

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2019, №2, Том 11 / 2019, No 2, Vol 11 <https://esj.today/issue-2-2019.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/06SAVN219.pdf>

Ссылка для цитирования этой статьи:

Васильев А.С., Назарова В.П. Численное исследование напряженного состояния усиленных пустотных железобетонных плит при появлении трещин // Вестник Евразийской науки, 2019 №2, <https://esj.today/PDF/06SAVN219.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

For citation:

Vasilyev A.S., Nazarova V.P. (2019). Numerical study of the stressed state of reinforced hollow concrete slabs with the appearance of cracks. *The Eurasian Scientific Journal*, [online] 2(11). Available at: <https://esj.today/PDF/06SAVN219.pdf> (in Russian)

УДК 69.04, 69.07

ГРНТИ 67.11.31

Васильев Алексей Сергеевич

ФГБОУ ВО «Приамурский государственный университет им. Шолом-Алейхема», Биробиджан, Россия
Доцент кафедры «Технических дисциплин»
Кандидат технических наук
E-mail: vasil-grunt@mail.ru

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7783-0000>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=896244

SCOPUS: <http://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57203895897>

Назарова Вероника Павловна

ФГБОУ ВО «Приамурский государственный университет им. Шолом-Алейхема», Биробиджан, Россия
Документовед кафедры «Технических дисциплин»
E-mail: student.nika1661@mail.ru

**Численное исследование напряженного
состояния усиленных пустотных железобетонных
плит при появлении трещин**

Аннотация. Как известно, при численных и аналитических расчетах, пустотные плиты представляют в форме тавровых и двутавровых балок. Ширина края балки уменьшается в соответствии с размерами пустот внутри плиты. Общепринятая теория расчета строительных конструкций по предельным усилиям, предполагает расчет таких пустотных плит на основе теории балок. Плита в этом случае представляется в виде балки на двух опорах. В данной работе авторы исследуют напряженное состояние пустотных плит при разрушении. Численные исследования проводились для различных способов усиления. Авторами выполнены расчеты в нелинейной постановке при последовательном увеличении нагрузки до разрушения образцов, на основе общих принципов строительной механики и механики деформируемого твердого тела. Моделирование и анализ конструкций выполнялся в современном расчетном комплексе. Исследователи сравнили напряжения в плитах с естественной формой поперечного сечения с напряжениями в аналогичных плитах, представленных в форме двутавра. Целью исследования было определить влияние формы представления сечения на результаты нормальных напряжений в сечении и моменты появления трещин от изгибающего момента в середине пролета. Представлены результаты нормальных напряжений в бетоне, а также напряжения от продольных усилий в рабочей арматуре, с учетом различных способов усиления пустотных плит. В работе показано, что момент трещинообразования для пустотных плит в естественной

форме наступает позже, чем для плит в форме двутавра. Полученные результаты помогут уточнить раздел теории расчета железобетонных конструкций.

Ключевые слова: численное исследование; усиление; железобетонные конструкции; пустотная плита; напряженно-деформированное состояние; двутавр

Введение

При модернизации и ремонте промышленных объектов часто может возникать необходимость в усилении и восстановлении несущих строительных конструкций. В некоторых случаях даже неповрежденные конструкции в хорошем состоянии может потребовать усиления, если при проектировании не учтено увеличение нагрузок на конструкции, вследствие, например, модернизации или добавления рабочего оборудования. В настоящее время пустотные плиты широко применяются в строительстве. Они имеют небольшой вес, поэтому могут покрывать большие пролеты с минимальной потерей грузоподъемности [1]. Также такие плиты часто используются при строительстве мостов [2].

Существует несколько основных причин для усиления пустотных плит. Это прежде всего увеличение нагрузок на несущие элементы в результате замены; усиление вышерасположенных конструкций (перестройка помещений, надстройка зданий); модернизация технологического оборудования в реконструируемом здании; изменение технологических процессов.

Следует отметить, что пустотные плиты при расчетах часто представляются приближенно, по балочной теории, как тавровые или двутавровые балки. Такой способ, с одной стороны, это может сократить расчетное время; с другой стороны, влияет на точность результатов расчетов [3].

Следует отметить, что авторами проведено численное исследование напряженного состояния пустотных плит в расчетном комплексе ANSYS. Исследование моделей железобетона для численных исследований на основе метода конечных элементов предложены в работах Карпенко Н.И. [4; 5], Клованича С.Ф. [6; 7]. Также расчетами железобетонных конструкций, в том числе пустотных плит, занималось множество зарубежных авторов.

Например, M.F. Javed и другие ученые [8] исследовали в своих работах эффективность стальных труб, заполненных бетоном, с учетом их геометрических особенностей. исследовали влияние геометрической формы пустот на массу и несущую способность пустотных плит средствами программного комплекса ANSYS. Многие авторы, такие как Yuanli Wu [9], G.M. Chen [10], M.L. Bennegadi [11], исследовали методы усиления пустотных плит композиционными материалами. Напряженно-деформированное состояние плит с предварительно напряженной арматурой было исследовано P. Kankeri [12], Al-Negheimish and A.I., El-Sayed [13], V. Albero [14].

