

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

BUILDING CONSTRUCTIONS, BUILDINGS AND ENGINEERING STRUCTURES



УДК 624.012704-52

Научная статья

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-1-15-26>

Оптимизация положения опор под железобетонной плитой произвольной конфигурации

Е.А. Ефименко

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

ovekaterina90@yandex.ru

EDN: XWYIHN

Аннотация

Введение. Ряд исследований в области рационального проектирования зданий и сооружений различного назначения, выполненных в последние годы, посвящены вопросам рационального расположения вертикальных элементов — колонн или опор. При этом большинство современных исследований и публикаций посвящены именно вопросам рационального расположения опор применительно к повышению эффективности балок. Что же касается исследований поведения железобетонных плит при вариативном расположении опор под ними, то данный вопрос в современных исследованиях освещен весьма скудно. Целью нынешнего исследования является именно выявление поведения плитных железобетонных конструкций здания в условиях вариативного расположения основных опор.

Материалы и методы. В данном численном эксперименте исследована железобетонная плита произвольной конфигурации с заданными толщиной h , классом бетона с его характеристиками, а также классом арматуры и, соответственно, характеристиками арматуры. Помимо этого, решено задаться расстояниями от центров тяжести арматуры верхнего и нижнего ряда до поверхности плиты снизу и сверху a_x, a'_x, a_y, a'_y . Для плиты задано n количество колонн. При этом количество колонн считается известным, а вот их положение может меняться. Кроме того, среди общего количества колонн могут быть выделены некоторые, расположение которых может быть определенным (неизменяемым), в то время как остальные опоры могут менять положение в поле плиты. При этом перед исследователями стоит задача определения именно рационального расположения смещаемых колонн.

Результаты исследования. В данной работе приведены результаты численного эксперимента по выявлению наиболее оптимального (рационального) расположения железобетонных колонн под плитой произвольной конфигурации. В работе на основе сразу нескольких критериев, таких как прогиб, потенциальная энергия деформации и расход арматурных изделий, сделан анализ рационального расположения опор под плитой и приведены функциональные зависимости изменения приведенных ранее параметров.

Обсуждение и заключения. На основе собранных результатов численного эксперимента выполнен анализ поведения железобетонных плит заданной толщины при варьировании расположения опор под данной плитой, а также проанализированы и собраны в функциональные зависимости изменения параметров работы плиты.

Ключевые слова: бетон, железобетон, опора, колонна, плита, арматура, прогиб, потенциальная энергия деформации, расход арматуры, рационализация

Для цитирования. Ефименко Е.А. Оптимизация положения опор под железобетонной плитой произвольной конфигурации. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2024;3(1):15–26. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-1-15-26>

Optimisation of Supports' Position for a Reinforced Concrete Slab of Arbitrary Geometry

Ekaterina A. Efimenko  

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

 ovekaterina90@yandex.ru

Abstract

Introduction. A number of research held in recent years on rational design of buildings and structures built for different purposes study the rational position of the vertical members — columns or supports. However, the majority of up-to-date research and publications focus on elucidating the rational position of the supports in the context of improving the efficiency of the beams. Whereas the behaviour of the reinforced concrete slabs affected by changing the position of the supports is not covered well enough in the modern research. The present study is targeted exactly at revealing the behaviour of the reinforced concrete slab structures of a building in case of varying position of the main supports.

Materials and methods. During the present numerical experiment, a reinforced concrete slab of arbitrary geometry with the given thickness h , the concrete grade with the respective properties and the reinforcement possessing the properties according to its class, has been investigated. Additionally, it was decided to set the distance magnitudes from the centers of gravity of the upper and lower row of reinforcement to the bottom and top surface of the slab a_x , a'_x , a_y , a'_y . The number of columns n was set for the slab. It was considered that the number of columns was known, but their position could change. Moreover, among the total number of columns, there were distinguished the certain ones having the definite (constant) position, whereas the remaining supports could change their position within the slab area. Bearing in mind the above, the researchers were to solve the problem of rational position of the moveable columns.

Results. This paper presents the results of the numerical experiment on identifying the most optimal (rational) position of the reinforced concrete columns supporting a slab of the arbitrary geometry. Based on the several parameters at once, such as deflection, potential strain energy and consumption of the reinforcement products, the analysis of the rational position of the supports under the slab was made and functional dependences on changing the above mentioned parameters have been presented in the work.

Discussion and conclusion. Based on the results obtained in the numerical experiment, the analysis of the behaviour of the reinforced concrete slabs of a set thickness upon changing the position of the supports under the slab was made and the changes of the slab operational parameters were analysed and compiled into the functional dependences.

Keywords: concrete, reinforced concrete, support, column, slab, reinforcement, deflection, potential strain energy, consumption of the reinforcement, rationalisation

For citation. Efimenko EA. Optimisation of Supports' Position for a Reinforced Concrete Slab of Arbitrary Geometry. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2024;3(1):15–26. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-1-15-26>

Введение. В своем научном исследовании 2015 года Т.П. Романова [1] взяла за основу рассмотрение овальной пластины, состоящей из трех слоев покрывающего анизотропного материала, на которую действовала равномерно распределенная нагрузка по поверхности. В данном исследовании оптимизацию было предложено выполнить исходя из вариативного расположения опорного контура. Так было выявлено положение опор, при котором максимальная нагрузка достигала своего предельного значения. В ходе исследования выяснилось, что изменение армирования пластины влечет за собой значительные изменения предельной нагрузки на рассматриваемый элемент. Схожие численные эксперименты были проведены этим же автором в работе [2].

Иностранные авторы К.М. Won и Y.S. Park [3, 4, 5], а также D. Wang [6] в ходе своих численных экспериментов решали задачу поиска оптимального расположения опор под балкой, при котором конструкция покрытия имела бы максимальную или минимальную величину собственных колебаний. Частично в работах [7, 8] также рассмотрена задача уменьшения прогиба и изгибающего момента конструкции железобетонной балки покрытия. Научная статья С.М. Wang [9] также частично посвящена ранее поднятым проблемам оптимизации положения точечных опор и зависимости частоты собственных колебаний конструкции покрытия.

Кроме ранее приведенных авторов, много исследований в области оптимизации были проведены J.H. Son и B.M. Kwak [10], B.P. Wang и J.L. Chen [11].

Основной целью данного научного исследования является изучение работы железобетонной конструкции покрытия, в данном случае — многослойной плиты с целью выявления оптимального расположения точечных опор под данной плитой при наличии некоторых неизменяемых показателей.

Для осуществление поставленной цели научного исследования были решены следующие задачи:

- начата разработка методики выявления оптимального места расположения опор под трехслойной железобетонной плитой заданной конфигурации при использовании стохастических методов расчета;
- составлен примерный метод расчета, направленный на выявление оптимального шага колонн под плитой при использовании детерминистических методов расчета;
- проведено исследование влияния толщины конструкции покрытия, класса бетона и арматуры на положение точечных колонн, которое будет оптимальным для работы конструкции.

Материалы и методы. При определении оптимального расположения точечных опор под плитой в ходе данного численного эксперимента было решено использовать методы Монте-Карло и конечных элементов (МКЭ). С учетом МКЭ плита заданной конфигурации разбивается на определенное число конечных элементов, выявляется положение стационарных опор, а уже далее варьируемые колонны перемещаются в поисках их оптимального положения.

Помимо ранее сказанного важно проверять нумерацию узлов, в которых установлены стационарные опоры для исключения вероятности установки в данных узлах также варьируемых колонн.

