

И.Б. КОРНЕЕВА, Н.Г. СУРЬЯНИНОВ, А.С. ШИЛЯЕВ  
Одесская государственная академия строительства и архитектуры

## КОМПЬЮТЕРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПЛИТЫ ПЕРЕКРЫТИЯ ИЗ СТАЛЕФИБРОБЕТОНА

*Предложена конструкция плиты перекрытия с пятью пустотами, выполненная с комбинированным армированием стержневой арматурой и стальной фиброй. Выполнен сравнительный анализ напряженно-деформированного состояния плиты предлагаемой конструкции и серийной пустотной железобетонной плиты с шестью пустотами. Моделирование плит и расчеты проведены в двух программных комплексах — ANSYS и SCAD — для двух вариантов закрепления — свободное опирание по двум коротким сторонам и жесткое закрепление по всему контуру. Результаты расчетов показали, что напряженно-деформированное состояние обеих плит характеризуется близкими значениями прогибов и напряжений с несколько меньшими их величинами у плиты предложенной конструкции.*

*Ключевые слова:* плита перекрытия, фибробетон, бетон, напряжение, прогиб, ANSYS, SCAD.

I.B. KORNEEVA, N.G. SURYANINOV, O.S. SHYLIAIEV  
Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture

### PROGRAM IMPLEMENTATION OF OPTIMIZATION CALCULATION OF PLANE FARMS

*The construction of the slab with five voids, made with combined reinforcement by bar reinforcement and steel fiber is proposed. Experimental studies of fiber-reinforced concrete samples have been carried out to determine the optimal composition of the fiber-reinforced concrete mixture from which the plate will be made and the elastic characteristics of the material necessary for computer simulation and subsequent calculations. The required percentage of fiber reinforcement and the size of the coarse aggregate fraction have been established. A comparative analysis of the stress-strain state of the plate of the proposed design and a series of hollow reinforced concrete slabs with six voids is performed. Simulation of plates and calculations were carried out in two software complexes — ANSYS and SCAD. For each plate, two variants of the boundary conditions are considered: free support on two short sides of the plate and rigid fastening of these sides; while the long sides of the plate do not have connections. The results of calculations showed that the stress-strain state of both plates is characterized by close values of deflections and stresses with slightly smaller values near the plate of the proposed design. Analysis of the results allows us to conclude that, with respect to the constructions under consideration, finite-element calculations in two software complexes (ANSYS and SCAD) lead to almost identical results: the maximum error was 4,2 %. In all cases, the stresses and deflections defined in ANSYS are less than in SCAD. This, apparently, can be explained by different approaches to modeling, different types of finite elements, and computational algorithms embedded in these programs. Comparison of stresses and deflections at the equally located points of the steel-fiber-concrete and reinforced concrete slab shows that in the first of these the indicated values are smaller, although insignificantly, than in the second. So, with the free support of the plate on two short sides, the maximum stresses in the steel-fiber-concrete plate are 1,02 times less, and the deflections are 1,18 times.*

*Key words:* slab, fiber concrete, concrete, tension, deflection, ANSYS, SCAD.

**Введение.** В последние годы все большее применение в строительной отрасли находят фибробетоны, представляющие собой бетонную смесь, дисперсно армированную фиброй, которая отличается разной геометрией и видом материала, из которого изготовлена. Каждый вид фибры обладает своими преимуществами и недостатками, определяющими наиболее предпочтительную область ее применения. Введение в бетон стальной фибры обеспечивает значительное повышение его механических и прочностных характеристик — увеличивается прочность при сжатии и прочность на растяжение при изгибе, сопротивление температурному воздействию и истиранию, повышается морозостойкость и трещиностойкость и др. Многочисленные исследования показывают, что в несущих конструкциях эффективным является применение стальной фибры [1 – 3]. Однако объем таких исследований явно недостаточен, что сдерживает практическое использование сталефибробетонных конструкций. Кроме того, введение стальной фибры в бетонную смесь приводит к необходимости изменения некоторых привычных конструктивных форм, которые традиционно используются при изготовлении обычных железобетонных конструкций. Это в полной мере относится к пустотным плитам перекрытия.