Цель исследования – определить целесообразность представление пустотных плит в естественной форме, а также величину отклонения расчетов плит в форме двутавра. Это позволит уточнить результаты балочных расчетов пустотных плит, и разработать коэффициенты, уточняющие полученные результаты. При этом в данной работе представлены исследования напряженного состояния пустотных плит с различными типами усиления.

1. Методы исследования

В данной работе рассматривалось несколько вариантов усиления пустотных плит. Всего имеется 4 образца: плита без усиления; плита, усиленная наращиванием дополнительного

сечения (50 мм); плита, усиленная дополнительной арматурой (2 стержня по 10 мм диаметром); плита, усиленная комбинированным способом (дополнительное сечение 50 мм и 2 стержня по 10 мм диаметром).

Геометрические характеристики поперечных сечений плиты без усиления, и плиты, усиленной комбинированным способом, представлены на рисунке 1.

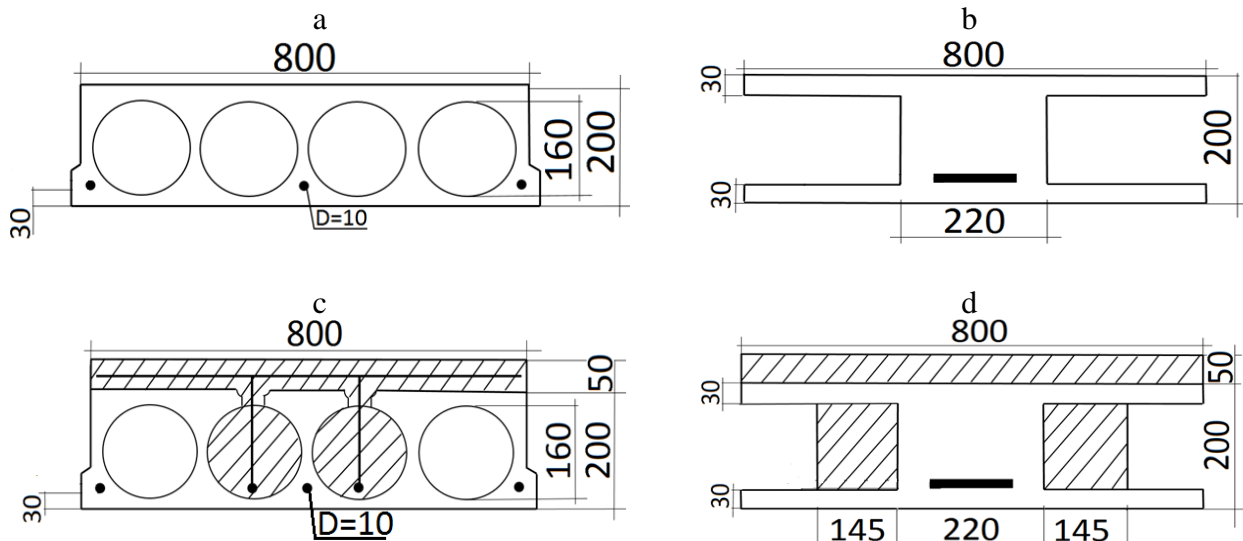


Рисунок 1. Поперечные сечения пустотных плит: *a* – без усиления в естественной форме, *b* – без усиления в форме двутавра, *c* – усиленная комбинированным способом в естественной форме, *d* – усиленная комбинированным способом в форме двутавра (составлено авторами)

На рисунке 2 представлена типовая расчетная схема плиты.

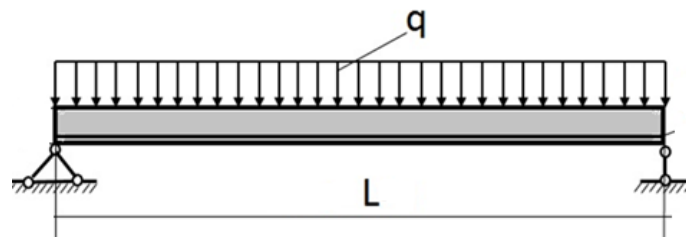


Рисунок 2. Типовая расчетная схема плиты (составлено авторами)

Технологические особенности усиления плит представлены в работе [15]. Следует отметить, что отсеки с внедренной дополнительной арматурой, замоноличиваются (заливаются бетоном) бетоном на класс выше, чем бетон плиты. Геометрические характеристики плиты в форме двутавра, расчетного сечения, определялись согласно [16].

Современные программные комплексы выполняют расчеты строительных конструкций на основе метода конечных элементов, с использованием современных теорий прочности, на основе общих моделей и методов механики деформируемого твердого тела [6; 7]. В данной работе численные эксперименты выполнялись в программном комплексе ANSYS Workbench 17.2.

