютерных моделей.

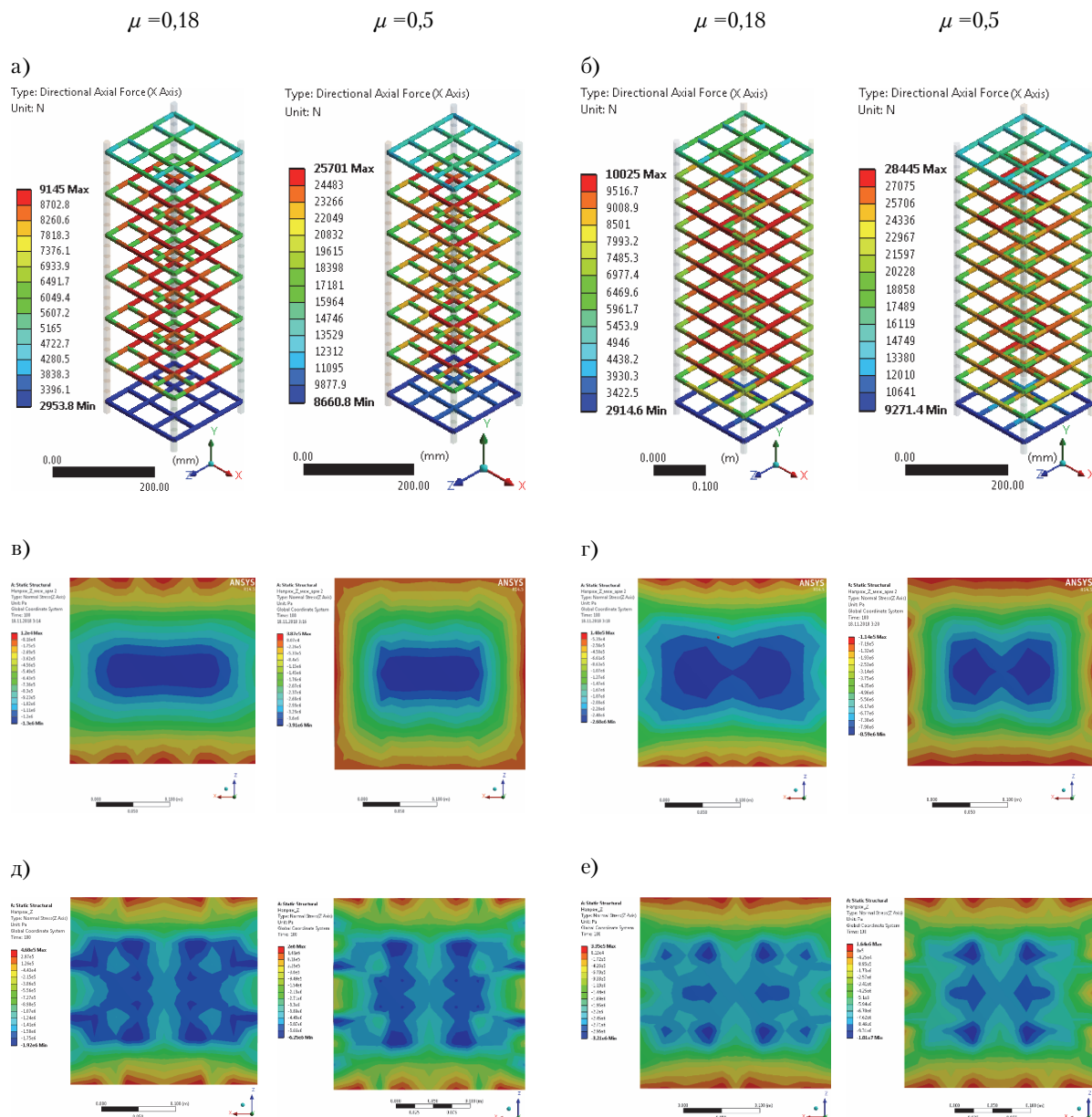


Рисунок 6. Численные исследования НДС железобетонных образцов-призм $250 \times 250 \times 650$ мм с коэффициентом косвенного армирования $\mu_{xy} = 3,0\%$ (а, в), $\mu_{xy} = 5,0\%$ (б, г); а, б – изополя усилий в арматурных стержнях сеток косвенного армирования для $\mu_{xy} = 1,3\%$ (а) и $\mu_{xy} = 2,2\%$ (б) при коэффициенте поперечных деформаций $\mu = 0,18$ и $0,5$; в, г – изополя напряжений по площади поперечного сечения между сетками косвенного армирования для $\mu_{xy} = 3,0\%$ (в) и $\mu_{xy} = 5,0\%$ (г) при $\mu = 0,18$ и $0,5$; д, е – изополя напряжений по площади поперечного сечения в уровнях сеток косвенного армирования для $\mu_{xy} = 3,0\%$ (д) и $\mu_{xy} = 5,0\%$ (е) при $\mu = 0,18$ и $0,5$.

Литература

1. Внецентренно сжатые колонны под тяжелые нагрузки / В. Н. Байков, А. К. Фролов, Л. В. Ким,