**Постановка проблемы.** На сегодняшний день применение в промышленном и гражданском строительстве железобетонных многопустотных плит перекрытия [4, 5] носит массовый характер. Такие плиты существенно легче полнотелых, и имеют целый ряд других преимуществ. Для повышения прочности при производстве пустотных плит их армируют предварительно напряженной стержневой арматурой, а изготавливают из высококачественного тяжелого бетона. Представляется, что улучшения физико-механических, прочностных и деформационных свойств многопустотных плит при одновременном снижении их себестоимости можно добиться за счет применения фибробетона и связанного с этим уменьшения объема стержневой арматуры.

Для обоснования этого утверждения необходимо провести экспериментальные исследования новой конструкции плиты, определить напряжения, деформации, момент начала трещинообразования, разрушающую нагрузку. Чтобы определить места установки тензодатчиков для определения напряжений и индикаторов для определения перемещений, необходимо знать характер распределения этих параметров при действии внешней нагрузки. Поэтому целью данной работы является компьютерное моделирование многопустотной плиты предложенной конструкции с комбинированным армированием стержневой

арматурой и стальной фиброй с последующим исследованием ее напряженно-деформированного состояния при разных граничных условиях.

**Материалы и методы.** Для определения оптимального состава фибробетонной смеси, из которой будет изготовлена плита и упругих характеристик материала, необходимых для компьютерного моделирования и последующих расчетов предварительно были проведены испытания образцов фибробетона. Определялась кубиковая прочность на образцах  $100 \times 100 \times 100$  мм и призмная прочность на образцах  $100 \times 100 \times 400$  мм. При этом варьировался процент дисперсного армирования, который составлял 0,5 %, 1,0 % и 1,5 %, а также размер фракции крупного заполнителя (щебень) — с размером фракции  $\leq 10$  мм в одной серии испытаний и  $\leq 20$  мм — во второй. Одновременно определялась кубиковая и призмная прочность обычного бетона при тех же размерах крупного заполнителя.

Обработка результатов показала, что оптимальными характеристиками сталефибробетонной смеси является матрица с крупным заполнителем  $\leq 10$  мм при 1,0% фибрового армирования.

Во всех проведенных опытах использовался цемент марки 400 и промытый речной песок. Водоцементное отношение — 0,449.

Для дисперсного армирования использовалась фибра с загнутыми концами, изготовленная из высокопрочной проволоки с временным сопротивлением 1335 МПа.

В результате испытаний определены упругие характеристики материала плиты: модуль упругости —  $E = 2 \cdot 10^4$  МПа и коэффициент Пуассона —  $\mu = 0,2$ .

При моделировании плиты в программе ANSYS был использован метод экструзии, который заключается в выдавливании объема плиты из первоначально построенного поперечного сечения вдоль нормали.

Комплекс SCAD такими возможностями для моделирования не обладает, поэтому здесь пустотная плита была приведена к сплошной плите с уменьшением ее исходной толщины.

**Результаты исследований.** Сортамент многопустотных плит весьма обширен. Пустоты выполняются разного очертания, но чаще всего — круглого. При этом промышленностью выпускаются шестипустотные плиты. Однако при использовании фибробетона, армированного стальной фиброй, пространства между пустотами достаточно малы, что не позволяет добиться равномерного распределения фибры по объему и качественного уплотнения бетонной смеси. В этой связи авторами предложена конструкция плиты с пятью пустотами, аналогичная конструкции серийной шестипустотной плиты. В качестве такого аналога выбрана плита ПК30.12-8 серии 1.141-1 (рис. 1).