Дискретные модели пустотных плит в естественной форме, и в форме двутавра, представлены на рисунке 3. Конечно-элементная сетка использовала конечные элементы (КЭ) в форме гексаэдра с максимальным размером 20 мм. Количество узлов и конечных элементов для пустотных плит в естественной форме, в зависимости от моделирования варианта усиления, варьировалось соответственно, от 109382 узлов и 77576 КЭ для плиты без усиления, до 222606 узлов и 166106 КЭ для плиты, усиленной комбинированным способом. Для плит в форме

двутавра: от 113916 узлов и 86452 КЭ для плит без усиления до 205162 узлов и 154720 КЭ. При этом для естественного сечения плит использовались конечные элементы более сложной формы. Всего было рассчитано 8 моделей (4 образца, каждый представлен в двух вариантах формы представления сечения: двутавровой и естественной): двутавр без усиления (образец 1.1); естественная форма плиты без усиления (а 1.2); двутавр с усилением методом наращивания сечения (образец 2.1); естественная форма плиты с усилением методом наращивания сечения (образец 2.2); двутавр, усиленный методом дополнительного армирования (образец 3.1); естественная форма плиты с усилением методом дополнительного армирования (образец 3.2); двутавр с усилением комбинированным способом (образец 4.1); естественная форма плиты с усилением комбинированным способом (образец 4.2). На рисунке 3 представлено несколько образцов спроектированных пустотных плит в ПК ANSYS.

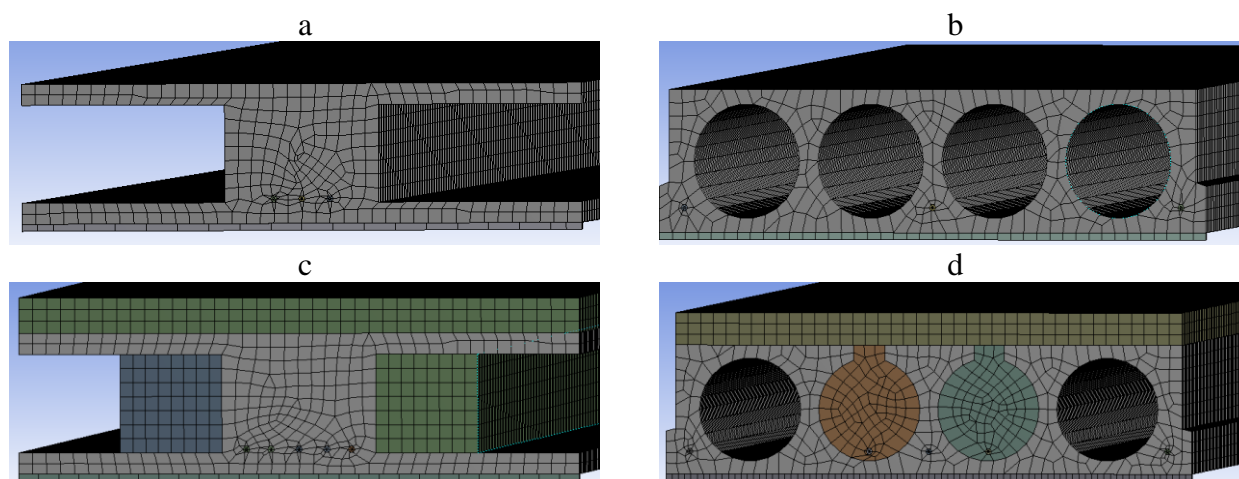


Рисунок 3. Конечно-элементные модели сечений плит: а – двутавр без усиления (образец 1.1); б – естественная форма плиты без усиления (образец 1.2); с – двутавр с усилением комбинированным способом (образец 4.1); естественная форма плиты с усилением комбинированным способом (образец 4.2) (составлено авторами)

В рамках численного эксперимента каждую плиту нагружали последовательно, начиная от нулевой нагрузки, с шагом нагрузки $\Delta F = 1$ кН, до разрушения от изгибающего момента в середине плиты при достижении арматурой в растянутой зоне предела текучести. На каждом шаге фиксировались нормальные напряжения в бетоне и арматуре, а также прогибы.

Для бетона использовался конечный элемент – SOLID 65, реализующий расчетную модель Willam-Warnke [17], применяемую для хрупких, структурно-неоднородных материалов. Данная модель допускает образование трещин по площадке, нормальной к действующим главным напряжениям при превышении ими заданного предела прочности при растяжении, а также учитывает объемное напряженное состояние. Разрушение материала бетона и ослабление жесткости конечных элементов происходило, согласно вышеназванному критерию прочности.

Для исследования взята пустотная плита со следующими характеристиками: номинальные размеры плиты в плане, 0.8x4 м ($L = 4000$ мм, $b = 800$ мм); высота $h = 200$ мм; бетон тяжелый, подвергнутый тепловой обработке, класса В25 ($R_{bt} = 14.5$ МПа, $R_{bt1} = 1.05$ МПа, $E_{bt} = 3 \cdot 10^4$ МПа); рабочая продольная арматура А-400 ($R_s = 365$ МПа, $E_s = 2 \cdot 10^5$ МПа) стержневая 3 штуки диаметром 10 мм ($R_s = 365$ МПа). Защитный слой бетона 30 мм. Геометрические характеристики приведены на рисунке 1а.