Поскольку расчет выполняется неограниченное количество раз, то количество вариантов расположения варьируемых колонн зависит от расположения элементов конечно-элементной сетки и резко возрастает от уменьшения размеров элементов этой сетки.

При выполнении большого количества расчетов был использован следующий алгоритм, представленный в виде блок-схемы (рис. 1).

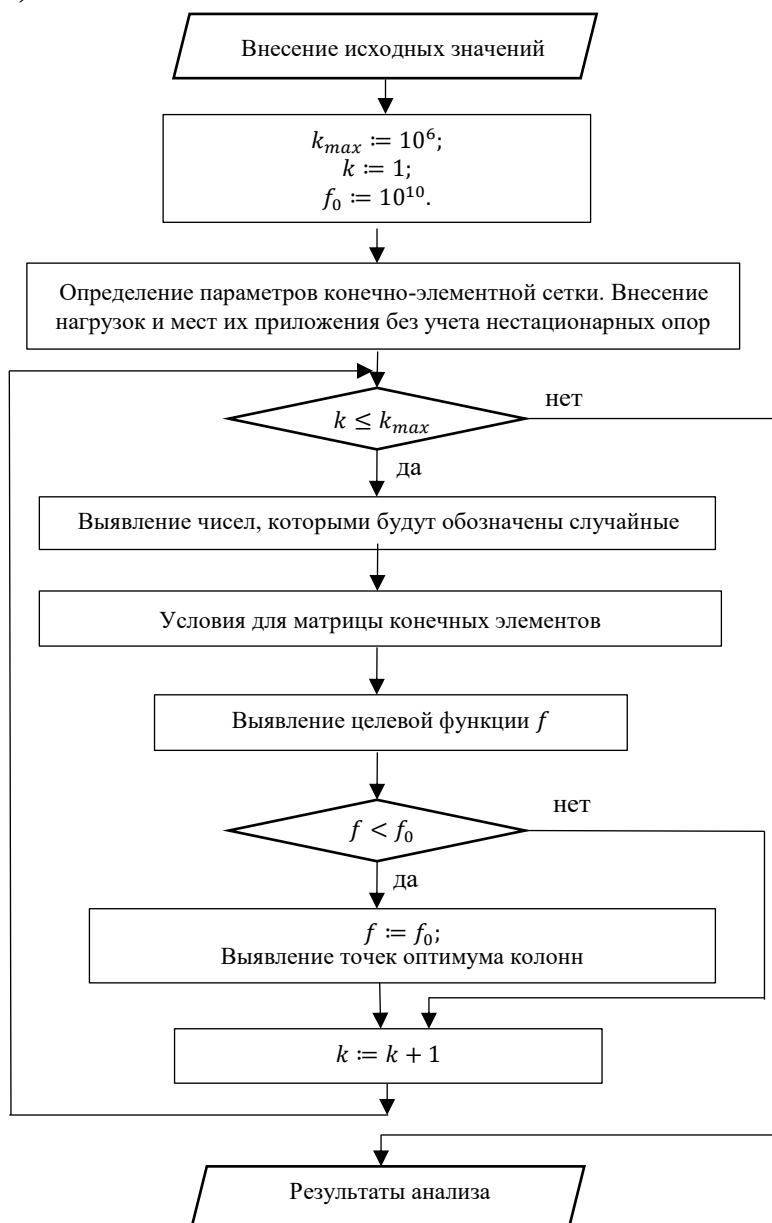


Рис. 1. Блок-схема алгоритма

Согласно СП 63.13330.2018 «СНиП 52-01-2003 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения» расчет на прочность плоских элементов выполняется из условий:

$$\begin{aligned} (M_{x,ult} - M_x)(M_{y,ult} - M_y) - M_{xy}^2 &\geq 0; \\ M_{x,ult} &\geq M_x; \\ M_{y,ult} &\geq M_y; \\ M_{xy,ult} &\geq M_{xy}, \end{aligned} \quad (1)$$

где M_x, M_y — изгибающие моменты; $M_{xy} = H$ — крутящий момент; $M_{x,ult}, M_{y,ult}, M_{xy,ult}$ — предельные моменты.

Крутящие моменты по бетону $M_{bxy,ult}$ и по растянутой продольной арматуре $M_{sxy,ult}$ рассчитаны по формулам:

$$\begin{aligned} M_{bxy,ult} &= 0,1R_b b^2 h, \\ M_{sxy,ult} &= 0,5R_s (A_{sx} + A_{sy}) h_0, \end{aligned} \quad (2)$$

Дальнейший расчет рабочей арматуры по осям x и y ведется на величины изгибающих моментов $M_{x,расч}$ и $M_{y,расч}$ по ранее предложенному алгоритму.

Подобранная таким образом арматура будет удовлетворять условиям:

$$\begin{aligned} M_x + M_{xy} &\leq M_{x,ult}; \\ M_y + M_{xy} &\leq M_{y,ult}. \end{aligned} \quad (3)$$

Расход арматуры в тоннах определяется для плиты по формуле:

$$m_s = \rho \sum_{i=1}^k (A_{sx,i} + A_{sy,i} + A'_{sx,i} + A'_{sy,i}) A_i, \quad (4)$$

где $\rho = 7,8 \text{ т/м}^3$ — плотность стали; A_i — площадь i -го КЭ; $A_{sx,i}$ и $A_{sy,i}$ — подобранные площади поперечного сечения растянутой арматуры в (м^2) на 1 п. м.; $A'_{sx,i}$ и $A'_{sy,i}$ — то же для сжатой арматуры.

Чтобы адаптировать ранее предложенный алгоритм расчета, были введены задачи по плите квадратной конфигурации с тремя точечными опорами. Плита шириной и высотой 10 метров, толщина 20 см, бетон класса В30 ($E_b = 3,25 \cdot 10^4 \text{ МПа}$, $R_b = 17 \text{ МПа}$, $\nu = 0,2$), арматура класса А400 ($R_s = R_{sc} = 350 \text{ МПа}$), распределенная сила $q = 20 \frac{\text{кН}}{\text{м}^2}$, расстояния $a_x = a'_x = a_y = a'_y = 3 \text{ см}$. Расчет проводился на программном комплексе ЛИРА-САПР 2013. Расчетная схема показана на рис. 2.

