

УДК 624.01

doi: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1\(32\)-128-140](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1(32)-128-140)

К ВОПРОСУ СОЗДАНИЯ ВЕРИФИКАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ РАСЧЕТА КЕССОННОГО ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО ПЕРЕКРЫТИЯ В ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ SCAD

М.В. МОЗГОЛОВ, канд. техн. наук

Е.В. КОЗЛОВА 

Коломенский институт (филиал) ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет»,
ул. Октябрьской революции, д. 408, г. Коломна, 140402, Российская Федерация

Аннотация

Введение. Вопросами аналитических и компьютерных расчетов железобетонных кессонных перекрытий занимались многие исследователи. Анализ полученных ими данных показывает, что усилия в балках в зависимости от созданной конечно-элементной модели могут существенно отличаться. Некоторые модели не позволяют корректно подобрать армирование балок в автоматическом режиме вычислительного комплекса.

Целью данной работы является создание компьютерной модели кессонного перекрытия усилия, армирование и прогибы в балках которого можно сравнить с данными аналитического расчета, выполненного в соответствии с нормативными требованиями.

Материалы и методы. В соответствии с методом конечных элементов наиболее точной является модель, состоящая из конечных элементов стержневого типа. Наиболее простой аналитический расчет можно осуществить для кессонной конструкции квадратной в плане, с квадратными кессонами, так как упрощается определение коэффициентов, от которых зависит распределение нагрузки на балки. В связи с этим в качестве методики авторами разработаны три стержневые конечно-элементные модели перекрытия квадратного в плане $9,0 \times 9,0$ м с квадратными кессонами $0,9 \times 0,9$ м. Первая модель представляет собой стержневые конечные элементы таврового сечения с непосредственным приложением к ним погонной нагрузки, собираемой с отсеков по закону треугольника. Вторая и третья модели отличаются от первой способом приложения нагрузки на гибкий конечный элемент оболочечного типа регулярного и хаотичного разбиений.

Результаты. Результаты расчетов показали, что компьютерные модели достоверно отражают напряженное состояние балок кессонного перекрытия при сравнении с расчетом, выполненным аналитическим способом. Отклонения по изгибающим моментам не превышают +5 %.

Выводы. Разработанные конечно-элементные модели SCAD позволяют достоверно определить усилия и провести расчет железобетонных балок кессонного перекрытия по первой и второй группам предельных состояний, сравнить полученные данные с аналитическим расчетом, выполненным в соответствии с нормативными требованиями. Предлагаемые модели можно использовать при верификационных расчетах моделей перекрытия, состоящих из разных типов конечных элементов.

Ключевые слова: железобетонные кессонные перекрытия, конечно-элементная расчетная модель, верификационные вычисления, изгибающие моменты, поперечные силы

Для цитирования: Мозголов М.В., Козлова Е.В. К вопросу создания верификационной модели для расчета кессонного железобетонного перекрытия в вычислительном комплексе SCAD // Вестник НИЦ «Строительство». 2022. Т. 32. № 1. С. 128–140. doi: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1\(32\)-128-140](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1(32)-128-140)

Вклад авторов

Мозголов М.В. – создание компьютерных моделей, сбор материала, обработка материала, научное редактирование статьи, оформление статьи.

Козлова Е.В. – сбор материала, обработка материала, аналитический расчет конструкций, оформление статьи.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CREATION OF A SCAD VERIFICATION MODEL FOR THE DESIGN CALCULATIONS OF A REINFORCED-CONCRETE WAFFLE SLAB FLOOR SYSTEM

M.V. MOZGOLOV, Cand. Sci. (Engineering)

E.V. KOZLOVA 

Kolomna Institute (branch), Moscow Polytechnic University, Oktyabrskoy Revoliutsii str., 408, Kolomna, 140402, Russian Federation

Abstract

Introduction. Numerous researchers have examined issues associated with the analytical and computer-assisted design calculations for reinforced-concrete waffle slab systems. The obtained data indicate that forces in the beams can vary significantly depending on the created finite element model. Some models provide no means to correctly select beam reinforcement in the automatic mode of the selected analysis system.

Aim. To create a computer model of a waffle slab floor system, forces, reinforcement, and deflections in whose beams would be comparable to the data of analytical design calculations performed in accordance with regulatory requirements.

Materials and methods. According to the finite element method, the most accurate model comprises bar finite elements. The simplest analytical calculation can be performed for a square structure comprising square waffle slabs since it becomes easier to ascertain coefficients determining how the load is distributed on the beams. In this connection, the authors developed three bar finite-element models of a rectangular floor system measuring 9.0 × 9.0 m (square waffle slabs of 0.9 × 0.9 m) to be used in the procedure. The first model comprises bar finite elements having a T-section directly subjected to a load per unit length distributed from the coffers according to the triangle law. The second and third models differ from the first model in the way the load is applied to a flexible shell finite element having regular and chaotic partitions.

Results. The obtained results indicate that computer models accurately reflect the stress state of beams in the waffle slab floor system as compared to the analytical calculations. Bending moment deviations do not exceed +5 %.

Conclusions. The developed SCAD finite-element models enable reliable determination of forces, design calculations for the reinforced-concrete beams of the waffle slab floor system according to the ultimate and serviceability limit states, as well as comparison of the obtained data with analytical calculations performed in accordance with regulatory requirements. The proposed models can be used in verification calculations for floor system models comprising different types of finite elements (bar, plate, shell, and their combinations).

Keywords: reinforced-concrete waffle slab floor systems, finite-element calculation model, verification calculations, bending moments, shear forces

For citation: Mozgolov M.V., Kozlova E.V. Creation of a SCAD verification model for the design calculations of a reinforced-concrete waffle slab floor system. Bulletin of Science and Research Center of Construction. 2022. Vol. 32. No. 1. P. 128–140 [In Russ.]. doi: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1\(32\)-128-140](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1(32)-128-140)

Author contribution statements

Mozgolov M.V. – creation of computer models, collection and processing of data, scientific editing of the article, text formatting.

