

УДК 624.072

DOI 10.52928/2070-1683-2022-32-14-22-28

УЧЕТ ФИЗИЧЕСКОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ ОРТОТРОПНЫХ ПЛИТ В СТАТИЧЕСКОМ РАСЧЕТЕ БЕСКОНЕЧНОЙ РЕГУЛЯРНОЙ СИСТЕМЫ ПЛИТ НА УПРУГОМ СЛОЕ

канд. техн. наук, доц. **О.В. КОЗУНОВА, К.А. СИРОШ**
(Белорусский государственный университет транспорта, Гомель)

Рассматривается бесконечная регулярная система ортотропных плит на упругом слое, жестко соединенном с недеформируемым основанием. Нелинейный расчет бесконечной регулярной системы плит на изотропном основании выполняется вариационно-разностным методом (ВРМ), для которого характерна замена дифференциальных уравнений конечно-разностными аппроксимациями. Численное решение полученной системы уравнений выполнено с применением итерационного алгоритма.

При нахождении переменной жесткости плиты на упругом слое используется зависимость «жесткость – кривизна» по Соломину в направлениях осей инерции. По найденным цилиндрическим жесткостям изгиба из соотношения С.П. Тимошенко определяется жесткость кручения плиты для каждой итерации. Энергия деформации упругого основания заменяется работой реактивных давлений в контактной зоне конструкции на основании закона сохранения энергии.

Анализ результатов упругого и нелинейного расчетов (3-я итерация) проводился для значений осадок ортотропной плиты и контактных напряжений в зоне взаимодействия плиты с упругим основанием.

Ключевые слова: бесконечная регулярная система плит, ортотропная плита, вариационно-разностный метод, упругий слой, контактная зона, прогибы плиты, осадки основания, контактные напряжения, внутренние усилия, физическая нелинейность.

Введение. Задачи контактного взаимодействия изгибаемых конструкций с упругим основанием в теории упругости [1] и строительной механике [2] активно изучаются, что отражено в трудах современных белорусских ученых, таких как: С.В. Босаков, С.Д. Семенюк, О.В. Козунова, К.В. Дмитриева (Юркова) и др. [3–9]. В работах данных ученых при решении задач контактного взаимодействия учитываются усложняющие параметры контактирующих тел: неоднородность (слоистость) упругого основания, физическая нелинейность основания, ползучесть бетона, конструктивная нелинейность железобетонных элементов и другие.

Вопрос применения вариационных методов для решения контактных задач теории упругости ввиду сложности решения таких задач (особенно для изгибаемых конструкций) в научной литературе еще недостаточно исследован. Также до настоящего времени не исследован в полной мере вопрос расчета регулярных систем железобетонных плит на упругом основании с учетом анизотропии, ортотропии и трещинообразования в силу значительной математической сложности постановок и алгоритмов решаемых задач. В работах М.И. Горбунова-Посадова [10], С.Д. Семенюка [11], С.Н. Клепикова [12], С.В. Босакова [5] различными подходами проводились исследования по расчету фундаментных изотропных плит и пространственных монолитных фундаментов как систем перекрестных лент на упругом основании.

Постановка задачи. В данной работе авторами рассматривается бесконечная регулярная система плит под действием внешней нагрузки, опирающаяся на упругое основание. Система разбивается в силу симметрии на соединенные между собой базовые фрагменты – прямоугольные гибкие ортотропные плиты (рисунок 1).

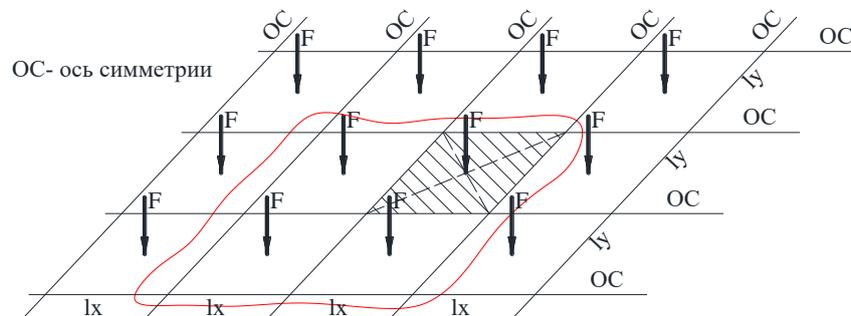


Рисунок 1. – Бесконечная регулярная система ортотропных плит под действием симметричной нагрузки

Геометрические размеры конструкций – l_x, l_y . Высота поперечного сечения плит h постоянна по всей площади плиты. Внешняя нагрузка F действует в центре плиты перпендикулярно и симметрично плоскости осей конструкции. Основание в задаче предлагается моделировать упругим ограниченным по толщине однородным слоем, соединенным с несжимаемым основанием.