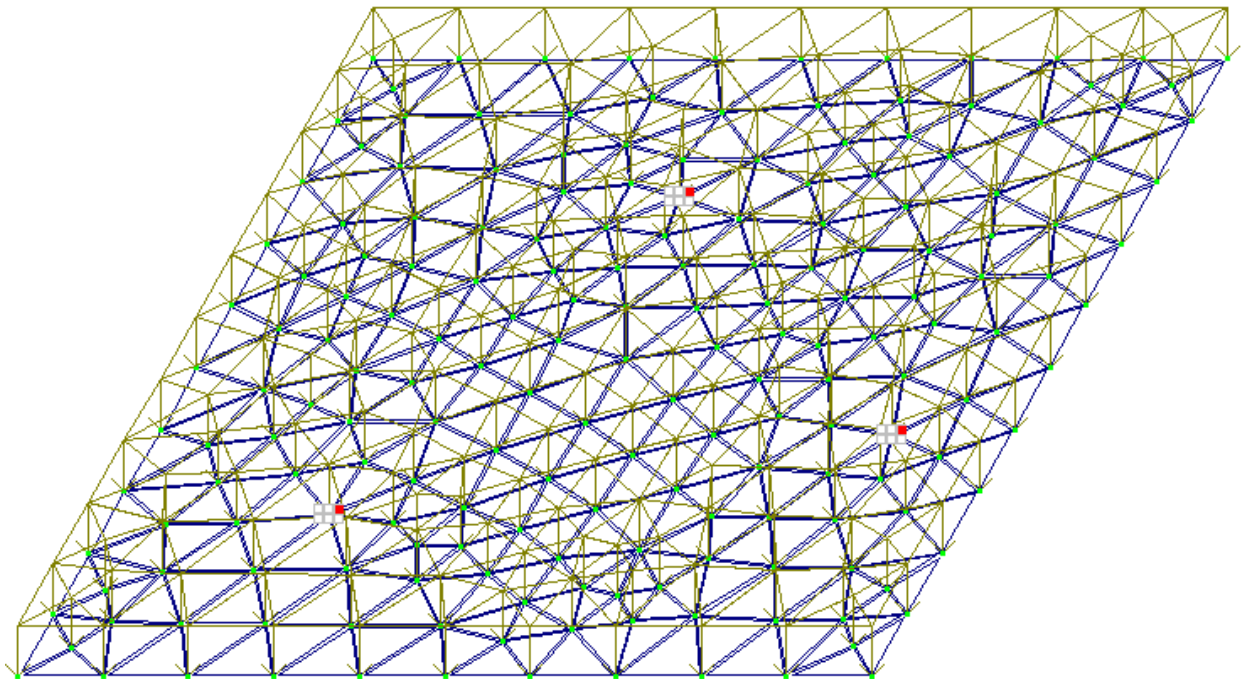


Рис. 2. Расчетная схема в ПК ЛИРА-САПР

На рис. 3 и рис. 4 показаны изополя перемещений, решенные в комплексах пакета Matlab и в ПК ЛИРА.

На рис. 5–10 представлены мозаики внутренних усилий, полученные в Matlab и в ПК ЛИРА.

Значимое отличие в максимальных величинах внутренних усилий можно объяснить тем, что колонны рассмотрены в данном случае как точечные. Одновременно видна разительная схожесть результатов, полученных для элементов, находящихся в середине плиты.