Kozlova E.V. – collection and processing of data, analytical design calculations for structures, text formatting.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Введение

Одним из эффективных с конструктивной точки зрения и необычным по архитектуре является часторебристое перекрытие кессонного типа [1–7]. В последнее время с появлением новых технологий проектного, расчетного и производственного направлений интерес к кессонным перекрытиям возобновился. Распространение получают опалубочные системы SKYDOME, NAUTILUS, HOLEDECK, U-Boot Beton и др.

В связи с широким внедрением в области строительства BIM-технологий, утвержденных на законодательном уровне (СП 333.1325800.2020 Информационное моделирование в строительстве. Правила формирования информационной модели объектов на различных стадиях жизненного цикла), и массовым переходом инженеров на компьютерные методы расчета, о проектировании строительных конструкций заговорили в форме 3D-моделей, состоящих из различных конечных элементов (стержней, плит, оболочек, объемных тел, специальных конечных элементов). Монолитное балочное железобетонное перекрытие можно смоделировать на ЭВМ различными способами [8–17]. При получении армирования конструкции в автоматическом режиме вычислительного комплекса все модели имеют свои достоинства и недостатки, некоторые из них не позволяют корректно подобрать армирование балок по причине возникновения проблем, связанных со стыковкой конечных элементов разного типа.

При выполнении расчета инженер должен быть уверен, что его условная расчетная схема соответствует проектируемой конструкции, удовлетворяет требованиям надежности, экономичности и безопасности. Ошибочность принятого решения может привести в лучшем случае к необоснованному перерасходу материала, а в худшем – к снижению надежности конструкции или ее разрушению. В работе [17] представлены значения изгибающих моментов в балках кессонного перекрытия прямоугольного в плане $11,55 \times 9,0$ м с прямоугольными кессонами $1,65 \times 1,5$ м, рассчитанные при помощи различных компьютерных моделей вычислительного комплекса SCAD. Полученные данные сравниваются с данными аналитического расчета [4], при этом различия в изгибающих моментах составляют от $-6,3$ до $+61,9$ %. Значительные отклонения усилий в балках кессонных перекрытий, найденные аналитическими и компьютерными методами, отмечаются в работах [6, 7].

Цель

Целью данной работы является создание простой и понятной инженеру компьютерной конечно-элементной расчетной модели кессонного перекрытия, усилия в балках которого можно сравнить с усилиями аналитического расчета и в дальнейшем выполнить расчет конструкции по первой и второй группам предельных состояний в соответствии с требованиями норм. Впоследствии использовать данную модель в качестве верификационной.

Материалы и методы

С методикой аналитического расчета кессонных перекрытий, опертых по контуру, можно познакомиться в работах [1–7].

Например, в расчетной схеме, моделирующей балочное перекрытие, состоящей из пластинчатых (полка) и стержневых (ребро) конечных элементов, соединенных жесткими вставками, в стержнях кроме изгибающих моментов и поперечных сил возникают значительные продольные усилия и элемент при подборе арматуры будет сконструирован как внецентренно-растянутый, а подобранная арматура в нем будет распределена по всему периметру сечения [10, 11]. Распределенной по сечению ребра получается арматура и в моделях, составленных из оболочечных конечных элементов [15].

Наиболее простой аналитический расчет можно осуществить для кессонной конструкции квадратной в плане, с квадратными кессонами, так как упрощается определение коэффициентов, от которых зависит распределение нагрузки на балки. При одинаковой ортогональной жесткости перекрытия нагрузка на балки распределяется поровну.

Для анализа выбрано перекрытие квадратное в плане $9,0 \times 9,0$ м с квадратными кессонами $0,9 \times 0,9$ м, конструируемое из элементов системы SKYDOME (купол Н 400, перекладина Т 200, толщина полки 80 мм) [19], работающее на равномерно-распределенную нагрузку $q = 1,5$ Т/м² с шарнирным опиранием по контуру (рис. 1). Собственный расчетный вес перекрытия составляет: $g_p = (0,222 + 0,08) \cdot 2500 \cdot 1,1 = 831$ кг/м². В методе конечных элементов считается, что точные решения получаются для стержней постоянного сечения по их длине [14]. Поэтому в соответствии с геометрией перекрытия в качестве конечного элемента принят стержень – тавровая балка высотой 480 мм, с шириной ребра 200 мм, толщиной полки 80 мм, шириной полки 900 мм из бетона класса В25. В часторебристом перекрытии для балок одного направления балки другого направления являются для первых ребрами жесткости, и в соответствии с требованиями п. 8.1.11 СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения» в расчете мы должны учитывать всю ширину полки.

Были созданы три компьютерные модели, отличающиеся в способе приложения нагрузки. В первой модели погонная нагрузка прикладывалась непосредственно на балки по закону треугольника [3], собираемая с двух смежных отсеков: $q = 2 \cdot 1,5 \cdot 0,9/2 = 1,35$ Т/м.

Во второй модели равномерно-распределенная нагрузка прикладывалась на гибкую плиту из 41 прямоугольного конечного элемента оболочки, толщиной 1 см с модулем упругости материала $E = 1$ Т/м², коэффициентом Пуассона $\mu=0$ и коэффициентом линейного расширения материала $\alpha = 1,0 \cdot 10^{-5}$ °С⁻¹, установленную в центре тяжести балок. Разбиение отсеков было регулярным, с шагом 5×5 элементов. Известно, что в методе конечных элементов