Алгоритм расчета бесконечной регулярной системы железобетонных плит. Из бесконечной регулярной системы плит вычленяется расчетный элемент – ортотропная плита.

Ортотропная плита разбивается на равные участки размерами $\Delta x \times \Delta y$. В результате получено 20 ячеек и 30 узловых точек. Упругое основание заменяется расчетной областью (решается пространственная задача). Основание аппроксимируется симметричной объемной разбивочной сеткой с постоянным шагом по осям глобальной системы координат – получено 80 ячеек и 150 узловых точек (рисунок 2).

Размер граней объемной ячейки расчетной области основания соответствует шагу разбивочной сетки Δx , Δy , Δz [13]. Ячейка имеет форму параллелепипеда.

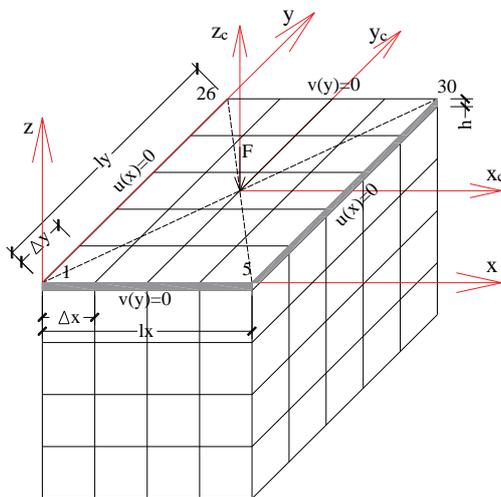


Рисунок 2. – Расчетная область, соответствующая одной ортотропной плите

Граничные условия. В задаче для расчетной области основания заданы *кинематические граничные условия*: на границах – горизонтальные перемещения $u(x)=0$, $v(y)=0$; в зоне контакта – осадки основания и прогиб плиты одинаковы.

Смешанные граничные условия выполняются в крайних точках ортотропных плит регулярной системы¹:

$$Q_z \Big|_{x=\pm \frac{lx}{2}} = -D_x \frac{d^3 w}{dx^3} = 0; \quad Q_z \Big|_{y=\pm \frac{ly}{2}} = -D_y \frac{d^3 w}{dy^3} = 0; \tag{1}$$

$$\varphi_x \Big|_{y=\pm \frac{ly}{2}} = \frac{dw}{dy} = 0; \quad \varphi_y \Big|_{x=\pm \frac{lx}{2}} = \frac{dw}{dx} = 0.$$

В соответствии с вариационным принципом Лагранжа [1] полная потенциальная энергия в состоянии равновесия принимает свое наименьшее значение при нахождении плиты под статической нагрузкой. Полная потенциальная энергия конструкции \mathcal{E} складывается из: энергии деформации конструкции Ω , энергии деформации упругого основания U , работы внешней нагрузки Π :

$$\mathcal{E} = \Omega + U + \Pi. \tag{2}$$

При замене интегро-дифференциальных выражений функционалов энергий на конечно-разностные аппроксимации становится возможным преобразовать систему дифференциальных уравнений в систему линейных алгебраических уравнений. Ниже в общем виде представлена СЛАУ [13; 14]:

$$\begin{cases} \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial v_i} = 0, \\ \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial u_i} = 0, \quad i = 1, 2, 3, \dots, N, \\ \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial w_i} = 0. \end{cases} \tag{3}$$

где N – число узловых точек параллелепипеда.

Решение системы (3) позволяет получить значения неизвестных компонентов вектора перемещений $u_i(x, y, z)$, $v_i(x, y, z)$, $w_i(x, y, z)$.

¹ Козунова, О.В. Нелинейный расчет бесконечной регулярной системы плит на изотропном основании / О.В. Козунова, К.А. Сирош // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред : Материалы XXVIII Междунар. симпозиума им. А.Г. Горшкова, Крёмёнки, 16–20 мая 2022 г. – М., 2022. – С. 113–115.

Определение составляющих потенциальной энергии системы. Плоскостью изгиба принята срединная плоскость недеформированной плиты в осях XU . В центр тяжести плиты помещено начало координат – точка O . Одна из главных осей – ось Z , направлена в сторону ненагруженной поверхности плиты ввиду симметрии решаемой задачи. Объемными силами пренебрегаем [15].

Для ортотропной плиты используем уравнения обобщенного закона Гука (в виде (2.7), (2.8) из [16]).