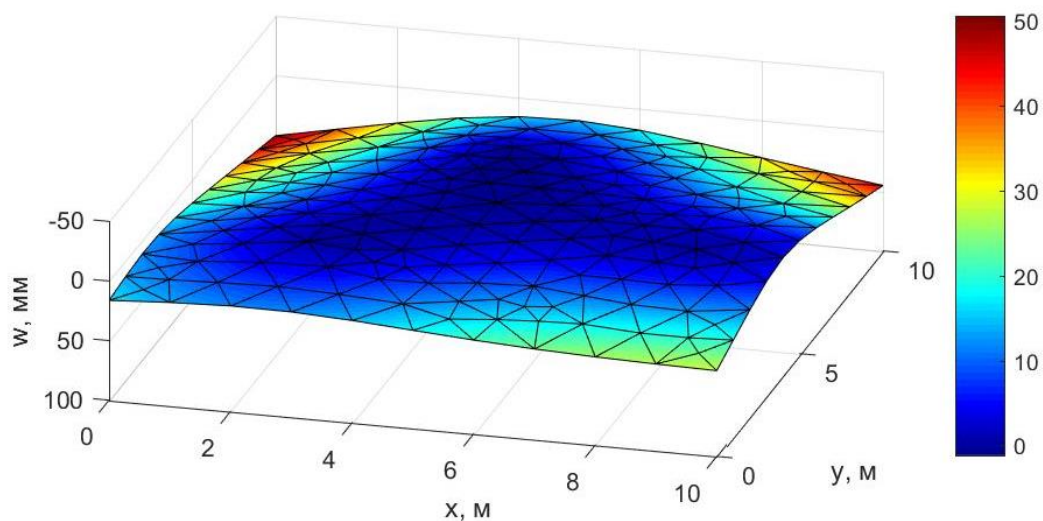


Рис. 3. Изополя вертикальных перемещений, полученные в ПК Matlab

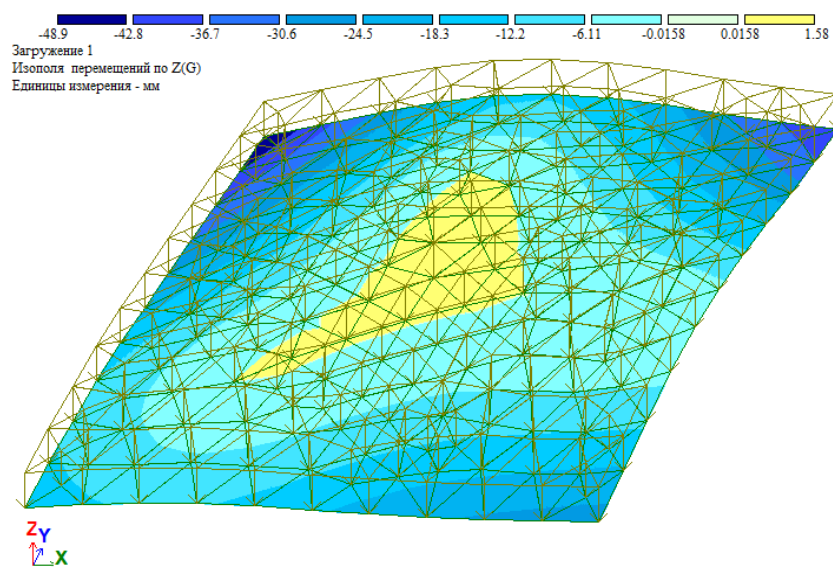


Рис. 4. Изополя вертикальных перемещений, полученные в ПК ЛИРА

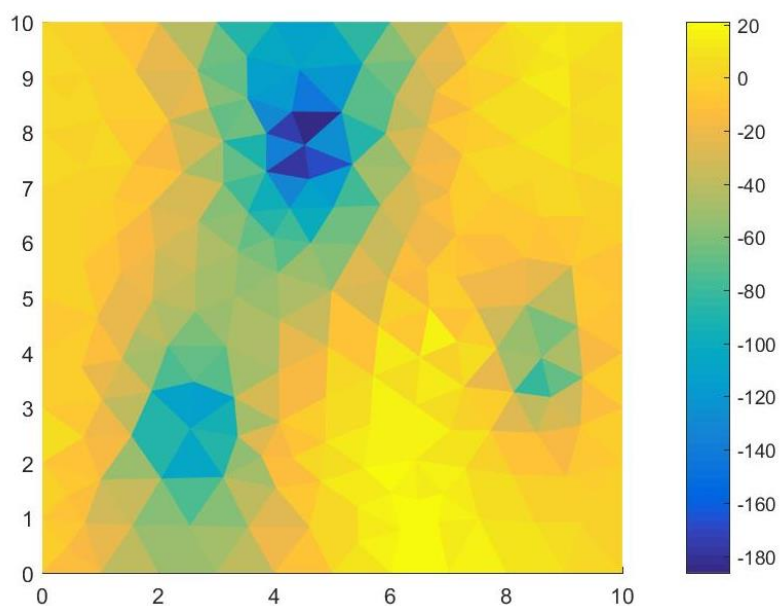


Рис. 5. Мозаика изгибающих моментов M_x в ПК Matlab

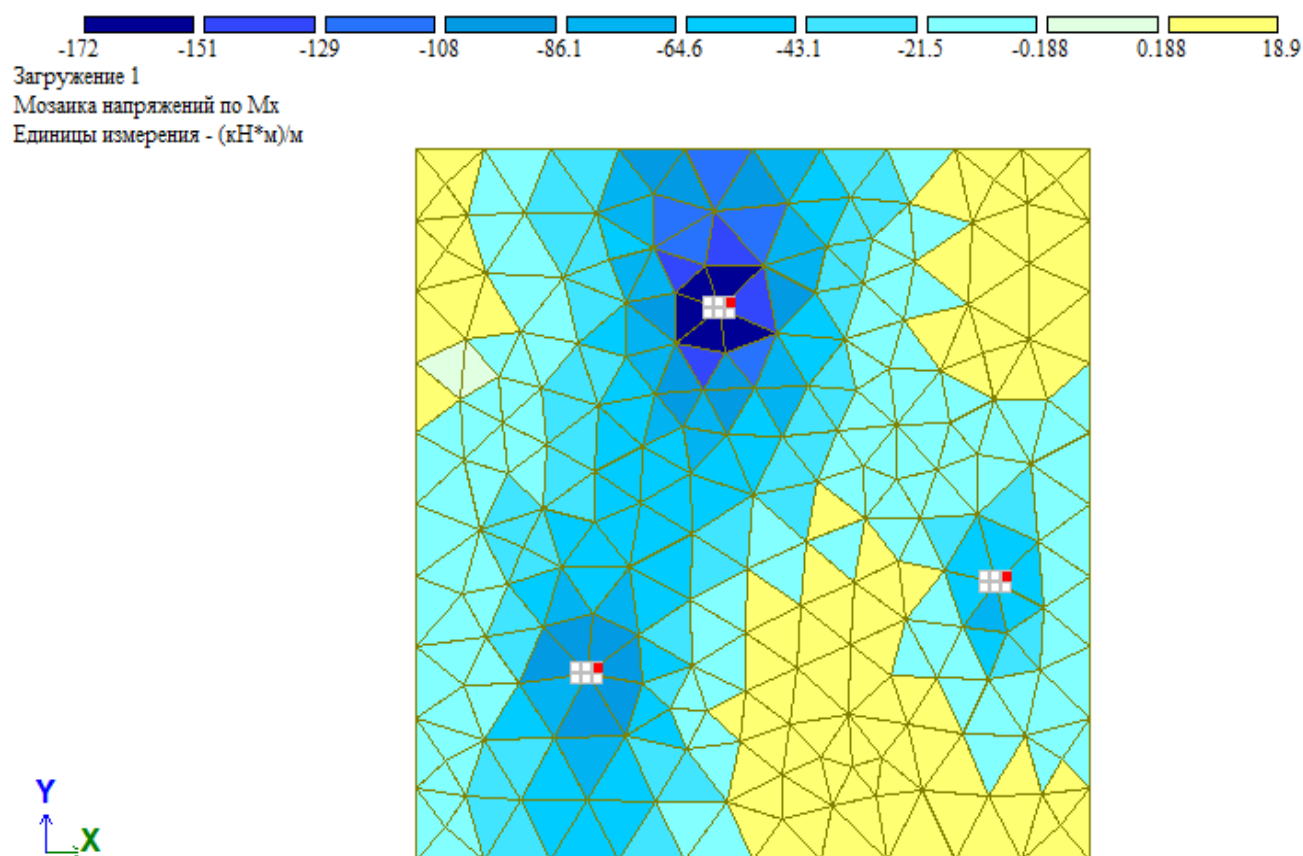


Рис. 6. Мозаика изгибающих моментов M_x в ПК ЛИРА