2. Данные об усилении:

1 способ: усиление наращиванием сечения бетона толщиной 50 мм на верхней части плиты. Характеристики наращиваемого сечения: бетон класса В30 ($R_{b2} = 17$ МПа, $R_{bt2} = 1.15$ МПа, $E_{b2} = 33 \cdot 10^4$ МПа).

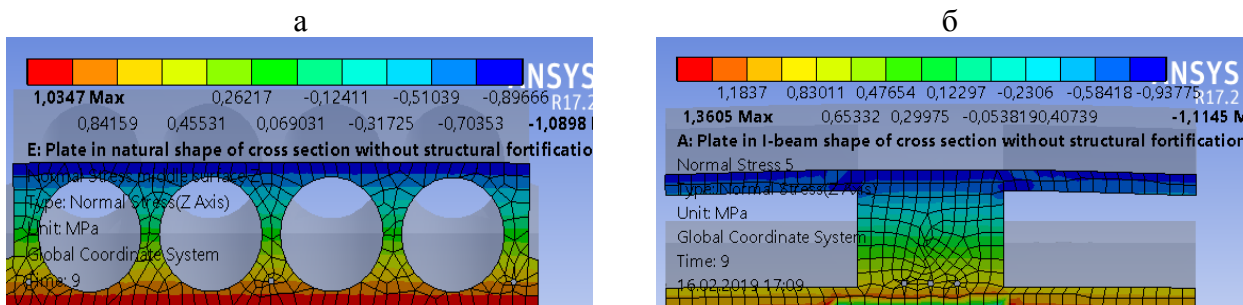
2 способ: усиления дополнительной арматурой в растянутой зоне рабочая продольная арматура, 2 стержня, диаметром по 10 мм класса А-400 ($R_s = 365$ МПа, $E_s = 2 \cdot 10^5$ МПа). При этом арматуру помещают в пустотелые отсеки плиты, которые заполняют бетоном на класс выше, чем бетон плиты. В данном случае это бетон класса В30 ($R_{b2} = 17$ МПа, $R_{bt2} = 1.15$ МПа, $E_{b2} = 33 \cdot 10^4$ МПа).

3 способ – усиление комбинированным способом: 50 мм наращивания бетона класса В30 ($R_{b2} = 17$ МПа, $R_{bt2} = 1.15$ МПа, $E_{b2} = 33 \cdot 10^4$ МПа). Характеристики дополнительной арматуры в растянутой зоне, рабочая продольная арматура 2 стержня диаметром по 10 мм, класса А-400 ($R_s = 365$ МПа, $E_s = 2 \cdot 10^5$ МПа). Бетон заполнения класса В30 ($R_{b2} = 17$ МПа, $R_{bt2} = 1.15$ МПа, $E_{b2} = 33 \cdot 10^4$ МПа).

Во всех случаях адгезия между арматурой и бетоном, а также между бетоном класса В25 и бетоном класса В30 принимается идеальной. Для визуализации трещин в ПК ANSYS применялись пользовательские функции, например, в форме деформационного критерия Базанта [18], позволяющего учитывать трещинообразование в плитах и визуализировать этот процесс средствами ANSYS. Как и при стандартном упруго-пластическом анализе, бетон работает в сжатой зоне, а в растянутой зоне принимает на себя нагрузку сталь, пока не достигнет предела текучести [19; 20]. Критерием разрушения конструкции являлось превышение напряжений в арматуре над ее расчетным сопротивлением [21]. На шаге нагружения, при котором арматура достигала предела текучести, фиксировалась разрушающая нагрузка.

3. Результаты исследований

На рисунке 4 представлены распределение нормальных напряжений по высоте сечения плиты, соответственно представленной в естественной форме, и в форме двутавра. Как видно из рисунка, появление трещин происходит раньше для плит, представляемых в форме двутавра как для усиленных, так и не усиленных плит. На рис. 4, а, б показаны нормальные напряжения σ_z в сечениях образцов 1.1 и 1.2. при нагрузке 2,8125 кН/м². Из рисунка 4 видно, что трещины в образце 1.1 появляются раньше (зеленая зона внизу показывает исключение конечных элементов из модели в нижней части поперечного сечения). Это согласуется с графиками распределения нормальных напряжений σ_z по высоте h сечения на рис. 5а. Рисунок 4в,г иллюстрирует нормальные напряжения σ_z в сечениях образцов 4.1 и 4.2. (образцы, усиленные комбинированным способом) при нагрузке 5,3125 кН/м². Как видно, при одних и тех же нагрузках трещинообразование в плитах, представленных в форме двутавра происходит раньше, что согласуется с рисунком 6а.