Принято, что энергия деформации конструкции тождественна энергии изгиба конструкции (деформации сдвига не учитываются). Выражение потенциальной энергии деформаций ортотропной плиты по Лехницкому [16] учитывает кручение ортотропной плиты в плоскости XOY :

$$\Omega = V = \frac{1}{2} \iint \left[D_x \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 + 2D_{xy} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + D_y \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)^2 + 4D_k \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] dx dy, \quad (4)$$

где D_x, D_y – цилиндрические жесткости изгиба ортотропной плиты по направлениям осей Y и X соответственно (оси совпадают с главными осями инерции);

$D_k (D_{xy})$ – жесткость кручения плиты.

Цилиндрические жесткости изгиба ортотропной плиты [16] по направлениям осей Y и X соответственно:

$$D_x = \frac{E_x h^3}{12(1-\nu_x \nu_y)}; \quad D_y = \frac{E_y h^3}{12(1-\nu_x \nu_y)}, \quad (5)$$

где E_x, E_y – главные модули упругости;

ν_x, ν_y – коэффициенты Пуассона материала плиты.

Для учета в расчетах жесткости кручения плиты применена формула из монографии С.П. Тимошенко [17]:

$$D_k = D_{xy} = \frac{\nu_x + \nu_y}{2} \sqrt{D_x \cdot D_y}, \quad (6)$$

где D_x, D_y – цилиндрические жесткости, определяются по формулам (5).

При определении изгибающих и крутящего моментов ортотропной изолированной плиты использованы соотношения [15]:

$$\begin{aligned} M_x &= -D_x \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right); \\ M_y &= -D_y \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right); \\ M_k &= -2D_k \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}. \end{aligned} \quad (7)$$

Энергия деформации упругого основания заменяется работой реактивных давлений в контактной зоне конструкции на основании закона сохранения энергии [17]. Если пренебречь реактивными касательными усилиями в контактной зоне, тогда энергия деформации упругого основания для плиты определяется [7] как:

$$U = \frac{1}{2} \iint_S p(x, y) w(x, y) dx dy; \quad (8)$$

где $p(x, y)$ – реактивные давления в контактной зоне конструкции.

Работа внешней нагрузки $q(x, y)$ для прямоугольной плиты определяется по формуле [7]:

$$\Pi = -\iint_S q(x, y) w(x, y) dx dy. \quad (9)$$

В формулах (8) и (9) интегрирование производится по области контакта упругого основания и плиты.

Учет физической нелинейности. Технические нормативные правовые акты в статических расчетах железобетонных гибких плит с возможным трещинообразованием при нахождении переменных жесткостей рекомендуют использовать приведенный модуль упругости. В статье [18] приводится подробный алгоритм такого расчета. В данной работе предлагается нелинейный расчет основывать на зависимости «жесткость – кривизна» по В.И. Соломину [19], которая связана с диаграммой «момент – кривизна» через переменную (секущую) жесткость:

$$\operatorname{tg} \beta_i = B_i = \frac{M_k}{\chi_k}, \quad (10)$$

где B_i – переменная (секущая) жесткость при изгибе плиты в i -ом состоянии, которая является тангенсом угла наклона секущей к оси кривизны, проведенной к точке K диаграммы «момент – кривизна».

Зависимость «жесткость – кривизна» ранее построена одним из авторов [20]. При построении использовалась приведенная цилиндрическая жесткость плиты по направлению осей ортотропии. Зависимость «жесткость – кривизна» построена на рисунке 3.

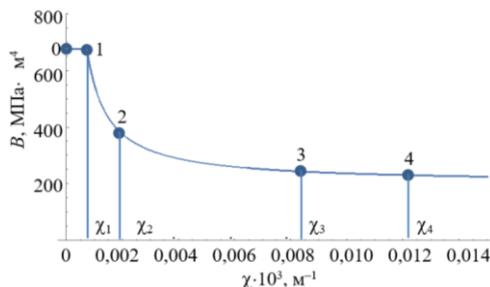


Рисунок 3. – Зависимость «жесткость – кривизна» [20]

Результаты расчета. Расчет выполнялся для изолированной железобетонной плиты (геометрические размеры 4×3×0,14 м). Материал конструкции – тяжелый бетон класса С20/25. Принятые в задаче упругие характеристики: модуль деформации бетона $E_6 = 29,05$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu_6 = 0,17$. Толщина слоя, на котором расположена плита, $H = 7$ м. Слой упругий и жестко соединен с недеформируемым основанием. Упругие параметры слоя: модуль упругости $E_0 = 20$ кПа, коэффициент Пуассона $\nu_0 = 0,33$. На плиту действует внешняя статическая нагрузка от колеса $Q = 65$ кН. Нагрузка приложена в центре плиты и принимается распределенной на участке размером 0,4×0,4 м. В расчете был учтен собственный вес плиты $q = 3,5$ кН/м² [20].