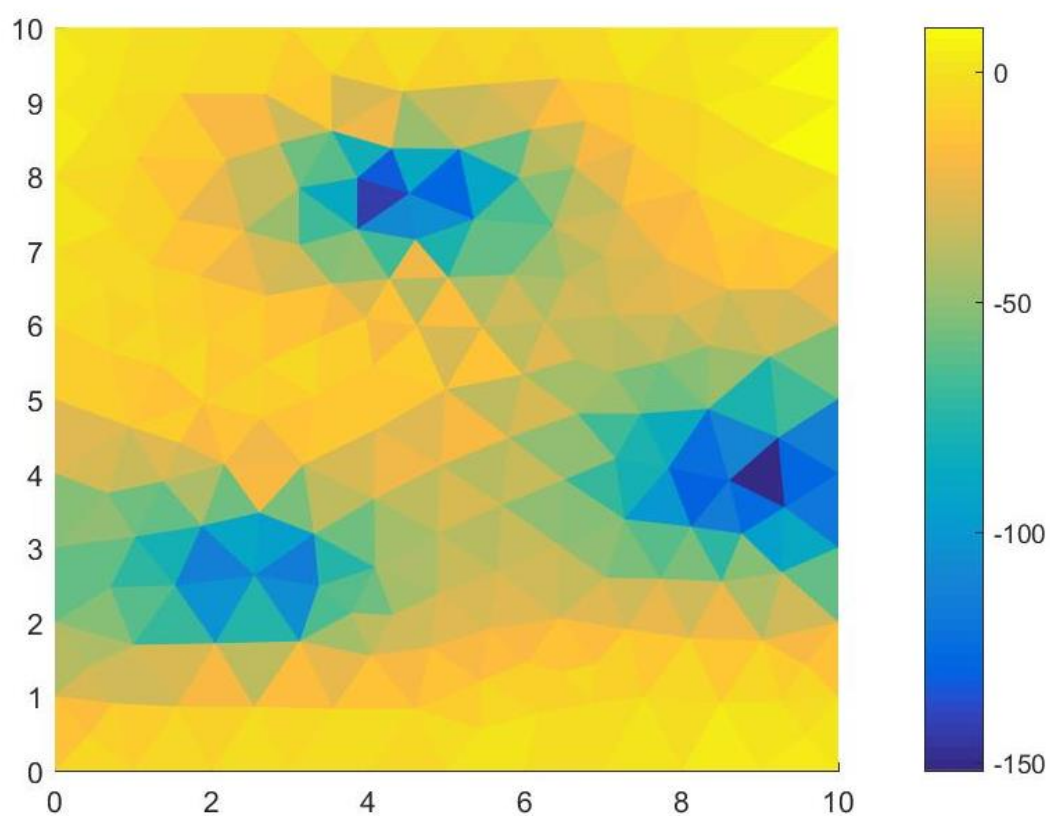


Рис. 7. Мозаика изгибающих моментов M_y в ПК Matlab

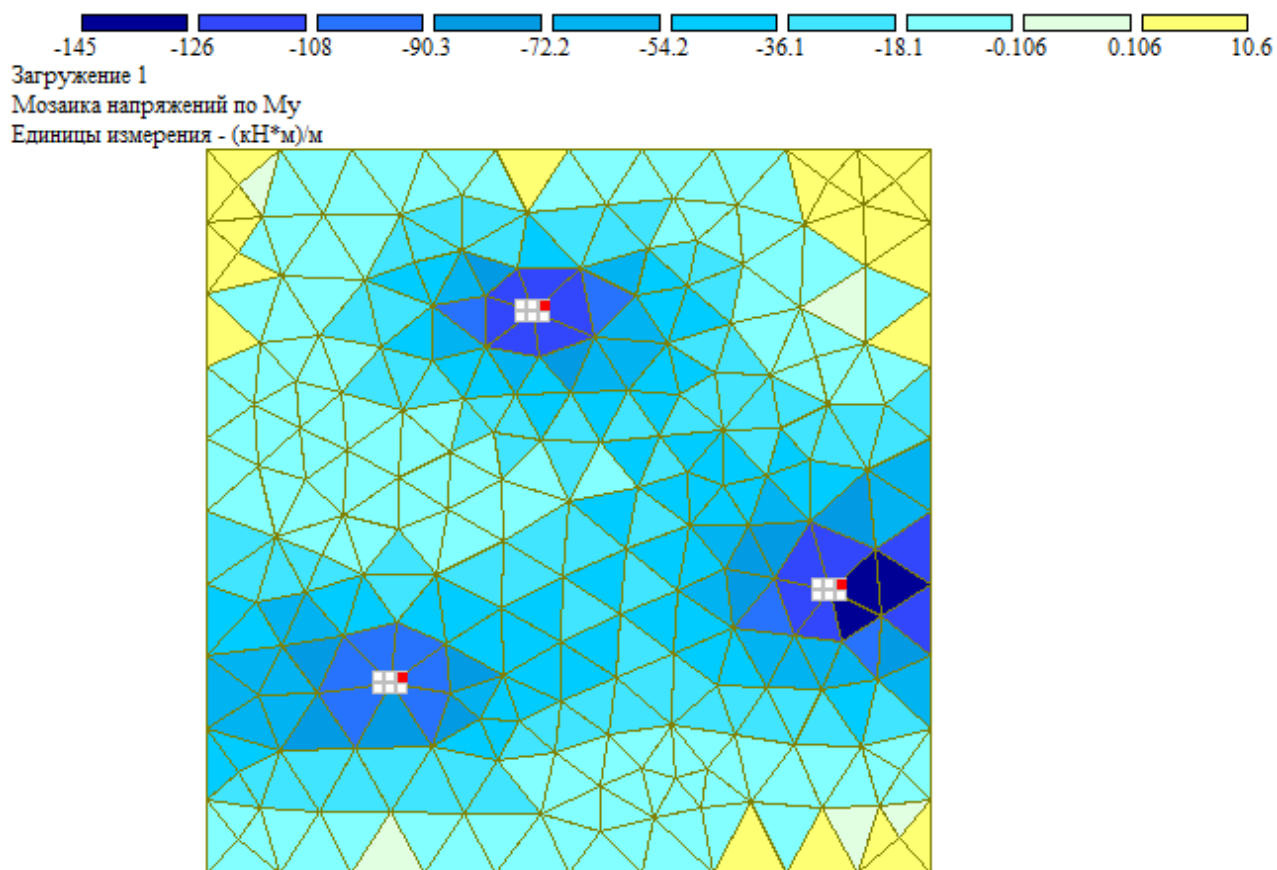


Рис. 8. Мозаика изгибающих моментов M_y в ПК Лира

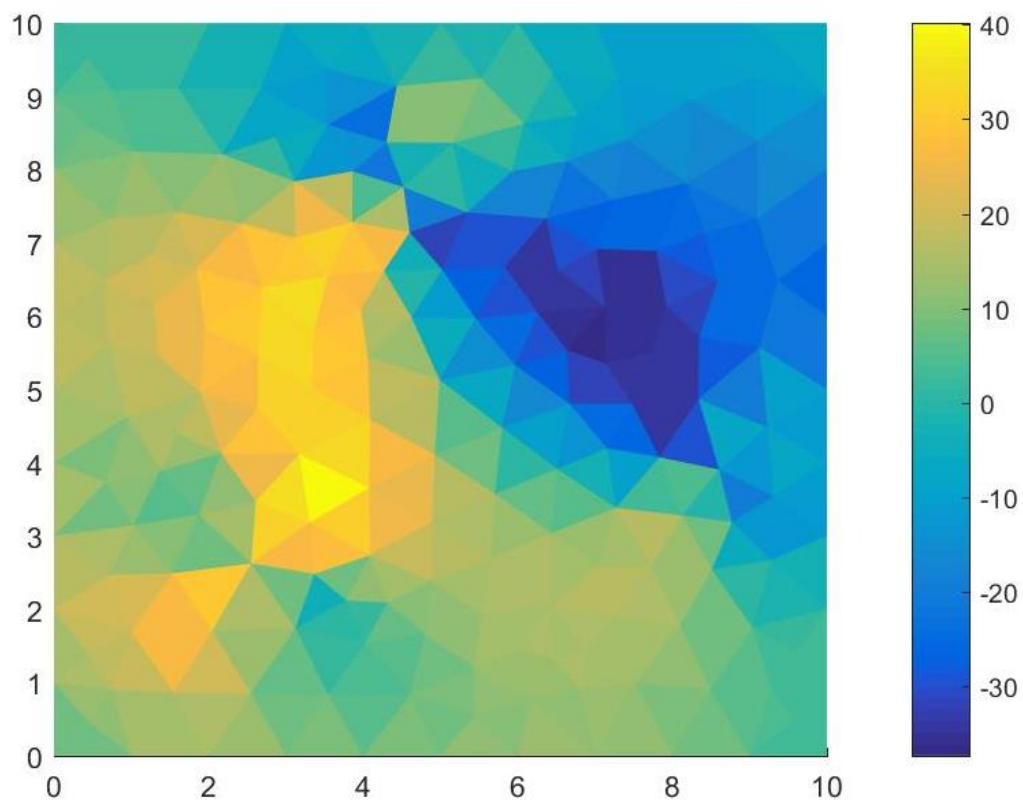


Рис. 9. Мозаика крутящих моментов в ПК Matlab

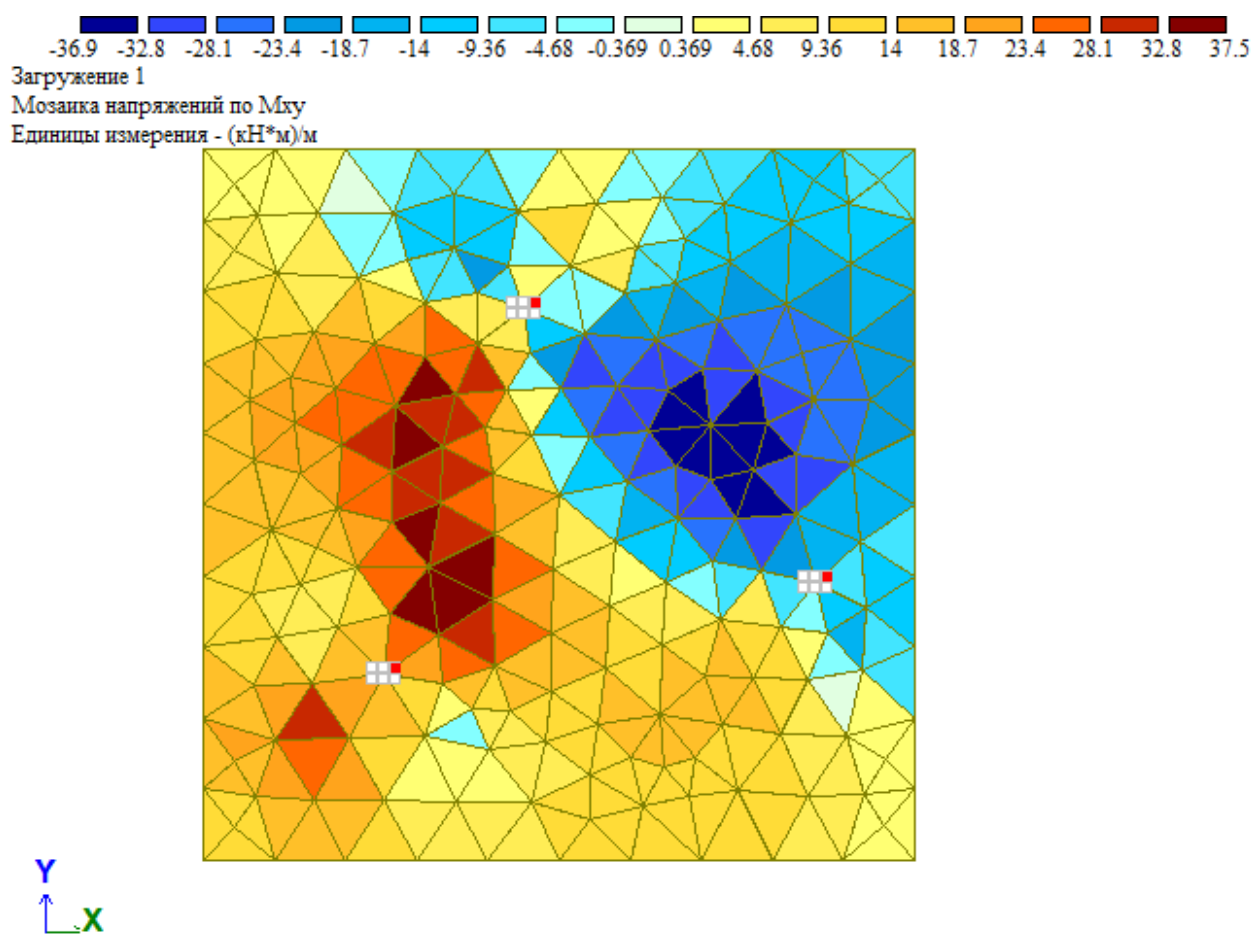
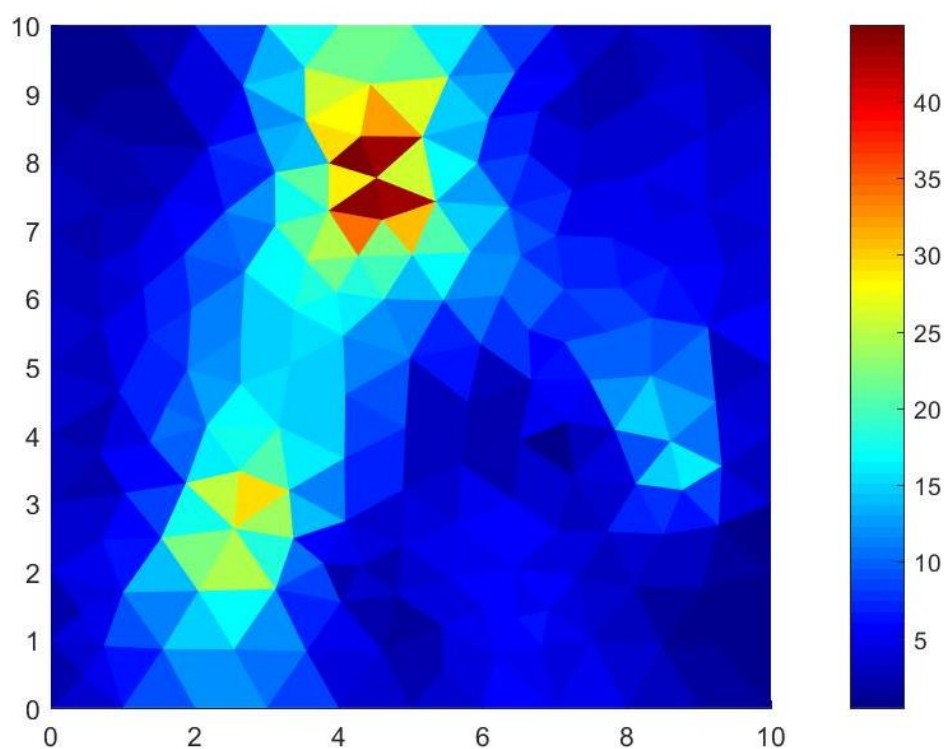