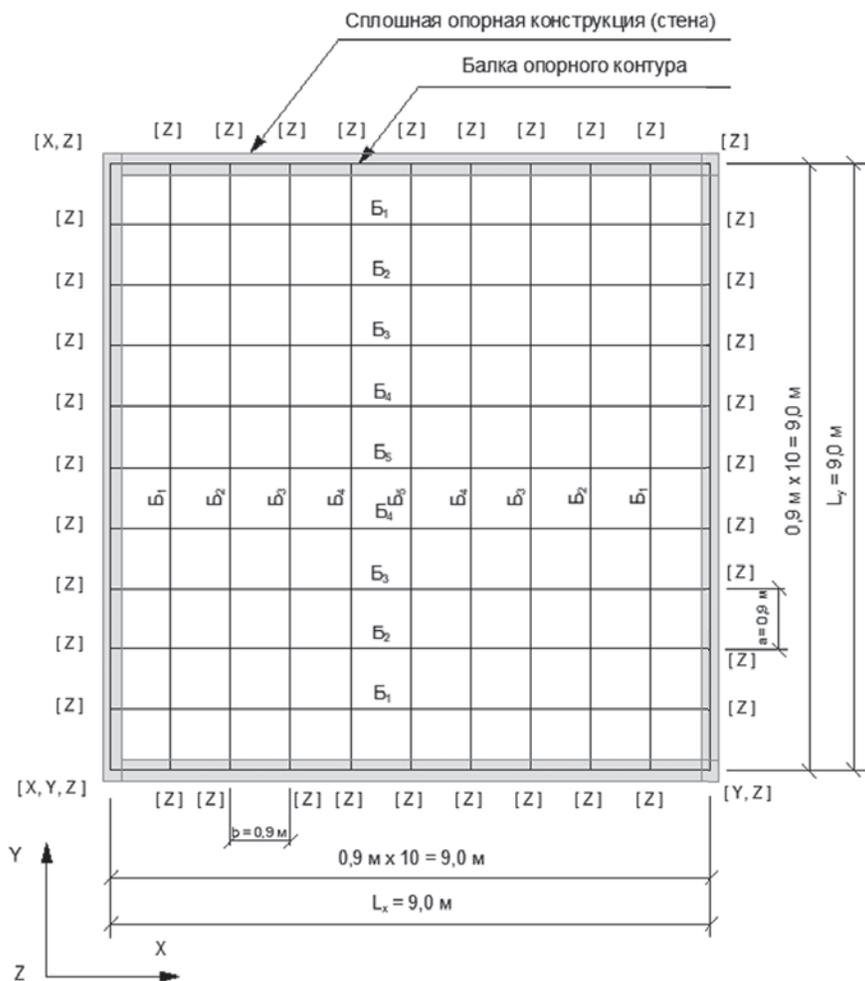


Рис. 1. Схема кессонного перекрытия. B₁, B₂, B₃, B₄, B₅ – рассчитываемые балки.
 [X, Y, Z] – связи, установленные в узлах балки опорного контура
Fig. 1. Schematic of the waffle slab floor system. B₁, B₂, B₃, B₄, and B₅ – analyzed beams.
 [X, Y, Z] – connections established in the beam nodes of the support contour

сходимость данных по поперечной силе элементов пластинчатого типа может не обеспечиваться [13, 14]. Поэтому с целью изучения сходимости результата и возможности применения для сбора нагрузок гибкой плиты различной геометрии, например в треугольных и косых кессонах, в третьей модели плита выполнена из 42 треугольных конечных элементов оболочки размером 0,3 м с хаотичным петч-разбиением [14]. Расчет выполнялся всеми методами, предусмотренными ВК SCAD. При выполнении расчетов в протоколе предупреждение о геометрически-изменяемой системе отсутствовало.

В соответствии с требованиями п. 6.2.5 СП. 430.1325800.2018 «Монолитные конструктивные системы. Правила проектирования» и п. 2.1.1.1. Методического пособия [18] для учета ползучести бетона и наличия трещин при расчете балок компьютерных моделей начальный модуль упругости бетона умножался на коэффициент 0,2 для участков с трещинами (пролетные балки) и 0,3 – для участков без трещин (балки опорного контура).

Выполним аналитический расчет. Так как конструкция симметричная в плане относительно осей X и Y, рассматриваем 5 балок: B_1, B_2, B_3, B_4, B_5 . Расчет начинаем с определения q_1 и q_2 – долей равномерно-распределенной нагрузки q , действующей на перекрытие и приходящиеся на балки пролетов L_y и L_x . Вычисляем коэффициенты K_1 и K_2 :

$$K_1 = S_1 \cdot \alpha_1 \cdot L_y^4 \cdot \frac{1}{B_1} = \frac{5}{48} \cdot 0,125 \cdot 9,0^4 \cdot \frac{1}{18800} = 0,0045 \text{ м}^2/\text{Т}, \quad (1)$$

$$K_2 = S_2 \cdot \alpha_2 \cdot L_x^4 \cdot \frac{1}{B_2} = \frac{5}{48} \cdot 0,125 \cdot 9,0^4 \cdot \frac{1}{18800} = 0,0045 \text{ м}^2/\text{Т}, \quad (2)$$

где B_1, B_2 – жесткость перекрытия вдоль осей Y и X.

В нашем случае:

$$B_1 = B_2 = 0,2 \cdot E_b \cdot I = 18800 \text{ Тм}^2, \quad (3)$$

$$q_1 = \frac{K_2}{K_1 + K_2} \cdot q = \frac{0,0045}{0,0045 + 0,0045} \cdot 1,5 = 0,75 \text{ Т/м}^2, \quad (4)$$

$$q_2 = \frac{K_1}{K_1 + K_2} \cdot q = \frac{0,0045}{0,0045 + 0,0045} \cdot 1,5 = 0,75 \text{ Т/м}^2. \quad (5)$$

Расчет начинаем с центральной балки B_3 , так как ее усилия являются базовыми для остальных балок. Определяем максимальный изгибающий момент в середине пролета и поперечную силу в приопорной зоне.

