

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА



УДК 692.522.2

ВОПРОСЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАСЧЕТНЫХ СЕЧЕНИЙ ПЕРЕКРЫТИЙ ЭФФЕКТИВНЫХ ФОРМ

Т.Р. Баркая, С.Л. Субботин, Л.С. Чернокожева, В.А. Томашова
Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Баркая Т.Р., Субботин С.Л.,
Чернокожева Л.С., Томашова В.А., 2024

Аннотация. Рассмотрено несколько способов создания расчетной модели ребристых перекрытий путем разбиения на конечные элементы в программно-вычислительном комплексе SCAD Office. Выполнены расчеты соответствующих моделей опертого по контуру перекрытия, произведены сопоставления результатов их расчета с аналитическим расчетом. Сделаны выводы о целесообразности применения рассмотренных вариантов моделирования перекрытия на практике.

Ключевые слова: железобетон, кессонные перекрытия, пустотные перекрытия, компьютерное моделирование, программно-вычислительный комплекс, расчетная модель, метод конечных элементов.

DOI: 10.46573/2658-7459-2024-2-5-12

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время значительную долю в строительстве занимает монолитное домостроение. На рынке можно увидеть множество опалубочных систем, позволяющих возводить облегченные монолитные перекрытия эффективных форм. Однако все еще актуальными остаются вопросы создания компьютерных моделей таких перекрытий.

Выполним статический расчет нескольких моделей свободно опертого по контуру монолитного перекрытия эффективной формы: кессонного (рис. 1а) и многопустотного (рис. 1б). Перекрытие имеет в плане квадратную форму с размерами 9×9 м и нагружено равномерно распределенной нагрузкой с расчетным значением $7,06 \text{ кН/м}^2$. В качестве результатов расчета рассмотрены перерезывающие силы Q и изгибающие моменты M в нормальных сечениях балок перекрытия.

Компьютерные модели перекрытий реализованы в программно-вычислительном комплексе (ПВК) SCAD Office с использованием стержневых и оболочечных конечных элементов (КЭ). Оценка полученных результатов расчета произведена на основании сравнения с итогами аналитического расчета, выполненного в соответствии с рекомендациями источников [2–4] как для обыкновенной плиты, опертой по контуру.

Среди ряда моделей, рассмотренных в работах [1, 5–7], для исследования выбраны три способа моделирования кессонного перекрытия и один многопустотного. Поперечные сечения балок этих перекрытий с разбиением их на конечные элементы показаны на рис. 2. Стенка во всех моделях моделируется КЭ типа 5 (пространственный стержень), полка в

сечениях, продемонстрированных на рис. 2а, б и г, – КЭ типа 44 (прямоугольная оболочка) и в сечении, приведенном на рис. 2в, – стержневым КЭ типа 5. Разбиение полки с шагом, равным $\frac{1}{4}$ шага ребер монолитных перекрытий, необходимо для более частой передачи усилий между КЭ и более правильной работы полки в ячейке, образованной пересекающимися ребрами.