Рис. 10. Мозаика крутящих моментов в ПК Лира

На рис. 11–14 приведены мозаики площадей арматуры, требуемой для восприятия ранее представленных моментов.

Рис. 11. Мозаика требуемой площади арматуры по x у верхней поверхности плиты в ПК Matlab

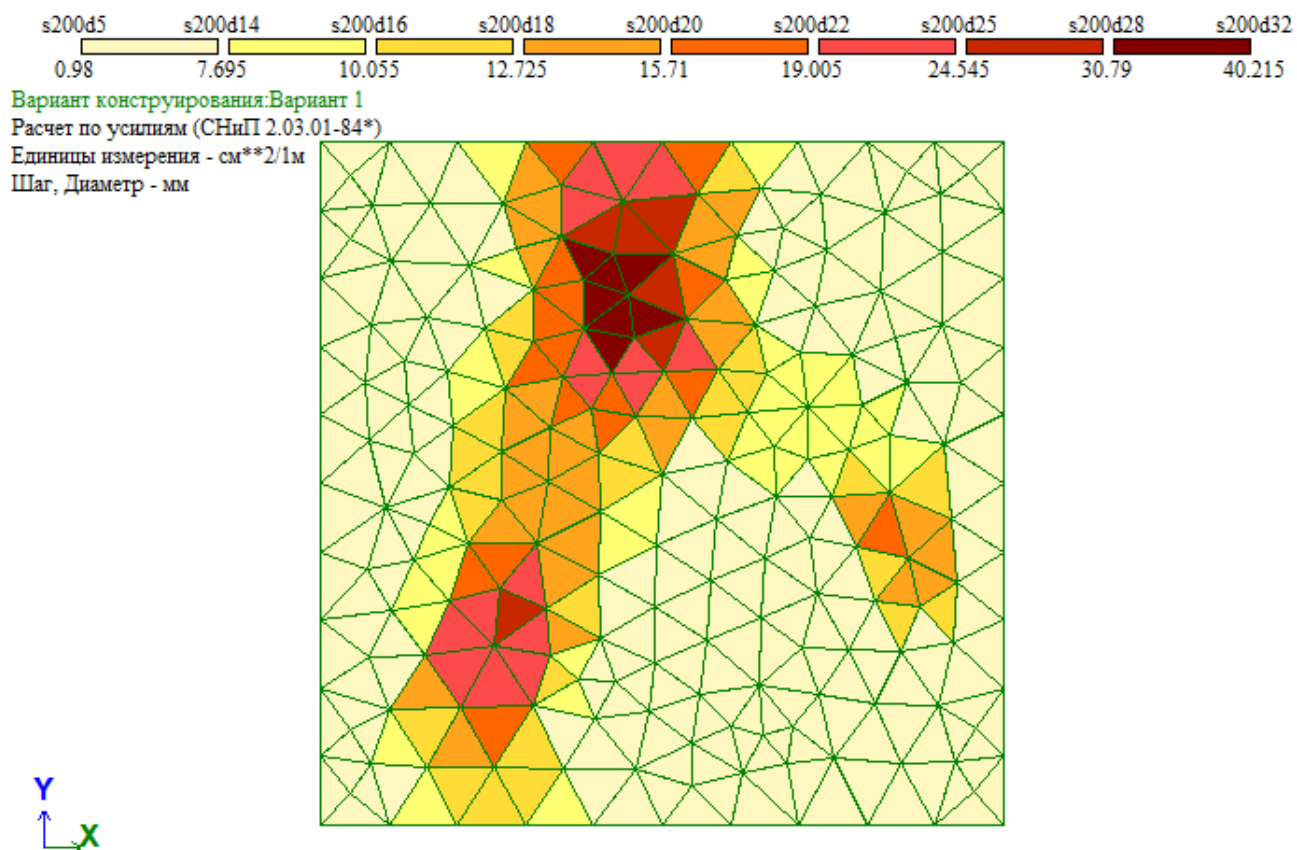


Рис. 12. Мозаика требуемой площади арматуры по x у верхней поверхности плиты в ПК ЛИРА