Балка B_3

$$M_{B3}^{\max} = \alpha_1 \cdot q_1 \cdot b \cdot L_y^2 = 0,125 \cdot 0,75 \cdot 0,9 \cdot 9,0^2 = 6,83 \text{ Тм}, \quad (6)$$

$$Q_{B3}^{\max} = 0,5 \cdot q_1 \cdot b \cdot L_y = 0,5 \cdot 0,75 \cdot 0,9 \cdot 9,0 = 3,04 \text{ Т}. \quad (7)$$

Балка B_4

$$\eta_y = \frac{x}{L_x} = \frac{3,6}{9,0} = 0,4, \quad (8)$$

$$n_y = \frac{16}{5} \cdot (\eta_y - 2 \cdot \eta_y^3 + \eta_y^4) = \frac{16}{5} \cdot (0,4 - 2 \cdot 0,4^3 + 0,4^4) = 0,952, \quad (9)$$

$$M_{B4}^{\max} = n_y \cdot M_{B3}^{\max} = 0,952 \cdot 6,83 = 6,5 \text{ Тм}, \quad (10)$$

$$Q_{B4}^{\max} = n_y \cdot Q_{B3}^{\max} = 0,952 \cdot 3,04 = 2,89 \text{ Т}. \quad (11)$$

Балка B_3

$$\eta_y = \frac{x}{L_x} = \frac{2,7}{9,0} = 0,3, \quad (12)$$

$$n_y = \frac{16}{5} \cdot (\eta_y - 2 \cdot \eta_y^3 + \eta_y^4) = \frac{16}{5} \cdot (0,3 - 2 \cdot 0,3^3 + 0,3^4) = 0,813, \quad (13)$$

$$M_{B3}^{\max} = n_y \cdot M_{B5}^{\max} = 0,813 \cdot 6,83 = 5,55 \text{ Тм}, \quad (14)$$

$$Q_{B3}^{\max} = n_y \cdot Q_{B5}^{\max} = 0,813 \cdot 3,04 = 2,47 \text{ Т}. \quad (15)$$

Балка B_2

$$\eta_y = \frac{x}{L_x} = \frac{1,8}{9,0} = 0,2, \quad (16)$$

$$n_y = \frac{16}{5} \cdot (\eta_y - 2 \cdot \eta_y^3 + \eta_y^4) = \frac{16}{5} \cdot (0,2 - 2 \cdot 0,2^3 + 0,2^4) = 0,594, \quad (17)$$

$$M_{B2}^{\max} = n_y \cdot M_{B5}^{\max} = 0,594 \cdot 6,83 = 4,06 \text{ Тм}, \quad (18)$$

$$Q_{B2}^{\max} = n_y \cdot Q_{B5}^{\max} = 0,594 \cdot 3,04 = 1,81 \text{ Т}. \quad (19)$$

Балка B_1

$$\eta_y = \frac{x}{L_x} = \frac{0,9}{9,0} = 0,1, \quad (20)$$

$$n_y = \frac{16}{5} \cdot (\eta_y - 2 \cdot \eta_y^3 + \eta_y^4) = \frac{16}{5} \cdot (0,1 - 2 \cdot 0,1^3 + 0,1^4) = 0,314, \quad (21)$$

$$M_{B1}^{\max} = n_y \cdot M_{B5}^{\max} = 0,314 \cdot 6,83 = 2,14 \text{ Тм}, \quad (22)$$

$$Q_{B1}^{\max} = n_y \cdot Q_{B5}^{\max} = 0,314 \cdot 3,04 = 0,96 \text{ Т}. \quad (23)$$

С целью сравнения методики компьютерного определения перемещения конструкции с аналитической методикой найдем ее по общим правилам строительной механики.

Максимальное перемещение центральной шарнирно-опертой балки B_5 модели № 1 SCAD определяется по формуле:

$$f_{B5}^{\max} = \frac{5}{48} \cdot L_y^2 \cdot \frac{M_{B5}^{\max}}{B_1} = \frac{5}{48} \cdot 9,0^2 \cdot \frac{6,83}{2012} = 0,029 \text{ м}, \quad (24)$$

где B_1 – жесткость балки вдоль оси Y .

$$B_1 = 0,2 \cdot E_b \cdot I = 2012 \text{ Тм}^2. \quad (25)$$

Перемещение узла модели № 1 SCAD $f = 30,5$ мм.