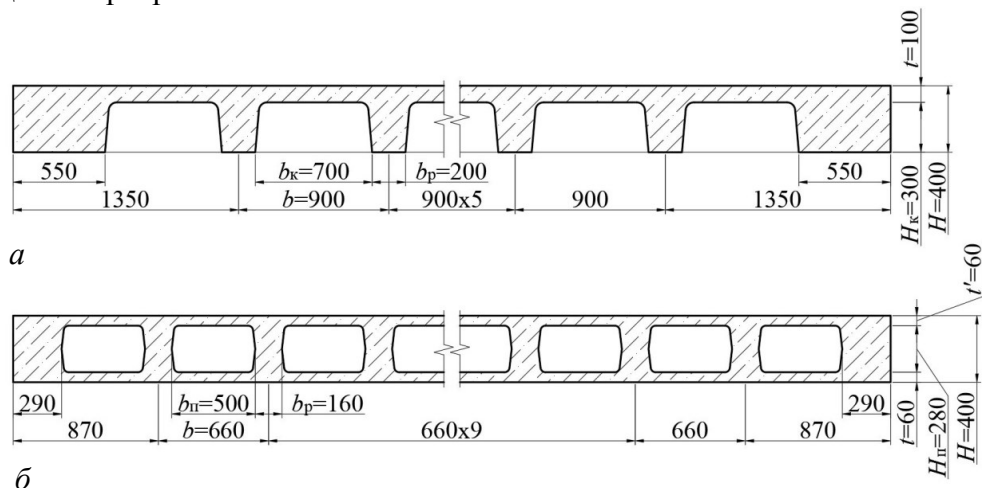


Рис. 1. Поперечное сечение монолитного перекрытия: а – кессонного; б – многопустотного

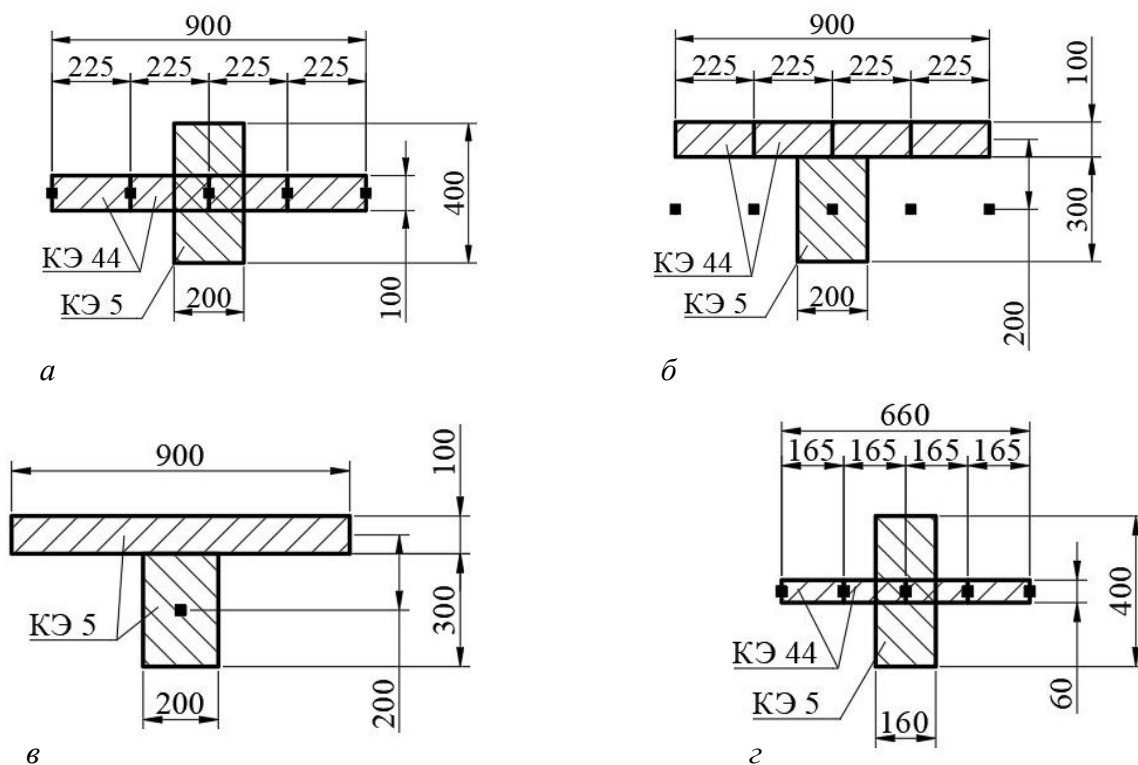


Рис. 2. Схемы поперечных сечений балок в составе перекрытия:
а, б, в – кессонного; г – многопустотного

В целях более корректного отражения жесткостных характеристик перекрытия в конечные элементы полок таврового сечения (Т-сечения) двух моделей (см. рис. 2б, в) введены смещения срединной поверхности оболочечных элементов и жесткие вставки в стержневые конечные элементы соответственно.