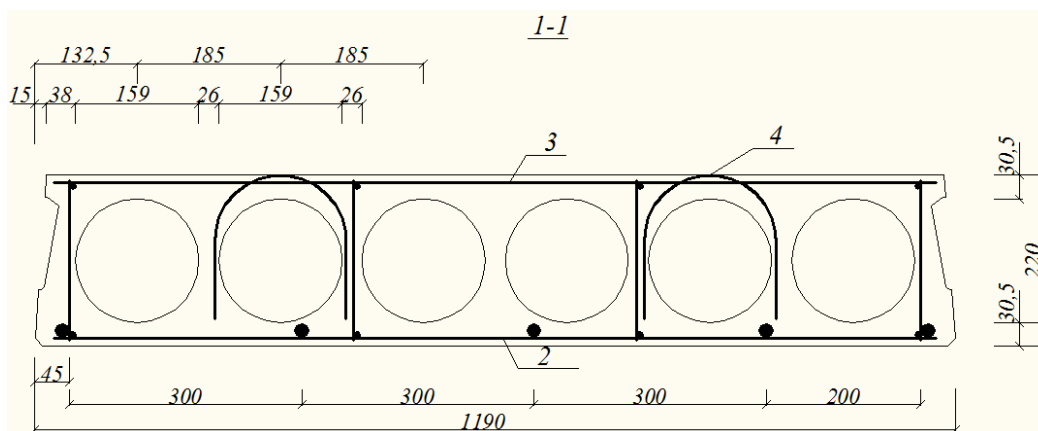


Рис. 1. Серийная плита с шестью пустотами из бетона

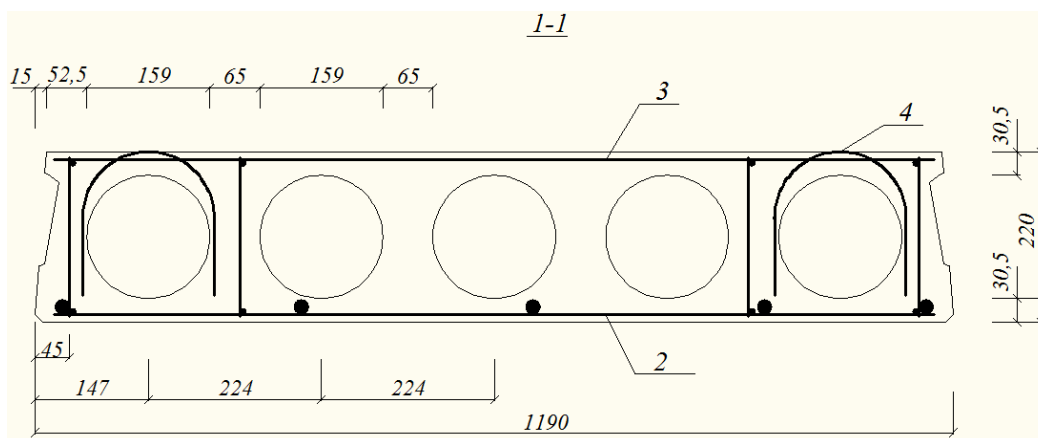


Рис. 2. Плита из фибробетона с пятью пустотами

Проектирование пятипустотной плиты из фибробетона выполнено на основе требований ДСТУ-Н Б

В.2.6-78: 2009 [6] и ДСТУ Б В.2.6-2: 2009 [7]. Сочетание нагрузок на плиту принято в соответствии с ДБН В.1.2-2: 2006 [8].