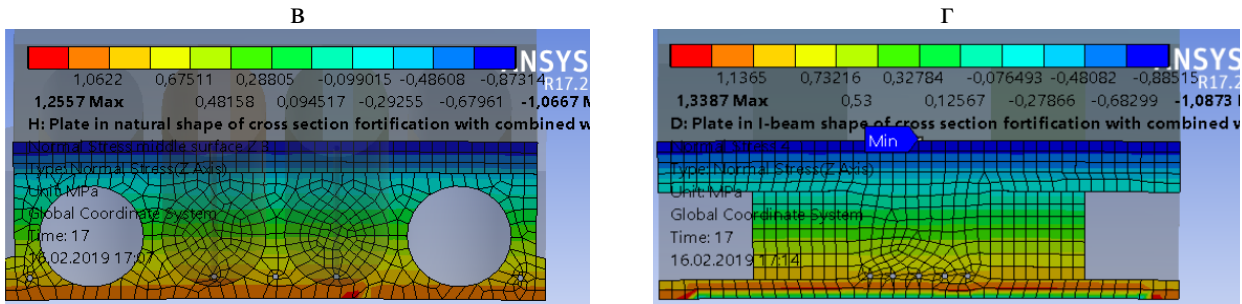


Рисунок 4. Сопоставление напряжений в сечениях образцов 1.1 и 1.2 в плитах естественной и двутавровой форм: а – нормальные напряжения σ_z в сечениях образцов 1.2, б – нормальные напряжения σ_z в сечениях образцы 1.1, в – нормальные напряжения σ_z в сечениях образцов 4.2, г – нормальные напряжения σ_z в сечениях образцы 4.1 (составлено авторами)