Кроме того, следует отметить, что ввиду малых фактических размеров полки в свету между ребрами ($0,7 \times 0,7$ м в кессонном перекрытии и $0,5 \times 0,5$ м в многопустотном) при рассмотрении модели перекрытия с сечениями балок по схеме, показанной на рис. 2а, нет необходимости использовать цилиндрическую жесткость плиты, как это было выполнено в работе [6].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для проведения *аналитического расчета*, результаты которого будут служить основой для дальнейшего (сравнительного) анализа, перекрытие разбивается в двух направлениях на условные балки пролетами a и b (рис. 3). При равных жесткостях их можно рассматривать как отдельные шарнирно опертые балки, нагруженные равномерно распределенными нагрузками: балку $a_1 - q_{a1}$, балку $a_2 - q_{a2}$ и т. д.; балку $b_1 - q_{b1}$, балку $b_2 - q_{b2}$ и т. д.

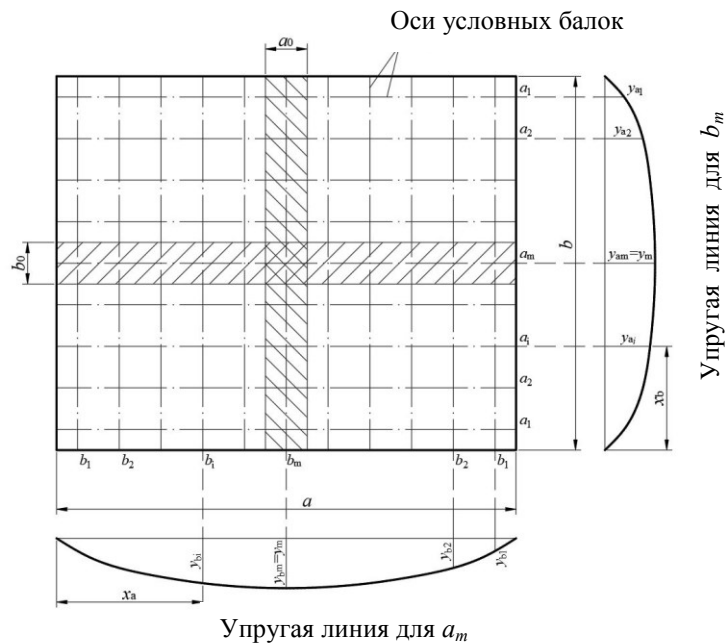


Рис. 3. Схема для аналитического расчета перекрытия

Вышеназванные нагрузки можно найти из выражений:

$$\begin{aligned} q_{ai} &= \frac{y_{ai}}{y_m} b_0 q_a, \\ q_{bi} &= \frac{y_{bi}}{y_m} a_0 q_b, \end{aligned} \quad (1)$$

где y_{ai} , y_{bi} – максимальный прогиб в середине пролета i -й балки с пролетами a и b соответственно; b_0 и a_0 – ширина условной балки пролетами a и b соответственно;

q_a, q_b – условные нагрузки, действующие на средние условные балки a_m и b_m соответственно.

Величины нагрузок q_a и q_b в формуле (1) найдены из двух условий:

$$\begin{cases} q_a = \frac{b^4}{a^4}, \\ q_b = \frac{a^4}{b^4}, \\ q = q_a + q_b, \end{cases} \quad (2)$$

где q – полная нагрузка на перекрытие.

Перекрытие имеет одинаковую геометрию в двух направлениях. Поскольку $a = b = 9$ м, то из условий (2) следует, что нагрузки q_a и q_b тоже равны. И тогда внутренние усилия в балках b_i равны усилиям в соответствующих балках a_i .

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Кессонное перекрытие. Модель 1, реализованная по схеме, приведенной на рис. 2а, не повторяет геометрию кессонного перекрытия (крестовое сечение). Существенное преимущество такой модели заключается в том, что полка располагается в средней по высоте части, то есть в уровне нейтральной оси. В моделях без смещения полки последняя преимущественно играет роль распределяющего нагрузку элемента, принимая на себя незначительную долю изгибающего момента в Т-сечении.