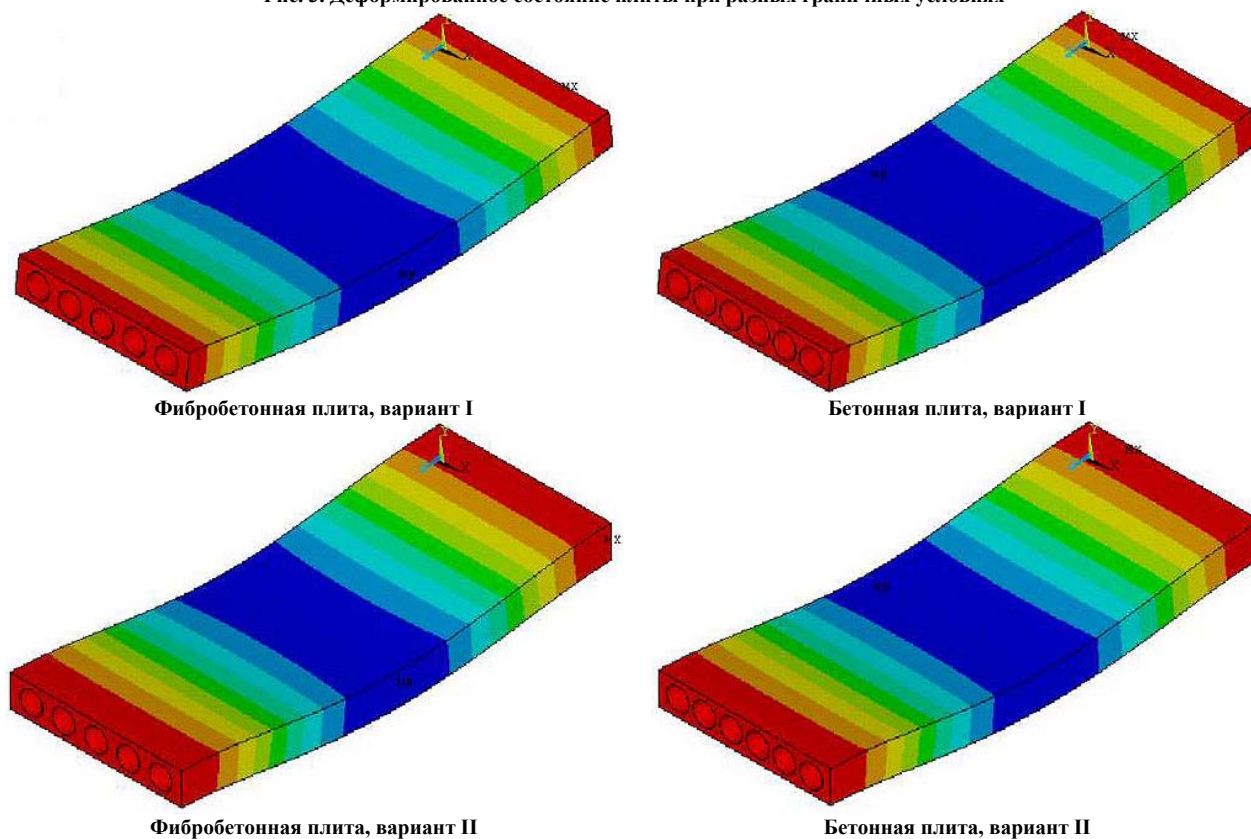
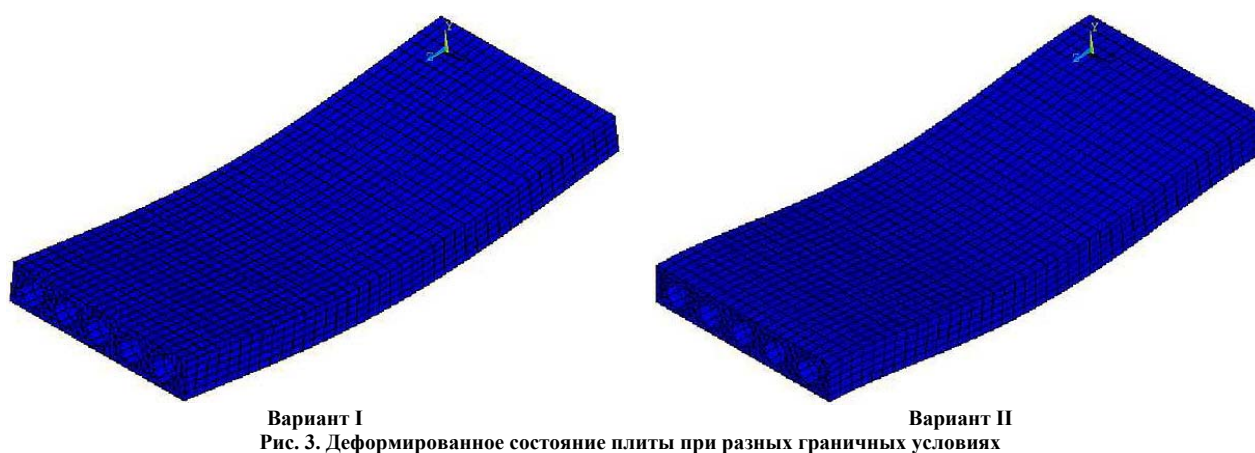
Обе плиты — серийная (рис. 1) и пятипустотная (рис. 2) — подвергнуты компьютерным и экспериментальным исследованиям. Здесь рассмотрим только результаты компьютерных исследований, выполненных в двух программных комплексах — ANSYS [9] и SCAD [10].

При моделировании приняты следующие исходные данные, одинаковые для обеих плит: длина —  $l = 3\text{ м}$ ; ширина —  $b = 1,19\text{ м}$ ; толщина —  $h = 0,22\text{ м}$ ; упругие характеристики ("размазанные" по объему): модуль упругости —  $E = 2,4 \cdot 10^4 \text{ МПа}$ ; коэффициент Пуассона —  $\mu = 0,2$ .