Зависимость «жесткость – кривизна» аппроксимируется легче зависимости «момент – кривизна». К тому же зависимость «жесткость – кривизна» сокращает объем вычислений, что отражено в работе [15].

Для определения показателя гибкости изолированной железобетонной плиты конечных размеров $a \times b$ для дальнейшего анализа параметров НДС, воспользуемся формулой из монографии Горбунова-Посадова [10]:

$$\beta = \frac{\pi E_0 a^3}{(1 - \nu_0^2) E J_6}, \tag{11}$$

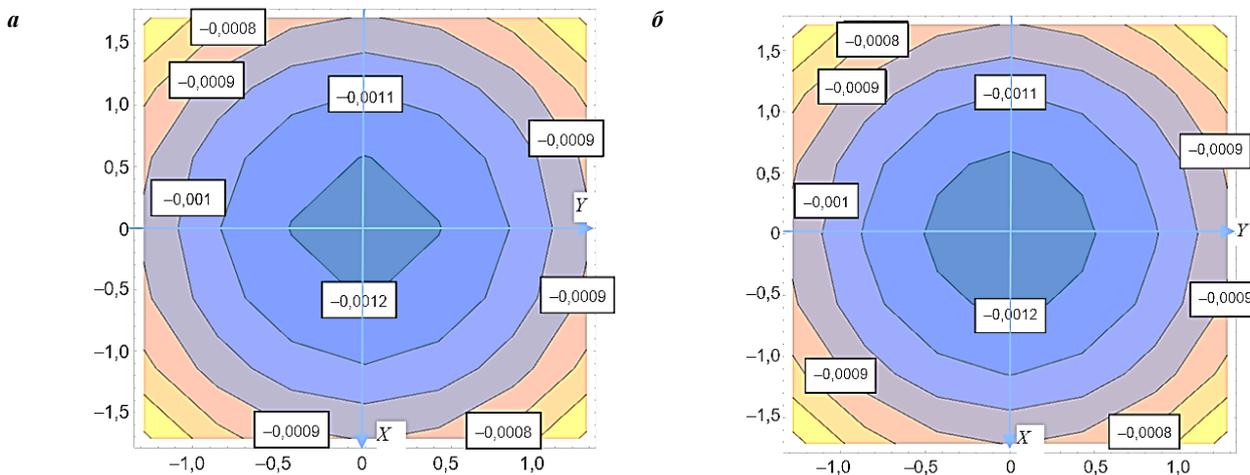
где E_0, ν_0 – упругие параметры упругого слоя;
 $E J_6$ – цилиндрическая жесткость железобетонной плиты.

Получаем значение показателя гибкости после подстановки параметров плиты и упругого основания в (11):

$$\beta = \frac{3,14 \cdot 20 \cdot 10^6 \cdot 1,5^3}{(1 - 0,33^2) \cdot 6840,46 \cdot 10^3} = 34,789.$$

Результаты расчета показали, что в месте приложения внешней сосредоточенной силы (в центре тяжести плиты) имеют место максимальные значения. Упругий расчет: осадка основания $w_{\max} = 0,0012558$ м; контактное напряжение в зоне взаимодействия плиты с упругим слоем $p_{\max} = 10,38$ кПа. Результаты нелинейного расчета (3-я итерация): осадка основания $w_{\max} = 0,0012582$ м; контактное напряжение в зоне взаимодействия плиты с упругим основанием $p_{\max} = 10,43$ кПа [20].

Ниже на рисунках 4–5 графически представлены результаты расчета деформирования ортотропных плит по предложенной методике.



а – результаты упругого расчета; б – результаты нелинейного расчета (3-я итерация)