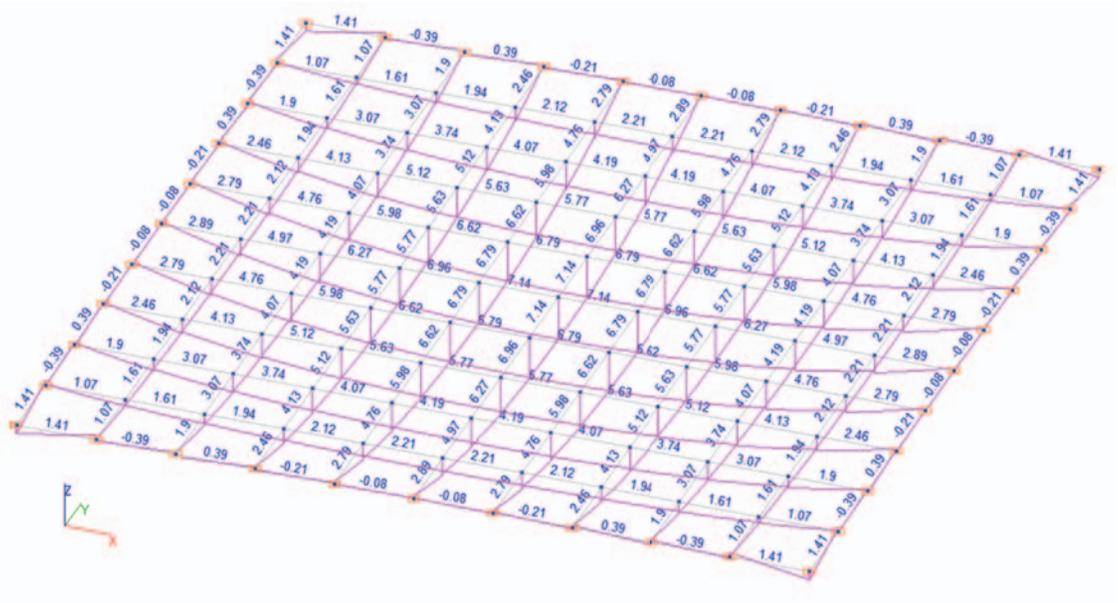


Рис. 2. Эпюры изгибающих моментов M_y, T_m в балках модели № 1 SCAD

Fig. 2. Diagrams of bending moments M_y and T_m in the beams of SCAD model No. 1

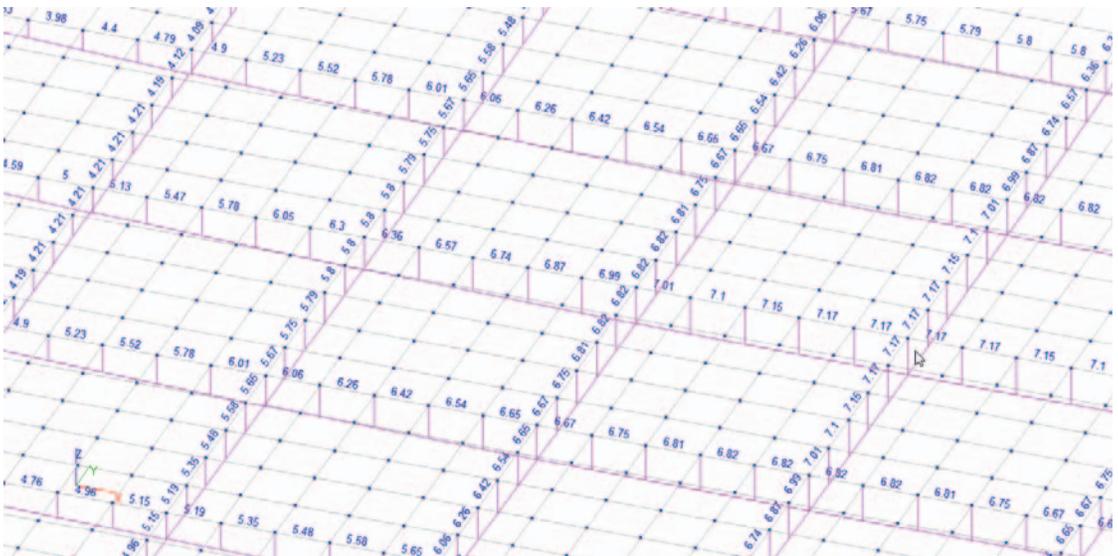


Рис. 3. Эпюры изгибающих моментов M_y, T_m в балках модели № 2 SCAD. Фрагмент центральной части перекрытия

Fig. 3. Diagrams of bending moments M_y and T_m in the beams of SCAD model No. 2. Central part of the floor system

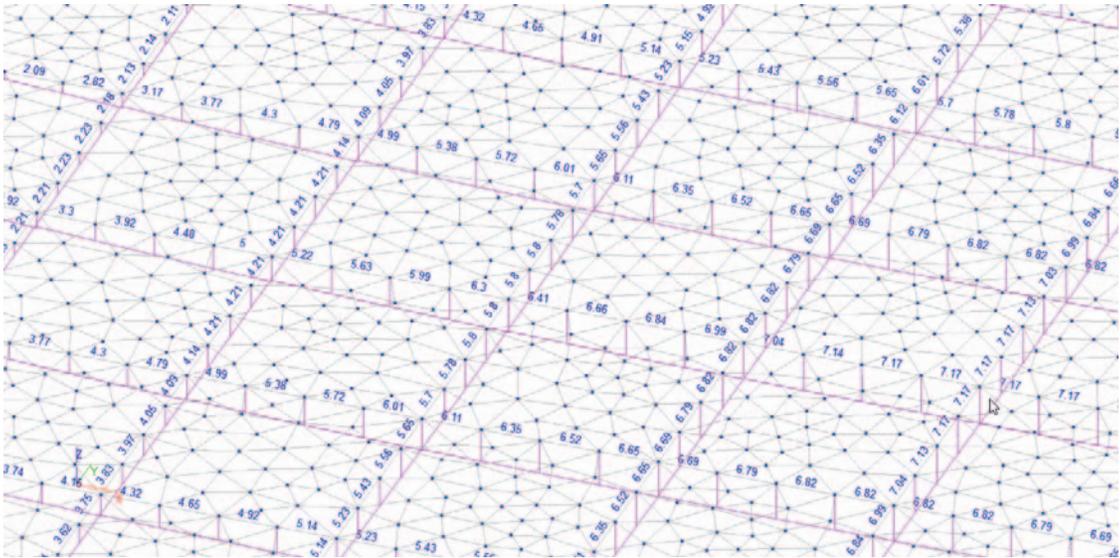


Рис. 4. Эпюры изгибающих моментов M_y , Тм в балках модели № 3 SCAD. Фрагмент центральной части перекрытия
Fig. 4. Diagrams of bending moments M_y and Tm in the beams of SCAD model No. 3. Central part of the floor system