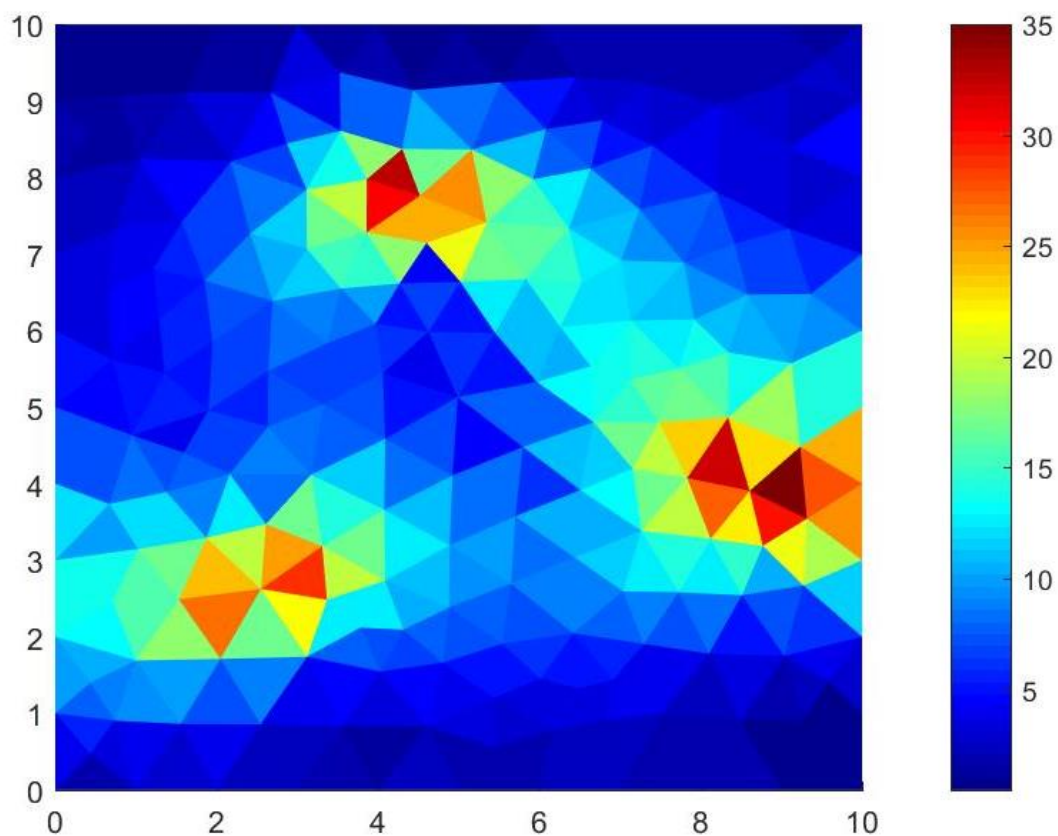


Рис. 13. Мозаика требуемой площади арматуры по y у верхней поверхности плиты в ПК Matlab

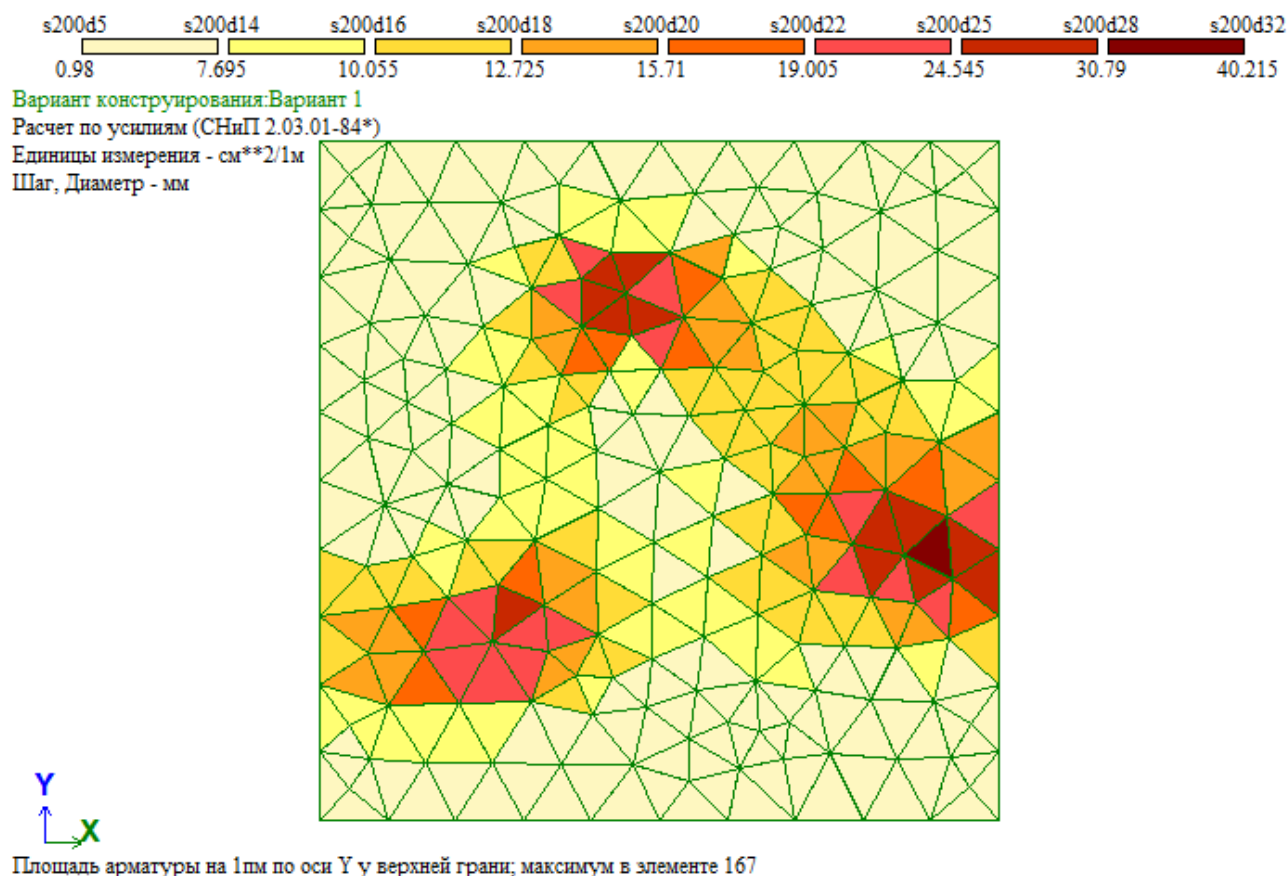


Рис. 14. Мозаика требуемой площади арматуры по у у верхней поверхности плиты в ПК ЛИРА

Результаты исследования. Предложен метод выявления оптимального положения колонн под плитой перекрытия железобетонного каркасного здания. Данный расчет выполнен при использовании методов Монте-Карло и МКЭ.

В ходе решения двух задач, выполненных для теста метода расчета, были выявлены некоторые неточности в работе программного комплекса и соответственно произведена верификация программного комплекса и расчетных моделей.