Рисунок 4. – Осадки железобетонной плиты, м

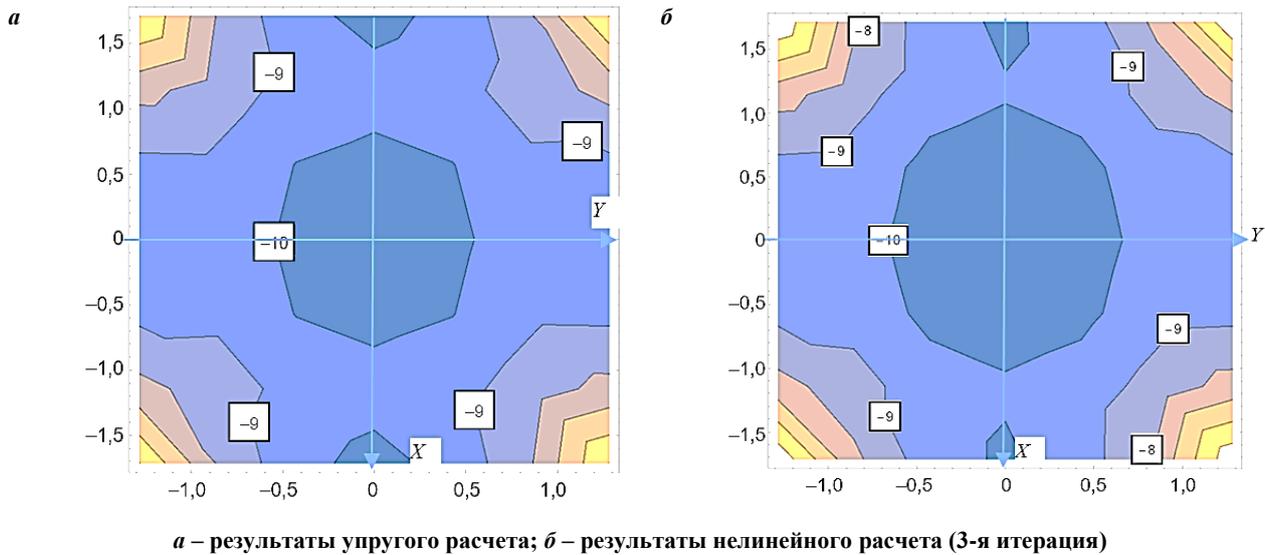


Рисунок 5. – Эпюры контактных напряжений, кПа

Сопоставление результатов упругого и нелинейного решения (3-я итерация). Сопоставление результатов решений графически представлено на рисунке 6. Анализ проводился на основании величин осадок ортотропной плиты и контактных напряжений в зоне контактного взаимодействия плиты и упругого основания.

На первом графике можно наблюдать практически полное совпадение значений осадок, полученных в результате упругого и нелинейного решения, при малом их увеличении. Второй график отражает графическое сравнение величин контактных напряжений упругого и нелинейного расчета в зоне контактного взаимодействия. Вблизи центра плиты результаты решений практически полностью совпадают, по направлению к краям плиты наблюдается незначительное расхождение в значениях напряжений (при учете переменной кривизны и жесткости) – до 3%.

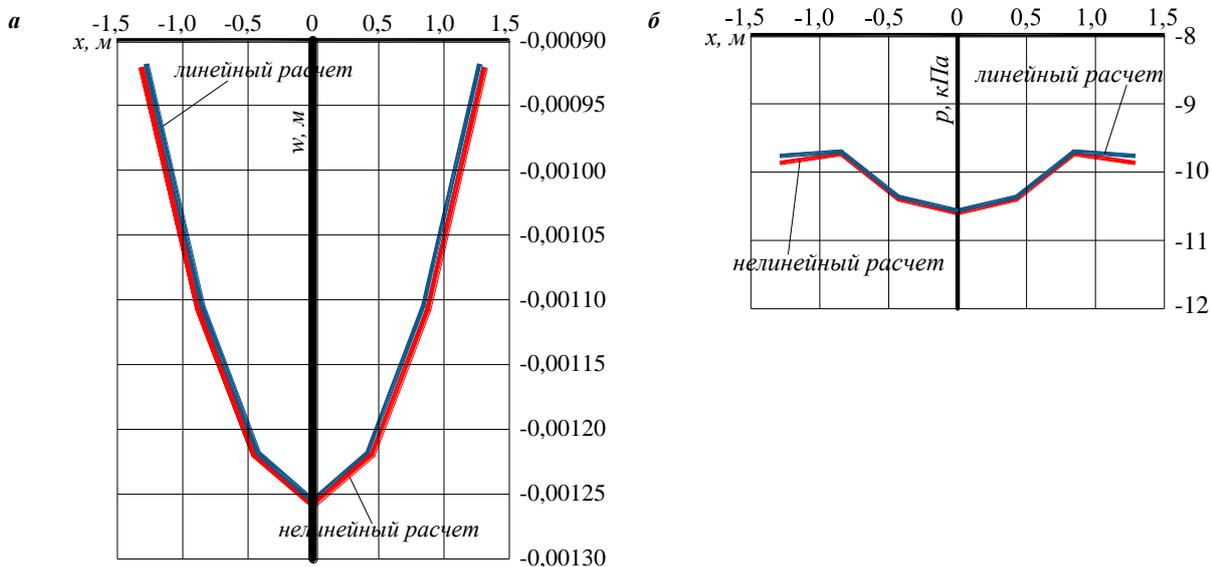


Рисунок 6. – Графическое сопоставление результатов упругого и нелинейного решения (3-я итерация)

Заключение. Вариационно-разностный метод использован в работе для исследования параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) изолированных плит на упругом основании. Плиты рассматривались как элемент регулярной бесконечной системы железобетонных плит, расположенных на упругом слое с ограничением глубины сжимаемой толщи.