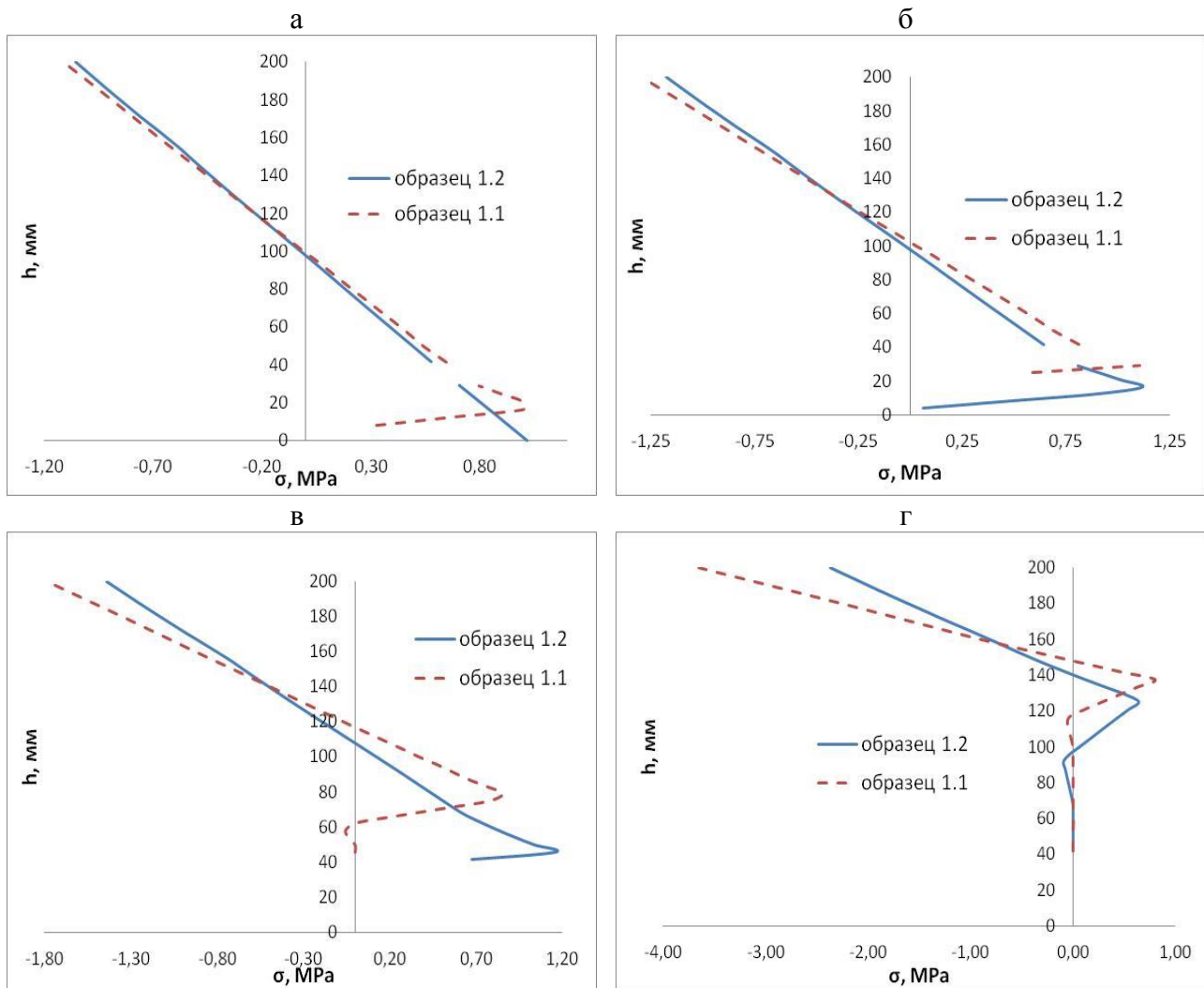


Рисунок 5. Эпюры распределения нормальных напряжений по высоте сечения образцов 1.1 и 1.2: а – при нагрузке 2,8125 кН/м², б – при нагрузке 3,125 кН/м², в – при нагрузке 3,437 кН/м², г – при нагрузке 3,750 кН/м² (составлено авторами)

На рисунке 5 сопоставляются эпюры нормальных напряжений в срединном сечении смоделированных образцов 1.1 и 1.2 (образцы без усиления). Как видно, при одной и той же нагрузке ползучесть бетона проявляется раньше для образца в форме двутавра, а при дальнейшем нагружении эти различия только усиливаются. Аналогичная картина наблюдается и для плиты, усиленной комбинированным способом (рис. 6).

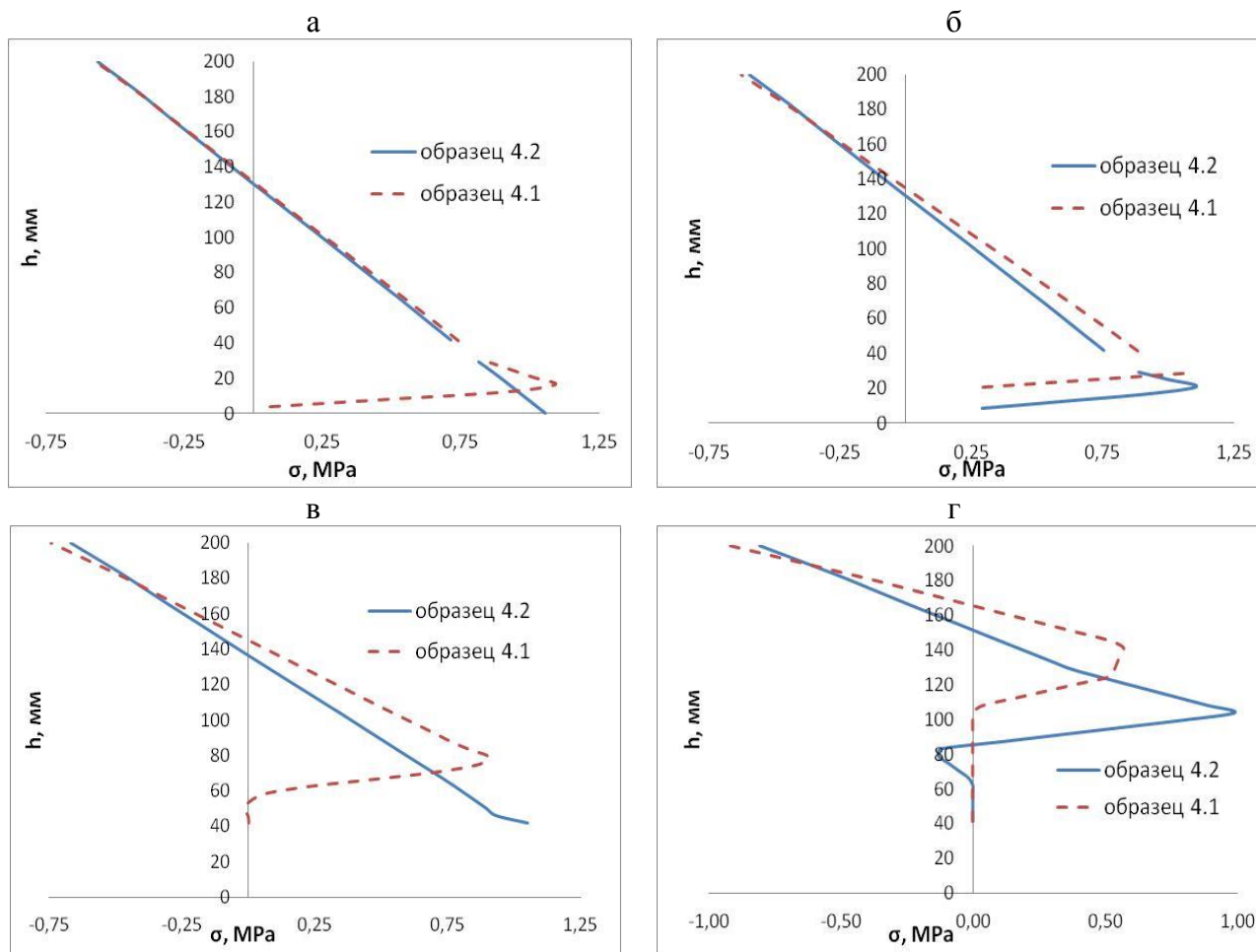


Рисунок 6. Эпюры распределения нормальных напряжений по высоте сечения образцов 4.1 и 4.2: а – при нагрузке 5,3125 кН/м², б – при нагрузке 5,625 кН/м², в – при нагрузке 5,9375 кН/м², г – при нагрузке 6,250 кН/м² (составлено авторами)

На рисунке 6 видно, что трещины в плитах, усиленных комбинированным способом, также появляются раньше для образцов 4.1 (плиты в форме двутавра).