Reference

1. Baykov, V. N.; Frolov, A. K.; Kim, L. V.; Matkov, N. G. Off-center columns for heavy loads. – Text : direct. –

- Н. Г. Матков. – Текст : непосредственный // Бетон и железобетон. – 1989. – № 5. – С. 25–26.
2. Ванус, Д. С. Оценка эффективности применения поперечной сетчатой арматуры в центрально-сжатых железобетонных элементах / Д. С. Ванус. – Текст : непосредственный // Перспективы науки. – 2020. – № 3. – С. 122–126.
3. Васильев, А. П. Прочность и деформативность сжатых элементов с косвенным армированием / А. П. Васильев, Н. Г. Матков, Б. П. Филиппов. – Текст : непосредственный // Бетон и железобетон. – 1973. – № 4. – С. 17–19.
4. Власов, Г. М. Учет косвенного армирования в расчетах железобетонных элементов / Г. М. Власов, В. М. Козлов. – Текст : непосредственный // Бетон и железобетон. – 1988. – № 4. – С. 31–33.
5. Гвоздев, А. А. О полной диаграмме сжатия бетона, армированного поперечными сетками / А. А. Гвоздев, А. В. Шубик, Н. Г. Матков. – Текст : непосредственный // Бетон и железобетон. – 1988. – № 4. – С. 37–39.
6. Корсун, А. В. Прочность и деформации элементов из высокопрочного модифицированного бетона с косвенным армированием / А. В. Корсун. – Текст : непосредственный // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2010. – № 662: Теорія і практика будівництва. – С. 284–287.
7. Корсун, В. И. Сопоставительный анализ критериев прочности для бетонов / В. И. Корсун, А. В. Недорезов, С. Ю. Макаренко. – Текст : непосредственный // Сучасне промислове та цивільне будівництво. – 2014. – Т. 10, № 1. – С. 65–78.
8. Корсун, В. И. Вариант описания закономерностей упруго-пластического и псевдопластического деформирования бетона в условиях объемного напряженного состояния / В. И. Корсун, А. В. Недорезов. – Текст : непосредственный // Сучасне промислове та цивільне будівництво. – 2014. – Т. 10, № 2. – С. 96–124.
9. Клованич, С. Ф. Численный эксперимент по исследованию деформационных теорий пластичности бетона / С. Ф. Клованич, Д. И. Безушко. – Текст : непосредственный // Вестник ОГАСА. – 2006. – Выпуск 22. – С. 122–130.
10. Манаенков, И. К. К совершенствованию диаграммы сжатого бетона с косвенным армированием / И. К. Манаенков. – Текст : непосредственный // Строительство и реконструкция. – 2018. – № 2(76). – С. 41–50.
11. Мухамедиев, Т. А. Прочность и деформации стержневых элементов с косвенным армированием / Т. А. Мухамедиев. – Текст : непосредственный // Бетон и железобетон. – 1989. – № 12. – С. 26–27.
12. Попов, Н. Н. Внецентренно сжатые элементы с продольной высокопрочной арматурой при статическом и динамическом нагружении / Н. Н. Попов, Н. Г. Матков, А. А. Гончаров. – Текст : непосредственный // Бетон и железобетон. – 1990. – № 10. – С. 32–34.
- In: *Concrete and reinforced concrete*. – 1989. – № 5. – P. 25–26. (in Russian)