Определены места концентрации моментов, а также места сгущения арматуры, которые наглядно показаны на изополях и мозаиках из программного комплекса ЛИРА-САПР 2013.

Проведено сличение результатов численных расчетов, сделанных вручную, с результатами расчетов в программе ЛИРА-САПР 2013. Приведенная значимая похожесть результатов численного эксперимента по показателям деформаций, внутренних усилий и расходу арматуры открывает возможности для решения задач по оптимизации уже конкретных железобетонных конструкций, зданий и сооружений.

Обсуждение и заключение. Проведенный в ходе данной научной работы численный эксперимент позволил автору составить наиболее полное представление о поведении железобетонных плит заданной конфигурации и при заданных нагрузках при разном расположении конечного количества точечных опор под плитой. В ходе численного эксперимента проведен подробный анализ поведения данных конструкций при заданных условиях. Помимо проведения теоретического численного эксперимента также составлены и опробованы функциональные зависимости поведения железобетонных плит с варьируемым расположением точечных опор под ними. В ходе исследования при решении двух задач, выполненных для теста метода расчета, были выявлены некоторые неточности в работе программного комплекса и соответственно произведена верификация программного комплекса и расчетных моделей. Проведено сличение результатов численных расчетов, сделанных вручную с результатами расчетов в программе ЛИРА-САПР 2013. Приведенная значимая похожесть результатов численного эксперимента по показателям деформаций, внутренних усилий и расходу арматуры открывает возможности для решения задач по оптимизации уже конкретных железобетонных конструкций, зданий и сооружений.

Список литературы

1. Романова Т.П. Несущая способность и оптимизация трехслойных армированных круглых пластин из разносопротивляющихся материалов, опертых по внутреннему контуру. *Проблемы прочности и пластичности*. 2015;3(77):286–300. <https://doi.org/10.32326/1814-9146-2015-77-3-286-300>
2. Романова Т.П. Оптимальное расположение полигональных внутренних опор к круглым жесткопластическим пластинам. *Вестник Самарского государственного технического университета*. 2014;(3):94–105. <https://doi.org/10.14498/vsgtu1312>
3. Won K.M., Park Y.S. Optimal Support Positions for a Structure to Maximize Its Fundamental Natural Frequency. *Journal of Sound and Vibration*. 1998;213(5):801–812. <https://doi.org/10.1006/jsvi.1997.1493>
4. Park Y.H., Park Y. Optimal Support Positions to Enhance Structure Natural Frequency. B: Proceedings of the KSME Dynamics and Control Division Summer Annual Meeting. *KSME Dynamics and Control Division*. 1999.
5. Wang D., Jiang J.S., Zhang W.H. Optimization of Support Positions to Maximize the Fundamental Frequency of Structures. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2004;61(10):1584–1602. <https://doi.org/10.1002/nme.1124>
6. Wang D. Optimization of Support Positions to Minimize the Maximal Deflection of Structures. *International Journal of Solids and Structures*. 2004;41(26):7445–7458. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2004.05.035>
7. Wang D. Optimal Design of Structural Support Positions for Minimizing Maximal Bending Moment. *Finite Elements in Analysis and Design*. 2006;43(2):95–102. <https://doi.org/10.1016/j.finel.2006.07.004>
8. Wang C.M., Wang L., Ang K.K., Liew K.M. Optimization of Internal Line Support Positions for Plates Against Vibration. *Mechanics of Structures and Machines*. 1993;21(4):429–454. <https://doi.org/10.1080/08905459308905196>
9. Son J.H., Kwak B.M. Optimization of Boundary Conditions for Maximum Fundamental Frequency of Vibrating Structures. *AIAA journal*. 1993;31(12):2351–2357. <https://doi.org/10.2514/3.11935>
10. Wang B.P., Chen J.L. Application of Genetic Algorithm for the Support Location Optimization of Beams. In: *Proceedings of the ASME 1994 Design Technical Conferences collocated with the ASME 1994 International Computers in Engineering Conference and Exhibition and the ASME 1994 8th Annual Database Symposium. 20th Design Automation Conference. Volume 2*. Minneapolis, Minnesota, USA: ASME; 1994. P. 323–327. <https://doi.org/10.1115/DETC1994-0142>

References

1. Romanova TP. Carrying Capacity and Optimization of Three-Layer Reinforced Circular Plate of Differently Resistant Materials, Supportrd on the Internal Countour. *Problems of Strength and Plasticity*. 2015;3(77):286–300. <https://doi.org/10.32326/1814-9146-2015-77-3-286-300> (In Russ.).
2. Romanova TP. The Optimal Location of the Polygonal Internal Supports to the Circular Rigid-Plastic Plates. *Journal of Samara State Technical University, Ser. Physical and Mathematical Sciences*. 2014;(3(36)):94–105. <https://doi.org/10.14498/vsgtu1312> (In Russ.).
3. Won KM, Park YS. Optimal Support Positions for a Structure to Maximize Its Fundamental Natural Frequency. *Journal of Sound and Vibration*. 1998;213(5):801–812. <https://doi.org/10.1006/jsvi.1997.1493>
4. Park YH, Park Y. Optimal Support Positions to Enhance Structure Natural Frequency. In: *Proceedings of the KSME Dynamics and Control Division Summer Annual Meeting*. KSME Dynamics and Control Division; 1999.
5. Wang D, Jiang JS, Zhang WH. Optimization of Support Positions to Maximize the Fundamental Frequency of Structures. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2004;61(10):1584–1602. <https://doi.org/10.1002/nme.1124>
6. Wang D. Optimization of Support Positions to Minimize the Maximal Deflection of Structures. *International Journal of Solids and Structures*. 2004;41(26):7445–7458. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2004.05.035>
7. Wang D. Optimal Design of Structural Support Positions for Minimizing Maximal Bending Moment. *Finite Elements in Analysis and Design*. 2006;43(2):95–102. <https://doi.org/10.1016/j.finel.2006.07.004>
8. Wang CM, Wang L, Ang KK, Liew KM. Optimization of Internal Line Support Positions for Plates Against Vibration. *Mechanics of Structures and Machines*. 1993;21(4):429–454. <https://doi.org/10.1080/08905459308905196>
9. Son JH, Kwak BM. Optimization of Boundary Conditions for Maximum Fundamental Frequency of Vibrating Structures. *AIAA Journal*. 1993;31(12):2351–2357. <https://doi.org/10.2514/3.11935>
10. Wang BP, Chen JL. Application of Genetic Algorithm for the Support Location Optimization of Beams. In: *Proceedings of the ASME 1994 Design Technical Conferences collocated with the ASME 1994 International Computers in Engineering Conference and Exhibition and the ASME 1994 8th Annual Database Symposium. 20th Design Automation Conference. Volume 2*. Minneapolis, Minnesota, USA: ASME; 1994. P. 323–327. <https://doi.org/10.1115/DETC1994-0142>

Об авторе:

Екатерина Андреевна Ефименко, доцент кафедры железобетонных и каменных конструкций Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, [ORCID](#), ovekaterina90@yandex.ru

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи

Поступила в редакцию 22.01.2024

Поступила после рецензирования 18.02.2024

Принята к публикации 21.02.2024

About the Author:

Ekaterina A. Efimenko, Cand.Sci. (Engineering), Associate Professor of the Reinforced Concrete and Stone Structures Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), [ORCID](#), ovekaterina90@yandex.ru

Conflict of interest statement: the author does not have any conflict of interest.

The author has read and approved the final manuscript.

Received 22.01.2024

Revised 18.02.2024

Accepted 21.02.2024