Стоит отметить, для вычисления осадок плиты, а также при необходимости определения контактных напряжений (реактивных давлений под плитой) вблизи места приложения силы достаточно использовать упругую модель. Для нахождения реактивных давлений при удалении от места приложения внешней силы (вблизи границ плиты) целесообразно применение нелинейной модели.

Методика расчета предлагаемой изолированной плиты лежит в основе методики расчета регулярной системы плиты. В дальнейшем в предложенном алгоритме для исходных данных регулярной системы плит будет введена диаграмма «жесткость – кривизна», аналогично данному примеру. Полученные результаты будут являться обобщением теории статических расчетов плит методами строительной механики.

НДС железобетонной плиты и контактной зоны под плитой определяется в совокупности для бесконечной регулярной системы. При работе изолированной плиты, и особенно с трещинами, необходимо учитывать нелинейные свойства материала (в данном случае железобетона) в каждом направлении через переменную кривизну плиты. Данная область исследований нелинейных задач требует особого внимания и дальнейшей разработки для создания универсальной методики решения подобных задач.

Исследования реализовывались в компьютерной программе Mathematica.

ЛИТЕРАТУРА

1. Александров, А.В. Основы теории упругости и пластичности / А.В. Александров, В.Д. Потапов. – М. : Высш. шк., 1990. – 400 с.
2. Ржаницын, Р.А. Строительная механика / Р.А. Ржаницын. – М., Высш. шк., 1991. – 439 с.
3. Босаков, С.В. Расчет системы перекрестных балок на двухслойном основании / С.В. Босаков, Я.Д. Семенюк // Вестн. БГТУ. Сер. Стр-во и архитектура. – 2000. – № 1. – С. 14–16.
4. Босаков, С.В. Расчет железобетонных пространственных фундаментов, как системы перекрестных балок, на упругом основании с учетом ползучести бетона / С.В. Босаков, С.Д. Семенюк // Вестн. БГТУ. Сер. Стр-во и архитектура. – 2001. – № 1. – С. 13–16.
5. Босаков, С.В. Статические расчеты плит на упругом основании / С.В. Босаков. – Минск : БНТУ, 2002. – 127 с.
6. Семенюк, С.Д. Железобетонные и пространственные фундаменты жилых и гражданских зданий на неравномерно деформированном основании / С.Д. Семенюк. – Могилев : Беларус.-Рос. ун-т, 2003. – 269 с.
7. Босаков, С.В. Метод Ритца в контактных задачах теории упругости : моногр. / С.В. Босаков. – Брест : БрГТУ, 2006. – 107 с.
8. Босаков, С.В. Вариационно-разностный подход в решении контактной задачи для нелинейно упругого неоднородного основания. Плоская деформация. Теория расчета (Часть 1) / С.В. Босаков, О.В. Козунова // Вестн. БНТУ. – 2009. – № 1. – С. 5–13.
9. Guenfoud, S. A Ritz's method based solution for the contact problem of a deformable rectangular plate on an elastic quarter-space / S. Guenfoud, S.V. Bosakov, D.F. Laefer // International Journal of Solids and Structures. – 2010. – Vol. 47, iss. 14–15. – P. 1822–1829.
10. Горбунов-Посадов, М.И. Расчет конструкций на упругом основании / М.И. Горбунов-Посадов, Т.А. Маликова, В.И. Соломин. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Стройиздат, 1984. – 680 с.
11. Семенюк, С.Д. Железобетонные пространственные фундаменты жилых и гражданских зданий на неравномерно-деформируемом основании / С.Д. Семенюк. – Могилев : Беларус.-Рос. ун-т, 2003. – 269 с.
12. Клепиков, С.Н. Расчет конструкций на упругом основании / С.Н. Клепиков. – Киев : Будівельник, 1967. – 184 с.
13. Козунова, О.В. Расчет бесконечной системы перекрестных балок на упругом основании вариационно-разностным методом / О.В. Козунова, К.А. Сирош // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф. Стр-во. Прикладные науки. – 2021. – № 16. – С. 65–71.
14. Козунова, О.В. Нелинейный расчет регулярной системы железобетонных балок на упругом основании при действии симметричной нагрузки / О.В. Козунова, К.А. Сирош // Механика. Исследования и инновации : междунар. сб. науч. тр. / БелГУТ. – Гомель, 2021. – С. 97–104.
15. Козунова, О.В. Совершенствование методики расчета гибких ортотропных плит на упругом основании. Часть 1. Теория расчета / О.В. Козунова // Наука и техника. – 2022. – Т. 21, № 3. – С. 211–221. DOI: 10.21122/2227-1031-2022-21-3-211-221.
16. Лехницкий, С.Г. Анизотропные пластинки / С.Г. Лехницкий. – М. : Гос. изд-во технико-теор. лит., 1957. – 387 с.
17. Тимошенко, С.П. Пластины и оболочки / С.П. Тимошенко, С. Войновский-Кригер. – М. : Фитматгиз, 1963. – 536 с.
18. Козунова, О.В. Нелинейный расчет железобетонной балки на упругом основании с помощью зависимости «жесткость-кривизна» / О.В. Козунова // Строительная механика и расчет сооружений. – 2022. – № 1. – С. 37–46. DOI: 10.37538/0039-2383.2022.1.37.46.
19. Соломин, В.И. Методы расчета и оптимальное проектирование железобетонных фундаментных конструкций / В.И. Соломин, С.Б. Шматков. – М. : Стройиздат, 1986. – 208 с.
20. Козунова, О.В. Совершенствование методики расчета гибких ортотропных плит на упругом основании. Часть 2. Результаты расчета / О.В. Козунова // Наука и техника. – 2022. – Т. 21, № 4. – С. 290–296. DOI: 10.21122/2227-1031-2022-21-4-290-296.