2. Vanus, D. S. Evaluation of the effectiveness of the use of transverse mesh reinforcement in centrally compressed reinforced concrete elements. – Text : direct. – In: *Science perspective*. – 2020. – № 3. – P. 122–126. (in Russian)
3. Vasilyev, A. P.; Matkov, N. G.; Filippov, B. P. Strength and deformability of compressed members with indirect reinforcement. – Text : direct. – In: *Concrete and reinforced*. – 1973. – № 4. – P. 17–19. (in Russian)
4. Vlasov, G. M.; Kozlov, V. M. Consideration of indirect reinforcement in the calculation of reinforced concrete elements. – Text : direct. – In: *Concrete and reinforced*. – 1988. – № 4. – P. 31–33. (in Russian)
5. Gvozdev, A. A.; Shubik, A. V.; Matkov, N. G. About the complete compression diagram of concrete reinforced with cross meshes. – Text : direct. – In: *Concrete and reinforced*. – 1988. – № 4. – P. 37–39. (in Russian)
6. Korsun, A. V. Strength and deformation of elements made of high-strength modified concrete with indirect reinforcement. – Text : direct. – In: *Bulletin of the National University «Lviv Polytechnic»*. – 2010. – № 662: Construction theory and practice. – P. 284–287. (in Russian)
7. Korsun, V. I.; Nedorezov, A. V.; Makarenko, S. Yu. Comparative analysis of strength criteria for concrete. – Text : direct. – In: *Modern industrial and civil construction*. – 2014. – Vol. 10, № 1. – P. 65–78. (in Russian)
8. Korsun, V. I.; Nedorezov, A. V. A variant of describing the laws of elastic-plastic and pseudoplastic deformation of concrete under conditions of volumetric stress state. – Text : direct. – In: *Modern industrial and civil construction*. – 2014. – Vol. 10, № 2. – P. 96–124. (in Russian)
9. Klovaniich, S. F.; Bezushko, D. I. Numerical experiment for the study of deformation theories of plasticity of concrete. – Text : direct. – In: *Bulletin of the OSACEA*. – 2006. – Issue 22. – P. 122–130. (in Russian)
10. Manayenkov, I. K. To improve the diagram of compressed concrete with indirect reinforcement. – Text : direct. – In: *Construction and reconstruction*. – 2018. – № 2(76). – P. 41–50. (in Russian)
11. Mukhamediyev, T. A. Strength and deformation of bar elements with indirect reinforcement. – Text : direct. – In: *Concrete and reinforced*. – 1989. – № 12. – P. 26–27. (in Russian)
12. Popov, N. N.; Matkov, N. G.; Goncharov, A. A. Off-center compression elements with longitudinal high-strength reinforcement under static and dynamic loading. – Text : direct. – In: *Concrete and reinforced*. – 1990. – № 10. – P. 32–34. (in Russian)
13. Popov, N. N.; Trekin, N. N.; Matkov, N. G. Influence of indirect reinforcement on concrete deformability. – Text : direct. – In: *Concrete and reinforced*. – 1986. – № 11. – P. 33–34. (in Russian)