Результаты расчетов приведены в таблице 1. За эталон взяты образцы плит в естественной форме, с которыми, в соответствии с видом усиления, сопоставлялись образцы в форме двутавра.

Таблица 1

Результаты расчетов пустотных плит

	Тестируемый образец	Нагрузка трещинообразования, кН/м ²	Прогибы при появлении трещин, мм	Максимальные (по модулю) значения сжимающих напряжений в среднем сечении бетона плит, МПа	Напряжения в арматуре при появлении трещин в бетоне плит, МПа
Плита в естественной форме	Образец 1.2	3,125	0,64489	-1,0564	4,74
	Образец 2.2	4,375	0,43033	-0,41607	5,25
	Образец 3.2	3,75	0,65711	-1,1039	4,99
	Образец 4.2	5,625	0,47855	-0,563	5,45
Плита в форме двутавровой балки	Образец 1.1	2,8125	0,7176	-1,1145	5,228
	Образец 2.1	4,0625	0,47568	0,43259	5,75
	Образец 3.1	3,4375	0,70681	-1,1316	5,29
	Образец 4.1	5,3125	0,50419	-0,57204	5,75

Составлено авторами

Максимальное отклонение нагрузки трещинообразования составило около 10 % для пустотных плит без усиления. Минимальное отклонение в нагрузке трещинообразования наблюдается для плит, усиленных комбинированным способом, и составляет около 5,5 %. Аналогичная тенденция сохраняется для напряжений в арматуре при появлении первых трещин (плита без усиления – 10,3 %; плита, усиленная комбинированным способом – 5,5 %) и прогибов при появлении первых трещин (плита без усиления – 11,3 %; плита, усиленная комбинированным способом – 5,3 %).

Выводы

Таким образом, из полученных данных можно сделать следующие выводы:

- Трещины в образце с нормальной формой поперечного сечения появляются позже. В среднем нагрузка трещинообразования, для различных способов усиления, на 7,7 % меньше для плит в естественной форме. Следует также отметить, что при заполнении части пустот бетоном (образцы 2 и 4), отклонение между результатами расчетов уменьшаются, при сопоставлении сечений в форме двутавра и в естественной форме.
- Прогиб при появлении трещин больше у плит в форме двутавра, значит это сечение менее жесткое, чем сечение в естественной форме плиты. Среднее отклонение прогиба при нагрузке трещинообразования для всех видов усиления составило около 8,68 %.
- Напряжения в арматуре с появлением трещин также различались для плит в естественной форме поперечного сечения и соответствующих плит в форме двутавровых балок. Среднее отклонение составило около 7,8 %.
- Очевидно, что форма сечения влияет на результаты расчетов по второй группе предельных состояний. Следовательно, необходимо разработать коэффициенты, которые бы учитывали погрешность при представлении плит в балочной форме при расчетах элементов строительных конструкций. Следовательно, требуется разработка коэффициентов, которые влияют на форму поперечного сечения на напряженно-деформированное состояние пустотелых плит. В нем будут уточнены расчеты пустотных плит для трещин и результаты расчетов напряженно-деформированного состояния пустотных плит.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hwan Y.J. and Won P.T. 2018 Construction Safety Evaluation of Local Bearing Strength of Hollow Core Slab J. of The Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection 22, 8–15.
2. Jiang H. and Jiang R. 2017 Residual Service Life Prediction for Bridges Based on Critical Life Curves J. of Performance of Constructed Facilities 31 (5) paper № 04017053.
3. Taranukha N.A. and Vasilyev A.S. 2015 Numerical investigation problems limit carrying capacity of composite structures Marine intellectual technologies (Arine intellectual technologies) 2(3), pp 27–32.
4. Карпенко, Н.И. Исходные и трансформированные диаграммы деформирования бетона и арматуры / Н.И. Карпенко, Т.А. Мухамедиев, А.Н. Петров // Напряженно-деформированное состояние бетонных и железобетонных конструкций. – М.: НИИЖБ, 1986. – С. 7–25.
5. Карпенко, Н.И. Общие модели механики железобетона / М.И. Карпенко. – М.: Стройиздат, 1996. – 416 с.