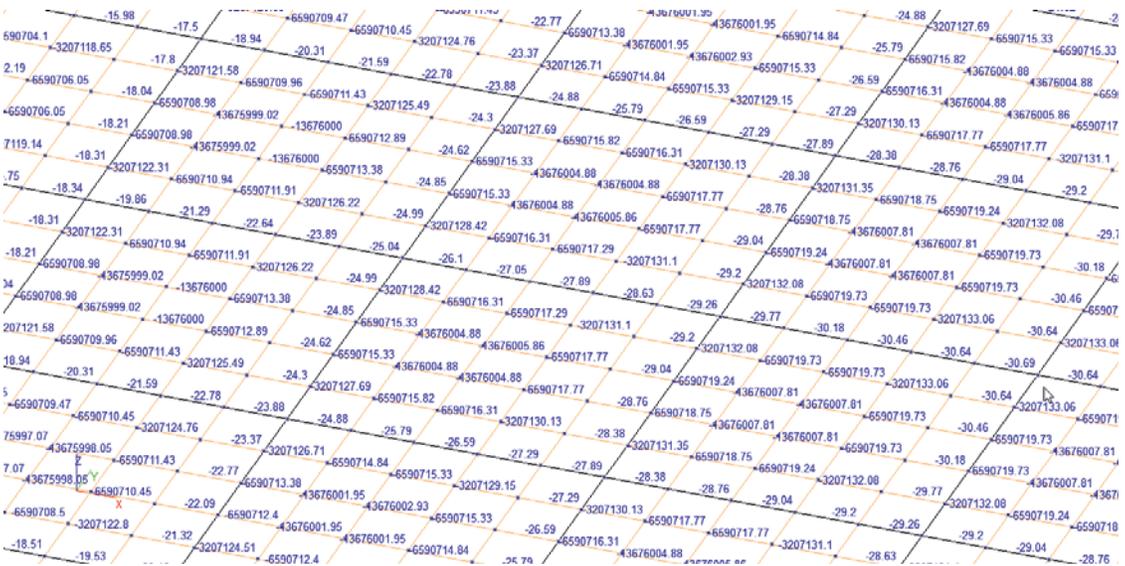


Рис. 5. Значения перемещений f , мм, узлов модели № 2 SCAD. Фрагмент центральной части перекрытия
Fig. 5. Displacements f , mm of nodes in SCAD model No. 2. Central part of the floor system

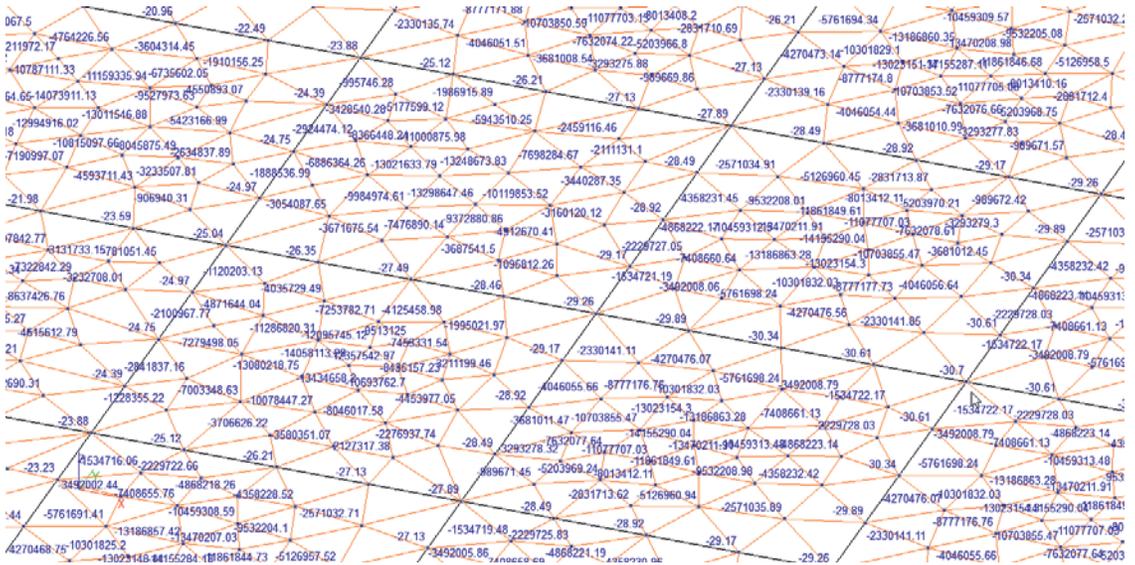


Рис. 6. Значения перемещений f , мм, узлов модели № 3 SCAD.

Фрагмент центральной части перекрытия

Fig. 6. Displacements f , mm of nodes in SCAD model No. 3.

Central part of the floor system

Таблица 1

Сравнение значений изгибающих моментов, поперечных сил и перемещений в балках кессонного перекрытия 9,0 × 9,0 м, полученные аналитическим методом и при помощи компьютерных моделей вычислительного комплекса SCAD

Table 1

Comparison of bending moments, shear forces, and displacements in the beams of the waffle slab floor system (9.0 × 9.0 m) obtained using the analytical method and SCAD models

Балка	Аналитический расчет (эталон)		Модель № 1 SCAD (нагрузка на стержни)			Модель № 2 SCAD (нагрузка на 41 КЭ)			Модель № 3 SCAD (нагрузка на 42 КЭ)		
	M_y Тм	Q_z Т	M_y Тм	Q_z Т	f мм	M_y Тм	Q_z Т	f мм	M_y Тм	Q_z Т	f мм
Б ₁	2,14 100 %	0,96 100 %	2,21 103 %	1,64 171 %	9,7	2,2 103 %	1,66 173 %	9,71	2,21 103 %	1,66 173 %	9,71
Б ₂	4,06 100 %	1,81 100 %	4,19 103 %	2,75 152 %	18,2	4,21 103 %	2,74 151 %	18,34	4,21 103 %	2,75 152 %	18,35
Б ₃	5,55 100 %	2,47 100 %	5,77 104 %	3,44 139 %	24,9	5,8 105 %	3,44 139 %	25,04	5,8 105 %	3,44 139 %	25,04
Б ₄	6,5 100 %	2,89 100 %	6,79 105 %	3,84 133 %	29,1	6,82 105 %	3,84 133 %	29,26	6,82 105 %	3,84 133 %	29,26
Б ₅	6,83 100 %	3,04 100 %	7,14 105 %	3,98 131 %	30,5	7,17 105 %	3,98 131 %	30,69	7,17 105 %	3,99 131 %	30,7

Результаты

Полученные данные при расчете конструкции в вычислительном комплексе SCAD представлены на рис. 2–6.

Данные аналитического расчета и компьютерных моделей представлены в табл. 1.