Результаты расчета показали, что в модели без смещения полки (см. рис. 2а) величины изгибающих моментов в стенке, то есть полученные в стержневых КЭ модели, отличаются от аналитического расчета не более чем на 10,0 %. Полученное на основании этих изгибающих моментов требуемое продольное армирование в Т-сечении также отличается не более чем на 10 %. При предварительном подборе армирования (до учета нелинейной работы конструкции) такое отклонение можно допустить.

Перерезывающие силы, полученные в стержневых КЭ модели 1, имеют значительное отклонение от результатов аналитического расчета (более 15,0 %) как в меньшую, так и в большую сторону. Однако эти отклонения велики в пролете и имеют заниженный характер, что незначительно влияет на анализ поперечного армирования, так как фактические величины перерезывающей силы в пролете малы. Но стоит иметь в виду недопустимое завышение перерезывающих сил в опорной части (до 45,0 %), которое вызвано, предположительно, особенностями реализации опорного контура перекрытия и отличного от рядового шага ребер перекрытия в поперечном направлении.

В модели 2, реализованной по схеме, показанной на рис. 2б, нельзя принять внутренние усилия в стержневых КЭ стенки за усилия в Т-сечении, поскольку введение эксцентриситета между стенкой и полкой приводит к распределению изгибающего момента с появлением продольных усилий: сжимающего в полке и растягивающего в стенке. То же самое справедливо и для модели 3, построенной в соответствии со схемой, приведенной на рис. 2в.

В моделях со смещением полок величина Q в Т-сечении найдена как сумма перерезывающих сил в стенке и полке. Величина перерезывающей силы в полке модели 2 получена умножением перерезывающего усилия в среднем узле полки на ее ширину. Величина M для моделей 2 и 3 определена как сумма моментов, возникающих в полке и стенке, и произведения продольной силы в стенке на расстояние между центрами тяжести полки и стенки. При этом изгибающий момент в полке модели 2 получен как произведение изгибающего момента для оболочек в среднем узле полки на ее ширину.

Изгибающие моменты в балках модели 2 отличаются от аналитического расчета не более чем на 9,3 %, причем отрицательное отклонение не превышает 5,0 %. Более точной показала себя модель 3, в ней отклонения изгибающих моментов в середине пролета балок не превышают 5,0 % (такую точность считаем достаточной). При этом в обеих моделях можно отметить увеличение отклонений величины M от аналитического расчета при приближении к приопорным зонам: в модели 2 – до +9,4 %, в модели 3 – до +28,2 %. Обе модели со смещением полки показывают значительные отклонения в величинах перерезывающих сил. Так, в приопорной зоне в модели 2 они достигают 58 %, а в модели 3 – 65,4 %.

Получение полных внутренних усилий на основании данных расчета КЭ полок и стенок Т-сечения достаточно трудоемко. Поэтому отметим, что при определении изгибающих моментов в сечении балки без учета доли момента, приходящегося на полку, но с принятием во внимание продольного усилия в стенке, умноженного на эксцентриситет полки относительно стенки, модели 2 и 3 дают приемлемые результаты: в середине пролета отклонения составляют от –4,0 % до +6,2 %. Только в первой от опорного контура балке a_1 изгибающий момент снижен на 13,6 %.

Подбор армирования в моделях 2 и 3 произведен для стержневых КЭ стенки с помощью постпроцессора SCAD Office. Полученные требуемые величины площадей нижнего продольного армирования для обеих моделей практически не отличаются от величин, полученных в аналитическом расчете. Для всех балок максимальное армирование в середине пролета определено с «запасом» не более 3,3 %.