REFERENCES

1. Aleksandrov, A.V. & Potapov, V.D. (1990). *Osnovy teorii uprugosti i plastichnosti*. Moscow: Vyssh. shk. (In Russ.).
2. Rzhantsyn, R.A. *Stroitel'naya mekhanika*. Moscow: Vyssh. shk. (In Russ.).
3. Bosakov, S.V. & Semenyuk, Y.D. (2000). Raschet sistemy perekrestnykh balok na dvukhsloinom osnovanii. *Vestn. BGTU. Ser. Str-vo i arkhitektura*, (1), 14–16. (In Russ.). <https://rep.bstu.by/handle/data/5742>.
4. Bosakov, S.V. & Semenyuk, S.D. (2001). Raschet zhelezobetonnykh prostranstvennykh fundamentov, kak sistemy perekrestnykh balok, na uprugom osnovanii s uchetom polzuchesti betona. *Vestn. BGTU. Ser. Str-vo i arkhitektura*, (1), 13–16. (In Russ.). <https://rep.bstu.by/handle/data/15979>.
5. Bosakov, S.V. (2002). *Staticheskie raschety plit na uprugom osnovanii*. Minsk: BNTU. (In Russ.).
6. Semenyuk, S.D. (2003). *Zhelezobetonnye i prostranstvennye fundamenty zhilykh i grazhdanskikh zdaniy na neravnomerno deformirovannom osnovanii*. Mogilev: Belorus.-Ros. un-t. (In Russ.).
7. Bosakov, S.V. (2006). *Metod Rittsa v kontaknykh zadachakh teorii uprugosti*. Brest: BrGTU. (In Russ.).
8. Bosakov, S.V. & Kozunova, O.V. (2009). Variatsionno-raznostnyi podkhod v reshenii kontaktnoi zadachi dlya nelineino uprugogo neodnorodnogo osnovaniya. Ploskaya deformatsiya. Teoriya rascheta (Chast' 1). *Vestn. BNTU*, (1), 5–13. (In Russ.). <https://rep.bntu.by/handle/data/2215>.
9. Guenfoud, S., Bosakov, S.V. & Laefer, D.F. (2010). A Ritz's method based solution for the contact problem of a deformable rectangular plate on an elastic quarter-space. *International Journal of Solids and Structures*, 47 (14–15), 1822–1829. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2010.03.014.