Нагрузка — равномерно распределенная по всей поверхности плиты, интенсивностью  $q = 10 \text{ кН} / \text{м}^2$ .

Для каждой плиты рассмотрены два варианта граничных условий — свободное опирание по двум коротким сторонам плиты (далее — вариант I) и жесткое закрепление этих сторон (вариант II). При этом длинные стороны плиты связями не имеют.

На рис. 3 представлено деформированное состояние фибробетонной плиты при двух вариантах граничных условий, на рис. 4 — прогибы, а на рис. 5 — эквивалентные напряжения по гипотезе Губера – Мизеса для фибробетонной пятипустотной и бетонной шестипустотной плит при разных граничных условиях.



Визуализация результатов, полученных в результате аналогичных расчетов в комплексе SCAD,

имеет похожий характер, поэтому здесь не приводится.

Контрольные точки для анализа численных значений прогибов и напряжений показаны на рис. 6. Симметрично расположенные точки, в которых прогибы и напряжения теоретически должны быть одинаковыми, выбраны с целью дополнительной верификации полученных результатов.

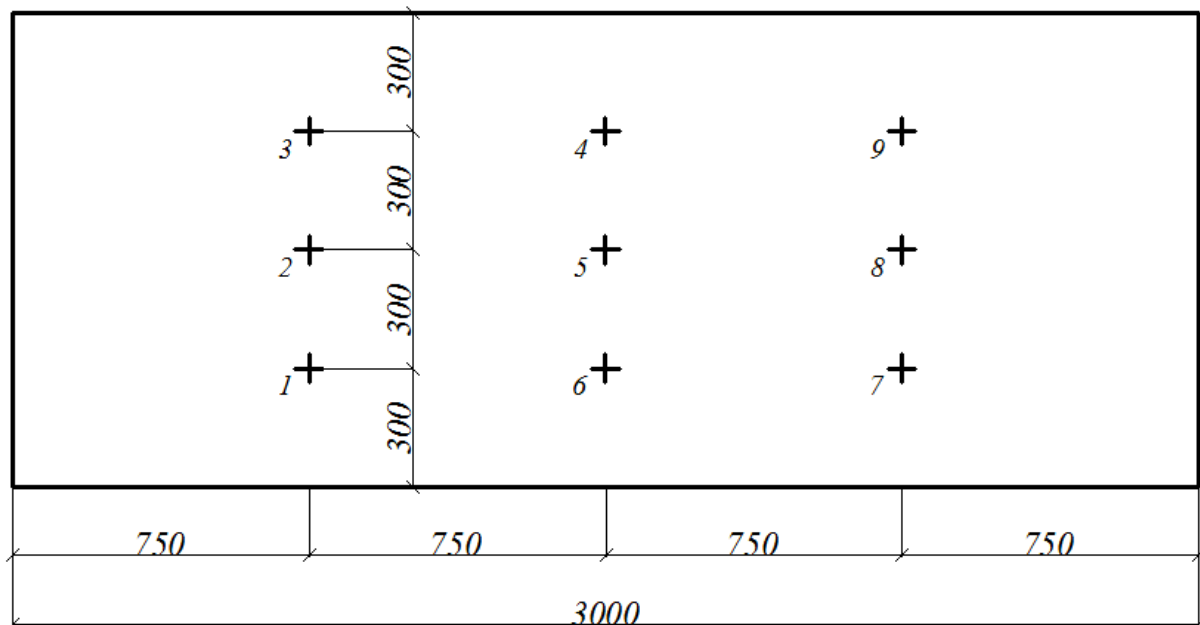
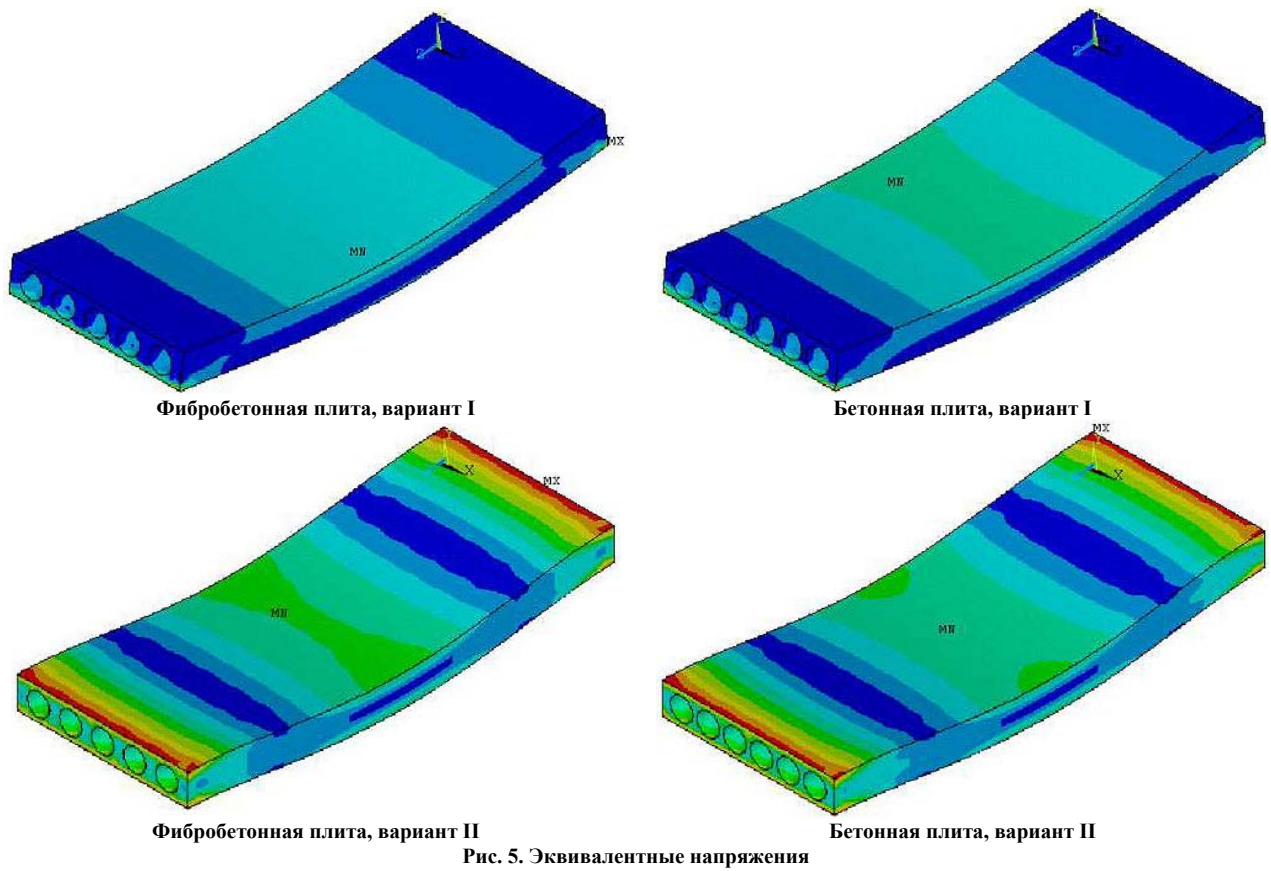


Рис. 6. Контрольные точки

**Обсуждение и сравнение результатов.** Числовые значения прогибов и напряжений в контрольных точках, полученные в двух программных комплексах, приведены в табл. 1 и табл. 2.

Таблица 1

Прогибы и напряжения в пятипустотной плите, вариант I							
Параметр НДС	Пакет	Контрольные точки					
		1; 7	2; 8	3; 9	4	5	6
Прогибы, мм	ANSYS	0,199	0,198	0,199	0,295	0,293	0,295
	SCAD	0,203	0,202	0,203	0,301	0,299	0,301
	Погр., %	1,97	1,48	1,97	1,99	2,01	1,99
Напряжения, кПа	ANSYS	174,47	151,96	173,00	530,87	522,76	532,14
	SCAD	178,49	155,79	178,11	540,44	529,81	541,65
	Погр., %	2,25	2,46	2,87	1,77	1,33	1,76