Проверим равновесие расчетных схем. Грузовая площадь балок

$$A = 9,0 \cdot 9,0 - (0,9 \cdot 0,45 \cdot 0,5 \cdot 40) = 72,9 \text{ м}^2.$$

$$\text{Суммарная нагрузка на балки } F = q \cdot A = 1,5 \cdot 72,9 = 109,35 \text{ Т.}$$

$$\text{Аналитический расчет: } Q = 0,96 \cdot 8 + 1,81 \cdot 8 + 2,47 \cdot 8 + 2,89 \cdot 8 + 3,04 \cdot 4 = 77,2 \text{ Т.}$$

Ошибка $109,35 - 77,2 = 32,15 \text{ Т}$, равновесие не соблюдается;

$$\text{Модель № 1 SCAD. } Q = 1,64 \cdot 8 + 2,75 \cdot 8 + 3,44 \cdot 8 + 3,84 \cdot 8 + 3,98 \cdot 4 = 109,28 \text{ Т.}$$

Совпадение 100 %, равновесие соблюдается.

Выводы

1. Предлагаемые расчетные модели вычислительного комплекса SCAD достоверно отражают напряженное состояние балок кессонного перекрытия квадратного в плане с квадратными кессонами при сравнении с расчетом, выполненным аналитическим способом. Отклонения по изгибающим моментам не превышают +5 %.

2. Аналитический метод определения усилий в балках кессонных перекрытий имеет погрешность, об этом свидетельствует распределение поперечных сил. Равновесие аналитической расчетной схемы не соблюдается, равновесие компьютерных моделей соблюдается.

3. При расчете кессонных перекрытий в виде стержневой конечно-элементной компьютерной модели удобно использовать модель с приложением нагрузки на гибкую плиту, расположенную в центре тяжести сечения стержневого конечного элемента. В качестве гибкой плиты эффективно применять 41, 42, 44 конечный элемент оболочки с условными физическими характеристиками (толщина 1 см, модуль упругости $E = 1 \text{ Т/м}^2$, коэффициент Пуассона $\mu = 0$, коэффициент линейного расширения материала $\alpha = 1,0 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$), обеспечивающими ему большую гибкость. Гибкая плита работает по биссектрисной схеме излома, передает нагрузку на несущие конструкции по закону треугольника, ее жесткость не влияет на их напряженно-деформированное состояние.

4. Созданные в вычислительном комплексе SCAD конечно-элементные модели позволяют провести расчет железобетонных балок кессонного перекрытия по первой и второй группам предельных состояний, полученные данные армирования, ширины раскрытия трещин и прогибов сравнить с «ручным» аналитическим расчетом, выполненным в соответствии с нормативными требованиями. Предлагаемые стержневые конечно-элементные модели как наиболее точные метода конечных элементов можно использовать при верификационных вычислениях моделей перекрытия, состоящих из разных типов конечных элементов (стержневых, плитных, оболочечных, их сочетаний). Недостатком предложенных конечно-элементных моделей является отсутствие расчетных данных для полки кессонной конструкции, а также невозможность приложения нагрузки от собственного веса в автоматическом режиме вычислительного комплекса.

5. Гибкий конечный элемент оболочечного типа с условными характеристиками удобно использовать при сборе нагрузок на стержневые расчетные схемы сложной конфигурации.

Список литературы

1. Расчет и конструирование частей жилых и общественных зданий: справочник проектировщика / П.Ф. Вахненко, В.Г. Хилобок, Н.Т. Андрейко, М.Л. Яровой. – Киев: Будівельник, 1987. – 424 с.
2. *Давыдов С.С.* Руководство по железобетонным и каменным конструкциям / С.С. Давыдов, А.С. Жиров, И.И. Иванова. – Москва: МИИТ, 1975. – 248 с.
3. *Иванов-Дятлов И.Г.* Железобетонные конструкции / И.Г. Иванов-Дятлов. – Москва, Ленинград: Министерство коммунального хозяйства РСФСР, 1950. – 296 с.
4. *Линович Л.Е.* Расчет и конструирование частей гражданских зданий / Л.Е. Линович. – Киев: Будівельник, 1972. – 664 с.
5. Железобетонные конструкции / И.И. Улицкий, С.А. Ривкин, М.В. Самолетов [и др.]. – Киев: Будівельник, 1972. – 992 с.
6. *Малахова А.Н.* Монолитные кессонные перекрытия зданий / А.Н. Малахова // Вестник МГСУ. – 2013. – № 1. – С. 79–86.
7. *Мозголов М.В.* Об эффективности косых кессонных железобетонных перекрытий / М.В. Мозголов, А.В. Туранова // Градостроительство и архитектура. – 2021. – Т. 11, № 3. – С. 20–25. <https://doi.org/10.17673/Vestnik.2021.03.03>
8. *Алямовский А.А.* Инженерные расчеты в SolidWorksSimulation / А.А. Алямовский. – Москва: ДМК Пресс, 2019. – 464 с.
9. Проектирование несущих конструкций многоэтажного каркасного здания / С.В. Горбатов, О.В. Кабанцев, А.И. Плотников [и др.]. – Москва: АСВ, 2016. – 196 с.
10. Расчет и проектирование конструкций высотных зданий из монолитного железобетона / А.С. Городецкий, Л.Г. Батрак, Д.А. Городецкий [и др.]. – Киев: Факт, 2004. – 106 с.
11. *Городецкий А.С.* Компьютерные модели конструкций / А.С. Городецкий, И.Д. Евзеров. – Киев: Факт, 2005. – 344 с.
12. *Городецкий А.С.* Компьютерное моделирование в задачах строительной механики / А.С. Городецкий, М.С. Барабаш, В.Н. Сидоров. – Москва: АСВ, 2016. – 337 с.
13. SCADOffice. Версия 21. Вычислительный комплекс SCAD ++ / В.С. Карпиловский, Э.З. Криксунов, А.А. Маляренко [и др.]. – Москва: СКАД СОФТ, 2015. – 848 с.
14. *Перельмутер А.В.* Расчетные модели сооружений и возможность их анализа / А.В. Перельмутер, В.И. Сливкер. – Москва: ДМК Пресс, 2007. – 600 с.
15. *Скорук Л.* Поиск эффективных расчетных моделей ребристых железобетонных плит и перекрытий / Л. Скорук // CADmaster. – 2004. – № 3. – С. 78–83.
16. Вычислительный комплекс SCAD в учебном процессе. Статический расчет / А.А. Семенов, А.И. Габитов, А.А. Маляренко [и др.]. – Москва: АСВ, СКАД СОФТ, 2016. – 242 с.
17. *Лоскутов И.С.* Монолитные железобетонные кессонные перекрытия [Электронный ресурс] / И.С. Лоскутов // DWG.ru: Железобетонные конструкции. – URL: <https://dwg.ru/lib/2046> (дата обращения: 24.10.2021).
18. Плоские безбалочные железобетонные перекрытия: методическое пособие [Электронный ресурс]. – Москва, 2017. – URL: https://www.faufcc.ru/upload/methodical_materials/mp60_2017.pdf (дата обращения 24.10.21).
19. Многогранная опалубка из ABS – пластика для ребристых плит перекрытия. Skydome. Система для двусторонних перекрытий [Электронный ресурс]. URL: https://www.geoplastglobal.com/sites/default/files/katalog_skydome_ru.pdf (дата обращения 24.10.21).