10. Gorbunov-Posadov, M.I., Malikova, T.A. & Solomin, V.I. (1984). *Raschet konstruksii na uprugom osnovanii*. Moscow: Stroizdat. (In Russ.).
11. Semenyuk, S.D. (2003). *Zhelezobetonnye prostranstvennye fundamenti zhilykh i grazhdanskikh zdaniy na neravnomerno-deformiruemom osnovanii*. Mogilev: Belarus.-Ros. un-t. (In Russ.).
12. Klepikov, S.N. (1967). *Raschet konstruksii na uprugom osnovanii*. Kiev: Budivelnik. (In Russ.).
13. Kozunova, O.V. & Siros, K.A. (2021). Raschet beskonechnoi sistemy perekrestnykh balok na uprugom osnovanii variatsionno-raznostnym metodom [Calculation of an infinite system of cross beams on an elastic base by the variation-difference method]. *Vestn. Polotsk. gos. un-ta. Ser. F, Str-vo. Prikladnye nauki [Vestnik of Polotsk State University. Part F, Construction. Applied Sciences]*, (16), 65–71. (In Russ., abstr. in Engl.).
14. Kozunova, O.V. & Siros, K.A. (2021). Nelineinyi raschet regul'arnoi sistemy zhelezobetonnykh balok na uprugom osnovanii pri deistvii simmetrichnoi nagruzki [Nonlinear calculation of a regular system of reinforced concrete beams on an elastic base under a symmetrical load]. In *Mekhanika. Issledovaniya i innovatsii: mezhdunar. sb. nauch. tr. [Mechanics. Researches and Innovations]* (97–104). Gomel': BelGUT. (In Russ., abstr. in Engl.). <http://elib.bsut.by/bitstream/handle/123456789/6763/97-104.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
15. Kozunova, O.V. (2022). Sovershenstvovanie metodiki rascheta gibkikh ortotropnykh plit na uprugom osnovanii. Chast' 1. Teoriya rascheta [Improvement of Calculation Technique for Flexible Orthotropic Plates on Elastic Base. Part 1. Calculation Theory]. *Nauka i tekhnika [Science & Technique]*, 21 (3), 211–221. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.21122/2227-1031-2022-21-3-211-221.
16. Lekhnitskii, S.G. (1957). *Anizotropnye plastinki*. Moscow: Gos. izd-vo tekhnico-teor. lit. (In Russ.).
17. Timoshenko, S.P. & Voynovsky-Kriger, S. (1963). *Plastiny i obolochki*. Moscow: Fizmatgiz. (In Russ.).
18. Kozunova, O.V. (2022). Nelineinyi raschet zhelezobetonnoi balki na uprugom osnovanii s pomoshch'yu zavisimosti «zhestkost'-krivizna» [Nonlinear calculation of a reinforced concrete beam on an elastic base using the «stiffness-curvature» relationship]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenii [Structural Mechanics and Analysis of Constructions]*, (1), 37–46. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.37538/0039-2383.2022.1.37.46.
19. Solomin, V.I. & Shmatkov, S.B. (1986). *Metody rascheta i optimal'noe proektirovanie zhelezobetonnykh fundamentnykh konstruksii*. Moscow: Stroizdat. (In Russ.).
20. Kozunova, O.V. (2022). Sovershenstvovanie metodiki rascheta gibkikh ortotropnykh plit na uprugom osnovanii. Chast' 2. Rezul'taty rascheta [Improvement of Calculation Technique for Flexible Orthotropic Plates on Elastic Base. Part 2. Calculation Results]. *Nauka i tekhnika [Science & Technique]*, 21 (4), 290–296. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.21122/2227-1031-2022-21-4-290-296.

Поступила 16.11.2022

CONSIDERATION OF THE PHYSICAL NONLINEARITY OF ORTHOTROPIC PLATE IN THE STATIC CALCULATION OF AN INFINITE REGULAR SYSTEM OF PLATES ON AN ELASTIC LAYER

O. KOZUNOVA, K. SIROSH

(Belarusian State University of Transport, Gomel)

An infinite regular system of orthotropic plates on an elastic layer rigidly connected to a non-deformable base is considered. Nonlinear calculation of an infinite regular system of plates on an isotropic basis is performed by the variational-difference method (VRM), which is characterized by the replacement of differential equations by finite-difference approximations. The numerical solution of the resulting system of equations is performed using an iterative algorithm.

When finding the variable stiffness of the plate on the elastic layer, the "stiffness – curvature" dependence on the Straw in the directions of the axes of inertia is used. According to the found cylindrical bending stiffness from the ratio of S.P. Timoshenko, the torsion stiffness of the plate is determined for each iteration. The energy of deformation of the elastic base is replaced by the work of reactive pressures in the contact zone of the structure on the basis of the law of conservation of energy.

The analysis of the results of elastic and nonlinear calculations (3rd iteration) was carried out for the values of the orthotropic plate sediment and contact stresses in the zone of interaction of the plate with the elastic base.

Keywords: infinite regular plate system, orthotropic plate, variation-difference method, elastic layer, contact zone, plate deflections, base precipitation, contact stresses, internal forces, physical nonlinearity.