Таблица 2

Прогибы и напряжения в пятипустотной плите, вариант II							
Параметр НДС	Пакет	Контрольные точки					
		1; 7	2; 8	3; 9	4	5	6
Прогибы, мм	ANSYS	0,0760	0,0758	0,0761	0,131	0,130	0,131
	SCAD	0,0791	0,0788	0,0790	0,135	0,134	0,136
	Погр., %	3,92	3,81	3,67	2,96	2,99	3,67
Напряжения, кПа	ANSYS	134,68	119,69	134,72	490,88	481,68	490,61
	SCAD	139,82	124,77	139,88	512,36	500,06	512,11
	Погр., %	3,68	4,07	3,69	4,19	3,68	4,20

Таблица 3

Прогибы и напряжения в шестипустотной плите, вариант I							
Параметр НДС	Пакет	Контрольные точки					
		1; 7	2; 8	3; 9	4	5	6
Прогибы, мм	ANSYS	0,236	0,235	0,236	0,349	0,347	0,349
	SCAD	0,241	0,239	0,241	0,357	0,354	0,356
	Погр., %	2,07	1,67	2,07	2,24	1,98	1,97
Напряжения, кПа	ANSYS	168,71	155,03	168,98	541,74	532,56	541,61
	SCAD	174,14	159,11	174,85	558,71	549,18	558,69
	Погр., %	3,12	2,56	3,36	3,04	3,03	3,06

Таблица 4

Прогибы и напряжения в шестипустотной плите, вариант II							
Параметр НДС	Пакет	Контрольные точки					
		1; 7	2; 8	3; 9	4	5	6
Прогибы, мм	ANSYS	0,0903	0,0903	0,0903	0,154	0,153	0,153
	SCAD	0,0937	0,0934	0,0935	0,160	0,158	0,159
	Погр., %	3,63	3,32	3,42	3,75	3,16	3,77
Напряжения, кПа	ANSYS	131,53	130,51	131,65	504,54	497,98	504,43
	SCAD	135,88	135,11	135,89	520,23	515,77	520,21
	Погр., %	3,20	3,40	3,12	3,02	3,45	3,03

**Выводы.** Анализ результатов, приведенных в табл. 1–4, позволяет сделать вывод о том, что применительно к рассматриваемым конструкциям конечно-элементные расчеты в двух программных комплексах (ANSYS и SCAD) приводят к практически одинаковым результатам: максимальная погрешность составила 4,2 %. При этом во всех случаях напряжения и прогибы, определенные в ANSYS, меньше, чем в SCAD. Это, по-видимому, можно объяснить разными подходами к моделированию, разными типами конечных элементов и заложенными в этих программах вычислительными алгоритмами.

Сравнение напряжений и прогибов в одинаково расположенных точках сталефибробетонной и железобетонной плиты показывает, что в первой из них указанные величины меньше, хотя и незначительно, чем во второй. Так, при свободном опирании плиты по двум коротким сторонам максимальные напряжения в сталефибробетонной плите меньше в 1,02 раза, а прогибы — в 1,18 раз.

Окончательная верификация результатов, полученных путем компьютерного моделирования и расчетов, будет выполнена путем экспериментальных исследований фибробетонной плиты предложенной конструкции.

#### Литература

1. Рабинович, Ф. Н. Композиты на основе дисперсно-армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции : монография / Ф. Н. Рабинович. – М. : Изд-во АСВ, 2004. – 560 с.

2. Талантова К.В. Сталефібробетон с заданными свойствами и строительные конструкции на его основе : дисс. ... д-ра. техн. наук / К.В. Талантова. – Барнаул, 2013. – 287 с.
3. Смирнов Д.А. Упругость и ползучесть сталефібробетона : автореф. дисс. ... канд. техн. наук / Д. А. Смирнов. – СПб, 2011. – 20 с.
4. ДБН В.2.6-98:2009. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. – К. : Мінрегіонбуд України, 2011. – 73 с.
5. ДСТУ Б В.2.6-53:2008. Плити перекриттів залізобетонні багатопустотні для будівель і споруд. Технічні умови. – К. : Мінрегіонбуд України, 2008. – 39 с.
6. ДСТУ-Н Б В.2.6-78:2009. Конструкції будинків і споруд. Настанова з проектування та виготовлення сталефібробетонних конструкцій. – К. : Мінрегіонбуд України, 2009. – 46 с.
7. ДСТУ Б В.2.6-2:2009. Конструкції будинків і споруд. Вироби бетонні і залізобетонні. Загальні технічні умови. – К. : Мінрегіонбуд України, 2010. – 29 с.
8. ДБН В.1.2-2:2006. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування. – К. : Мінбуд України, 2006. – 77 с.
9. Дашченко А.Ф. ANSYS в задачах инженерной механики / А.Ф. Дашченко, Д.В. Лазарева, Н.Г. Сурьянинов / под ред. Н. Г. Сурьянинова. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Одесса : Пальмира, 2011. — 505 с.
10. Вычислительный комплекс SCAD / [Карпиловский В.С., Криксунов Э.З., Маляренко А.А., Перельмутер А.В., Перельмутер М.А.]. – М. : Издательство АСВ, 2004. — 592 с.