Многопустотное перекрытие. При реализации расчетных схем многопустотного перекрытия, аналогичных схемам, показанным на рис. 2б и в, возникают дополнительные сложности с обработкой результатов статического расчета. Так, для получения полного момента в балке двутаврового сечения (2Т-сечения) необходимо учесть изгибающие моменты, возникающие в стенке и двух полках, а также продольные усилия (сжимающее в верхней полке и растягивающее в нижней). В связи с этим для многопустотного перекрытия рассмотрена только одна модель с крестообразным сечением без вмещения полки (см. рис. 2г) и внутренние усилия в сечении балок определены так же, как и для модели 1 кессонного перекрытия.

Согласно результатам расчета в зонах, отдаленных от опорного контура, изгибающие моменты в балках получены с отклонениями до 10,0 %. В приопорной зоне балок a_1 , a_2 и a_3 величина M превышает значения из аналитического расчета более чем на 10,0 % и достигает 30,2 %. В пролете перерезывающие силы превышены не более чем на 10,0 %, а на опоре их величины значительно превосходят контрольные (до 74,7 %). Требуемое продольное армирование балок многопустотного перекрытия на основании полученных в сечении изгибающих моментов M отличается от результатов аналитического расчета тоже не более чем на 10,0 %.

Величины изгибающих моментов, действующих в стержневых КЭ схемы в пролетной части, отличаются от контрольных более чем на –10,0 %, при этом в середине пролета отклонения достигают –16,5 %. Такие величины M не следует использовать для подпора продольного армирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наиболее рационально при выполнении предварительно статического расчета и первичного подбора продольного армирования использовать схемы без смещения полков (см. рис. 2а, з). Это обусловлено более простой обработкой результатов расчета компьютерной модели и возможностью применять для подбора армирования внутренние усилия, полученные непосредственно в стержневых КЭ стенки. При этом необходимо более подробно изучить зависимость распределения усилий между КЭ от соотношения жесткостей стенки и полки.

На основании рассмотренных примеров можно говорить о том, что первичный подбор продольного армирования при использовании моделей с поперечным сечением без смещения полки (крестовым сечением) допускается выполнять на основании внутренних усилий, действующих в КЭ стенки.

Выполнение статического расчета на основании моделей с Т-сечением оказывается более трудоемким, но дает более точные величины изгибающих моментов в сечении балки. Для упрощения при первичном подборе продольного армирования можно использовать в качестве изгибающих моментов в Т-сечении изгибающий момент в КЭ стенки, увеличенный на пару сил, которую можно определить как произведение продольной силы в стенке на расстояние между центрами тяжести стенки и полки.

Выполнение расчетов для нахождения перерезывающих сил в сечениях балок в составе перекрытий эффективных сечений требует более глубокого изучения. Многие рассмотренные расчетные модели перекрытия показали хорошие результаты при определении перерезывающих сил в пролете. Значительные отклонения выявлены в зонах с малыми значениями перерезывающих сил и в зонах, приближенных к опорному контуру.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белобородов Е.В., Созонов П.С. Анализ способов моделирования железобетонных монолитных перекрытий на примере кессонных // *Тенденции развития науки и образования*. 2023. № 95. С. 127–130.
2. Глотов Д.А., Лоскутов И.С., Кантур О.В. Монолитные пустотные перекрытия в строительстве зданий // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2012. № 3. С. 66–71.
3. Грановский А.В., Чупанов М.Р. Экспериментальные исследования несущей способности плит перекрытий кессонного типа // *Промышленное и гражданское строительство*. 2015. № 5. С. 43–48.
4. Залигер Р. Железобетон. Его расчет и проектирование / пер. с нем. Л.В. Рейнберга, Н.Н. Чечулина. М.; Л.: Государственное научно-техническое издательство, 1931. 671 с.
5. Крохин Д.А., Медведев Н.Е. Расчет и проектирование кессонных перекрытий в ПК ЛИРА-САПР. *Материалы 61-й студенческой научно-технической конференции инженерно-строительного института ТОГУ* / отв. ред. П.И. Егоров. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2021. С. 284–288.
6. Мозголов М.В., Козлова Е.В. Верификация моделей SCAD железобетонного кессонного перекрытия на основе аналитического метода расчета, учитывающего пролеты и жесткость // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2023. № 2. С. 29–40.
7. 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.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