References

1. *Vahnenko P.F., Hilobok V.G., Andrejko N.T., Jarovoi M.L.* Calculation and construction of parts of residential and public buildings. The designer's reference book. Kiev: Budivel'nik Publ.; 1987 (in Russian).
2. *Davydov S.S., Zhiron A.S., Ivanova I.I.* Guide to reinforced concrete and stone structures. Moscow: MIIT Publ.; 1975 (in Russian).
3. *Ivanov-Dyatlov I.G.* Reinforced concrete structures Moscow, Leningrad: Ministry of Public Utilities of the RSFSR; 1950 (in Russian).
4. *Linovich L.E.* Calculation and construction of parts of civil buildings. Kiev: Budivel'nik Publ.; 1972 (in Russian).

5. *Ulitskiy I.I., Rivkin S.A., Samoletov M.V., Dykhovichnyi A.A., Frenkel' M.M., Kretov V.I.* Reinforced concrete structures. Kiev: Budivel'nik Publ.; 1972 (in Russian).
6. *Malakhova A.N.* Monolithic caisson floors of buildings. Vestnik MGSU. 2013;(1):79–86 (in Russian).
7. *Mozgolov M.V., Turanova A.V.* On the effectiveness of oblique caisson reinforced concrete floors. Gradostroitel'stvo i arkhitektura = Urban construction and architecture. 2021;11(3):20–25 (in Russian). <https://doi.org/10.17673/Vestnik.2021.03.03>
8. *Alyamovskiy A.A.* Engineering calculations in SolidWorks Simulation. Moscow: DMK Press Publ.; 2019 (In Russian).
9. *Gorbatov S.V., Kabantsev O.V., Plotnikov A.I., Rodina A.Yu., Senin N.I., Filimonova E.A., Domarova E.V.* Design of load-bearing structures of a multi-storey frame building. Moscow: ASV Publ.; 2016 (in Russian).
10. *Gorodetskiy A.S., Batrak L.G., Gorodetskiy D.A., Laznyuk M.V., Yusipenko S.V.* Calculation and design of structures of high-rise buildings made of monolithic reinforced concrete. Kiev: Fact Publ.; 2004 (in Russian).
11. *Gorodetskiy A.S., Evzerov I.D.* Computer models of structures. Kiev: Fact Publ.; 2005. (in Russian).
12. *Gorodetskiy A.S., Barabash M.S., Sidorov V.N.* Computer modeling in problems of structural mechanics. Moscow: ASV Publ.; 2016 (in Russian).
13. *Karpilovskiy V.S., Kriksunov E.Z., Malyarenko A.A., Fialko S.Yu., Perel'muter A.V., Perel'muter M.A.* SCAD Office. Version 21. The SCAD ++computing complex. Moscow; SKAD SOFT Publ.; 2015 (in Russian).
14. *Perel'muter A.V., Slivker V.I.* Design models of structures and the possibility of their analysis. Moscow: DMK Press Publ.; 2007 (in Russian).
15. *Skoruk L.* Search for effective computational models of ribbed reinforced concrete slabs and floors. CADmaster. 2004;(3):78–83 (in Russian).
16. *Semenov A.A., Gabitov A.I., Malyarenko A.A., Poryvaev I.A., Safiullin M.N.* The SCAD computing complex in the educational process. Static calculation. Moscow: ASV Publ., SKAD SOFT Publ.; 2016. (in Russian).
17. *Loskutov I.S.* Monolithic reinforced concrete coffered floors. DWG.ru [Internet]. Available from: <https://dwg.ru/lib/2046> (in Russian).
18. Flat girderless reinforced concrete floors: a methodological guide [Internet]. Moscow; 2017. Available from: https://www.faufcc.ru/upload/methodical_materials/mp60_2017.pdf (in Russian).
19. Reusable formwork made of ABS plastic Skydome. System for coffered floors [Internet]. Available from: https://www.geoplastglobal.com/sites/default/files/katalog_skydome_ru.pdf (in Russian).

Информация об авторах / Information about the authors

Михаил Валентинович Мозголов, канд. техн. наук, доцент кафедры «Строительное производство» Коломенского института (филиала) ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет», Коломна
e-mail: mvmozgolov@yandex.ru

Mikhail V. Mozgolov, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor of the Construction Production Department, Kolomna Institute (branch), Moscow Polytechnic University, Kolomna
e-mail: mvmozgolov@yandex.ru

Елизавета Вадимовна Козлова✉, студент 3-го года обучения направления «Строительство» Коломенского института (филиала) ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет», Коломна
e-mail: lizakozlova2014@gmail.com

Elizaveta V. Kozlova✉, 3rd year student on "Construction", Kolomna Institute (branch), Moscow Polytechnic University, Kolomna
e-mail: lizakozlova2014@gmail.com

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author