#### References

1. Rabinovich, F. N. Kompozityi na osnove dispersno-armirovannyih betonov. Voprosyi teorii i proektirovaniya, tehnologiya, konstruksii: monografiya / F. N. Rabinovich. – M.: Izd-vo ASV, 2004. – 560 s.
2. Talantova K.V. Stalefibrobeton s zadannyimi svoystvami i stroitelnyie konstruksii na ego osnove: diss. ... d-ra. tehn. nauk / K.V. Talantova. – Barnaul, 2013. – 287 s.
3. Smirnov D.A. Uprugost i polzuchest stalefibrobetona: avtoref. diss. ... kand. tehn. nauk / D. A. Smirnov. – SPb., 2011. – 20 s.
4. DBN V.2.6-98:2009. Betonni ta zallzobetonni konstruksiyi. Osnovni polozhennya. – K.: Minregionbud Ukraini, 2011. – 73 s.
5. DSTU B V.2.6-53:2008. Pliti perekryttiv zallzobetonni bagatopustotni dlya budivel i sporud. Tehnichni umovi. – K.: Minregionbud Ukraini, 2008. – 39 s.
6. DSTU-N B V.2.6-78:2009. Konstruksiyi budinkiv i sporud. Nastanova z proektuvannya ta vigotovlennya stalefibrobetonnih konstruksiy. – K.: Minregionbud Ukraini, 2009. – 46 s.
7. DSTU B V.2.6-2:2009. Konstruksiyi budinkiv i sporud. Virobi betonni i zallzobetonni. Zagalni tehnicni umovi. – K.: Minregionbud Ukraini, 2010. – 29 s.
8. DBN V.1.2-2:2006. Sistema zabezpechennya nadlynostl ta bezpeki budivelnih ob'ektiv. Navantazhennya i vplivi. Normi proektuvannya. – K.: Minbud Ukraini, 2006. – 77 s.
9. Daschenko A.F. ANSYS v zadachah inzhenernoy mehaniki / A.F. Daschenko, D.V. Lazareva, N.G. Suryaninov / Izd. 2-e, pererab. i dop. Pod red. N. G. Suryaninova. – Odessa. – Palmira. 2011. – 505 s.
10. Karpilovskiy V.S., Kriksunov E.Z., Malyarenko A.A., Perelmuter A.V., Perelmuter M.A. Vychislitelnyy kompleks SCAD: – M.: Izdatelstvo ASV. 2004. – 592 s.

Рецензія/Peer review : 05.11.2017 р.      Надрукована/Printed :07.02.2018 р.  
Рецензент: стаття рецензована редакційною колегією

---

За зміст повідомлень редакція відповідальності не несе

**Повні вимоги до оформлення рукопису**  
**<http://vestnik.ho.com.ua/rules/>**

Рекомендовано до друку рішенням вченої ради Хмельницького національного університету,  
протокол протокол № 10 від 30.01.2018 р.

Підп. до друку 05.02.2018 р. Ум.друк.арк. 36,81 Обл.-вид.арк. 39,31  
Формат 30x42/4, папір офсетний. Друк різнографією.  
Наклад 100, зам. № \_\_\_\_\_

---

Тиражування здійснено з оригінал-макету, виготовленого  
редакцією журналу “Вісник Хмельницького національного університету”  
редакційно-видавничим центром Хмельницького національного університету  
29016, м. Хмельницький, вул. Інститутська, 7/1. тел (0382) 72-83-63