БАРКАЯ Темур Рауфович – кандидат технических наук, заведующий кафедрой конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: btrs@list.ru

СУББОТИН Сергей Львович – доктор технических наук, профессор кафедры конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: sbtn@yandex.ru

ЧЕРНОКОЖЕВА Любовь Сергеевна – магистрант кафедры конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: Luba-99-Tcher-8790@mail.ru

ТОМАШОВА Виктория Андреевна – магистрант кафедры конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: tomashova3@gmail.com

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Баркая Т.Р., Субботин С.Л., Чернокожева Л.С., Томашова В.А. Вопросы компьютерного моделирования расчетных сечений перекрытий эффективных форм // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2024. № 2 (22). С. 5–12.

**COMPUTER MODELING ISSUES OF DESIGN SECTIONS
OF EFFECTIVE FORMS OF FLOORS**

T.R. Barkaya, S.L. Subbotin, L.S. Chernokozheva, V.A. Tomashova
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. Several ways of creating a computational model of ribbed overlaps by splitting into finite elements in the SCAD Office software and computing complex are considered. Calculations of the corresponding models of the overlap supported along the contour have been performed, and comparisons of the results of their calculation with the analytical calculation have been made. Conclusions are drawn about the expediency of using the considered overlap modeling options in practice.

Keywords: reinforced concrete, caisson floors, hollow-core floors, computer modeling, software and computing complex, calculation model, finite element method.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

BARKAYA Temur Raufovich – Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Structures and Constructions, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: btrs@list.ru

SUBBOTIN Sergey Lvovich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Structures and Constructions, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: sbtn@yandex.ru

CHERNOKOZHEVA Lyubov Sergeevna – Master's Degree Student of the Department of Structures and Constructions, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: Luba-99-Tcher-8790@mail.ru

TOMASHOVA Viktoria Andreevna – Master’s Degree Student of the Department of Structures and Constructions, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: tomashova3@gmail.com

CITATION FOR AN ARTICLE

Barkaya T.R., Subbotin S.L., Chernokozheva L.S., Tomashova V.A. Computer modeling issues of design sections of effective forms of floors // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2024. No. 2 (22), pp. 5–12.

УДК 004.415

АНАЛИЗ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СЕЧЕНИЙ ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ

Т.Р. Баркая, С.Л. Субботин, В.А. Томашова, Л.С. Чернокожева
Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Баркая Т.Р., Субботин С.Л.,
Томашова В.А., Чернокожева Л.С., 2024

Аннотация. Рассмотрена возможность реализации автоматизированного построения эпюры материалов для изгибаемых железобетонных линейных элементов. Предложена методика, позволяющая формировать графики действующих и предельных изгибающих моментов, распределенных по длине статически неопределимых балок. Приведены результаты сравнительного анализа со значениями, полученными с помощью программно-вычислительного комплекса SCAD Office.

Ключевые слова: эпюра, изгибающий момент, автоматизация, железобетонные конструкции, эпюра арматуры, эпюра материалов.

DOI: 10.46573/2658-7459-2024-2-12-18

ВВЕДЕНИЕ

Экономия материалов при проектировании строительных конструкций за счет повышения точности расчетов всегда являлась одной из основных инженерных задач. Важно реализовать это без потери скорости проектирования. Все чаще здесь отдают предпочтение автоматизации путем применения программных средств.

Оптимально подобранным армированием можно считать такое, при котором несущая способность сечения задействована полностью. Это можно выразить через коэффициент использования – отношение предельного значения величины момента к значению действующего. По длине железобетонного элемента изгибающий момент различен, поэтому назначение единого армирования по участку с его максимальным значением приведет к перерасходу арматуры на остальных участках. Перед проектировщиком ставится задача назначения армирования с учетом экономии арматуры и целесообразности в свете технологичности и трудоемкости.