13. Попов, Н. Н. Влияние косвенного армирования на деформативность бетона / Н. Н. Попов, Н. Н. Трекин, Н. Г. Матков. – Текст : непосредственный // Бетон и железобетон. – 1986. – № 11. – С. 33–34.
14. Тамразян, А. Г. К расчету изгибаемых железобетонных элементов с косвенным армированием сжатой зоны / А. Г. Тамразян, И. К. Манаенков. – Текст : непосредственный // Промышленное и гражданское строительство. – 2016. – № 7. – С. 41–44.
15. Федорова, Н. В. Экспериментальные исследования живучести железобетонных рам с ригелями, усиленными косвенным армированием / Н. В. Федорова, Д. К. Фан, Т. Ч. Нгуен. – Текст : непосредственный // Строительство и реконструкция. – 2020. – № 1. – С. 92–100.
16. Attard, M. A. Stress-strain model for uniaxial and confined concrete under compression / M. A. Attard, A. K. Samani. – Текст : непосредственный // EngStruct. – 2012. – № 41. – P. 335–349.
17. Han, L. H. Performance of concrete – encased. CFST stub columns under axial compression / L. H. Han, Y. H. An. – Текст : непосредственный // Journal of Constructional Steel Research. – 2014. – Vol. 93. – P. 62.
18. Willam, K. J. Constitutive model for the triaxial behavior of concrete / K. J. Willam, E. P. Warnke. – Текст : непосредственный // Int. Assoc. Bridge. Struct. Eng. – 1974. – Vol. 19. – P. 1–31.
19. СНиП 2.03.01-84*. Бетонные и железобетонные конструкции : издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Госстроя СССР от 20 августа 1984 г. N 136 : введен впервые : дата введения 1986-01-01 / Подготовлен Управлением стандартизации и технических норм в строительстве Госстроя СССР. – Москва : ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 80 с. – Текст : непосредственный.
20. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. СНиП 52-01-2003 = Concrete and reinforced concrete structures. General provisions : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 19 декабря 2018 г. № 832/пр : введен впервые : дата введения 2019-06-20 / подготовлен Департаментом градостроительной деятельности и архитектуры Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (Минстрой России). – Москва : Стандартинформ, 2019. – 143 с. – Текст : непосредственный.
14. Tamrazyan, A. G.; Manayenkov, I. K. Design of flexible reinforced concrete elements with indirect reinforcement of the compressed zone. – Text : direct. – In: *Industrial and civil construction*. – 2016. – № 7. – P. 41–44. (in Russian)
15. Fedorova, N. V.; Fan, D. K.; Nguyen, T. Ch. Experimental studies of the survivability of reinforced concrete frames with crossbars reinforced with indirect reinforcement. – Text : direct. – In: *Construction and reconstruction*. – 2020. – № 1. – P. 92–100. (in Russian)
16. Attard, M. A.; Samani, A. K. Stress-strain model for uniaxial and confined concrete under compression. – Text : direct. – In: *EngStruct*. – 2012. – № 41. – P. 335–349. (in English)
17. Han, L. H.; An, Y. H. Performance of concrete – encased. CFST stub columns under axial compression. – Text : direct. – In: *Journal of Constructional Steel Research*. – 2014. – Vol. 93. – P. 62. (in English)
18. Willam, K. J.; Warnke, E. P. Constitutive model for the triaxial behavior of concrete. – Text : direct. – In: *Int. Assoc. Bridge. Struct. Eng.* – 1974. – Vol. 19. – P. 1–31. (in English)
19. СНиП 2.03.01-84*. Concrete and reinforced concrete structures. – Moscow : CISD State Committee of Construction USSR, 1989. – 80 p. – Text : direct. (in Russian)
20. SP 63.13330.2018. Concrete and reinforced concrete structures. General provisions. – Moscow : Standardinform, 2019. – 143 p. – Text : direct. (in Russian)

Недорезов Андрей Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры железобетонных конструкций ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: экспериментальные исследования процессов деформирования и разрушения бетона при сложных напряженных состояниях.

Недорезов Андрій Володимирович – кандидат технічних наук, доцент кафедри залізобетонних конструкцій ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: експериментальні дослідження процесів деформування і руйнування бетону в умовах складних напружених станів.

Niedoriezov Andrii – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Reinforced Concrete Constructions Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientifics interests: experimental studies of concrete deformation and fracture under complex stress states.