6. Клованич, С.Ф. Метод конечных элементов в механике железобетона / С.Ф. Клованич, И.Н. Мироненко. – Одесса, 2007. – 111 с.
7. Клованич, С.Ф. Метод конечных элементов в расчетах пространственных железобетонных конструкций / С.Ф. Клованич, Д.И. Безушко. – Одесса: Издательство ОНМУ, 2009. – 89 с.
8. Javed M.F., Sulong N.H.R., Memon S.A., Rehman S.K.U. and Khan N.B. 2017 FE modelling of the flexural behaviour of square and rectangular steel tubes filled with normal and high strength concrete, J. Thin-walled structures. 119, pp. 470–481.
9. Yuanli Wu 2015 Shear Strengthening of Single Web Prestressed Hollow Core Slabs Using Externally Bonded FRP Sheets Electronic Theses and Dissertations, p. 124.
10. Chen G.M., Chen J.F. and Teng J.G. 2012 On the finite element modelling of RC beams shear-strengthened with FRP J. Construction and Building Materials, pp. 13–26.
11. Bennegadi M.L., Sereir Z. and Amziane S. 2013 3D nonlinear finite element model for the volume optimization of a RC beam externally reinforced with a HFRP plate. J. Construction and Building Materials 38, pp. 1152–1160.
12. Kankeri P., Prakash S. and Pachalla, S.K.S. 2018 Experimental and Numerical Studies on Efficiency of Hybrid Overlay and Near Surface Mounted FRP Strengthening of Pre-cracked Hollow Core Slabs Structures 15, pp. 1–12.
13. Al-Negheimish A.I., El-Sayed A.K., Khanbari M.O. and Alhozaimy A.M. 2018 Structural behavior of prestressed SCC hollow core slabs J. Construction and Building Materials 182, pp. 334–345.
14. Albero V., Saura H., Hospitaler A., MontalvÀ J.M. and Romero M.L. 2018 Optimal design of prestressed concrete hollow core slabs taking into account its fire resistance Advances in Engineering Software, 122, pp. 81–92.
15. Рекомендации по усилению и ремонту строительных конструкций инженерных сооружений [Текст]. Введ. 01.01.1997. – актуал.01.02.2017. – ЦНИИ промзданий № 1997.
16. С.В. Климов, Т.В. Юрина, С.Л. Бугаев С.Л. Проектирование и расчет железобетонных многопустотных плит перекрытий. Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. – 79 с.
17. Willam K.J. and Warnke K.J. 1974 Constitutive model for the triaxial behavior of concrete Seminar of concrete structures subjected to triaxial stresses Bergamo, p. 31.
18. Bazant Z.P. and Cedolin L. 1980 Fracture mechanics of reinforced concrete ASCE J. Eng Mech Div 106 (6) pp. 1287–1306.
19. Burgess I. 2017 Yield-line plasticity and tensile membrane action in lightly-reinforced rectangular concrete slabs, Engineering structures. 138, 195–214.
20. Cashell K.A., Elghazouli A.Y. and Izzuddin B.A. 2010 Experimental and analytical assessment of ductility in lightly reinforced concrete members J. Engineering structures. 32 (9), pp. 2729–2743.
21. Hognestad E. 1953 Yield-line theory for the ultimate flexural strength of reinforced concrete slabs, J. Proceedings 49 (3), 637–656.

Vasilyev Alexey Sergeevich

Sholom-Aleichem Priamursky state university, Birobidzhan, Russia
E-mail: vasil-grunt@mail.ru

Nazarova Veronika Pavlovna

Sholom-Aleichem Priamursky state university, Birobidzhan, Russia
E-mail: student.nika1661@mail.ru

Numerical study of the stressed state of reinforced hollow concrete slabs with the appearance of cracks

Abstract. As is known, in numerical and analytical assessment hollow cores slabs are represented as T-beams and I-beams. The width of the beam edge decreases according to the dimensions of the voids inside the slab. The generally accepted theory of calculating building structures suggests the calculation of such hollow core slabs based on the beam theory. Slab is then represented as a beam on two supports. In this paper the authors test stress-strain of hollow core slabs at failure. Numerical researches were carried out in different conditions of strengthening. Increasing pressure in separate areas when reconstructing and improving industrial buildings, may necessarily mean strengthening structural surfaces of buildings. The authors perform their calculations in a non-linear system, with a progressive loading, until the *объекты* are destroyed, based on the general principles of mechanics of a deformable solid. Simulation and figure analyses were designed in a modern calculated complex. The researchers compared calculations of slabs with the full-scale cross section shape and calculations of the same I-beam slabs. The aim of the study was to determine the effect of the shape of the cross section on the results of normal stresses in the cross section and the moments of occurrence of cracks from the bending moment in the middle of the span. The stresses in the reinforcement and cross sections of hollow core slabs with different types of strengthening were fixed in the calculations. The paper is also dedicated to a variety of strengthening modes and it explains that the cracking point for full-scale slabs comes after. The results will help to clarify the section of the theory of calculation of reinforced concrete structures.

Keywords: numerical research; strengthening; reinforced concrete structures; hollow plate; stress-strain state; I-beam