

Численный метод расчета балки переменного сечения, лежащей на упругом основании

¹*ХАБИДОЛДА Омирхан, PhD, старший преподаватель, oka-kargtu@mail.ru,

²АХМЕДИЕВ Серик Кабултаевич, к.т.н., профессор, s.ahmediev@kstu.kz,

³ЖОЛМАГАМБЕТОВ Сырлыбек Рысбекович, к.т.н., доцент, syrlybekzh@mail.ru,

³КОЖАСОВ Сарсенбек Кенжебекович, научный сотрудник, sarsenbek@yandex.ru,

³АДЕКЕНОВ Берикказы Серикович, младший научный сотрудник, adberik@mail.ru,

¹Карагандинский университет имени Е.А. Букетова, Казахстан, Караганда, ул. Университетская, 28,

²НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», Казахстан, Караганда, пр. Н. Назарбаева, 56,

³Казахстанский многопрофильный институт реконструкции и развития, Казахстан, Караганда, пр. Н. Назарбаева, 56/б,

*автор-корреспондент.

Аннотация. В данной работе выполнено исследование балки переменной изгибной жесткости, лежащей на упругом основании (кирпичной стене). Упругое основание на исследуемую конструкцию создает специфический эффект в виде его отпора (реакция основания). Таким образом, при исследовании конструкций на упругом основании необходимо рассматривать в едином целом физическую модель «конструкция-основание». На основе классической модели Винклера приведены разрешающие уравнения метода конечных разностей (МКР) для 11-ти расчетных узлов линейной сетки (в общем виде). Исследовано влияние на параметры напряженно-деформированного состояния (прогибы, изгибающие моменты) переменности модуля упругости упругого основания. Приведено сравнение результатов исследований авторов с другими методами (например, с методом профессора Б.Н. Жемочкина). Показана близость полученных результатов, что подтверждает достоверность теоретических и прикладных положений, приведенных в данной работе.

Ключевые слова: теория упругости, расчет балок, упругое основание, метод конечных разностей, совместный расчет зданий, метод сеток, модуль упругости, прогиб, изгиб, балка, эпюра, момент, фундамент, модели основания.

Введение

В строительном деле конструкции зачастую опираются по всей их длине на нижележащие конструкции или на поверхность земли (грунта). В этом случае необходимо учитывать жесткость (или податливость) условий опирания конструкций. Расчету конструкций, лежащих на упругом основании, посвящено множество научных работ [1-3]. Современные методы исследования при проектировании фундаментных плит и дорожных покрытий основаны как на численных методах расчета, так и на аналитических [4, 5]. В работах [6, 7] исследование балок, лежащих свободно на упругом основании, производится численным методом последовательных приближений, который позволяет учитывать различные виды крайних условий (без привлечения законтурных узлов). В исследовании [8] приведен расчет системы «здание – фундамент» на основе аналитического и численного метода с применением модели «Винклеровского» основания. Приведен способ

упрощения расчета для стадии предпроектных решений. В работе [9] численным методом найдены прогибы в узлах балки – полосы на упругом основании. В исследовании [10] рассматривается балка переменной жесткости, решение достигается на основе соответствующего программного комплекса. В научной статье [11] рассмотрен алгоритм расчета полубесконечной составной балки, расположенной на упругом Винклеровском основании, нагруженной вертикальной сосредоточенной силой.

Таким образом, исследование напряженно-деформированного состояния подобных конструкций проводится различными методами: аналитическими, вариационными, численными.

Преимущество численных методов заключается в простоте полученных решений в конечном, числовом виде, при этом за счет соответствующих параметров элементов линейной сетки достигается приемлемая для научных исследований и инженерных расчетов точность.

Методы

В данной работе проведено исследование изгибного состояния железобетонной балки с переменной высотой поперечного сечения по её длине при действии на неё произвольно расположенных сосредоточенных сил, которая опирается по всей своей ее длине на кирпичную стену (рисунок 1).

Исходные данные (для 3-х составных частей 1, 2, 3): $J_1 = 10,417 \cdot 10^{-3} \text{ (м}^4\text{)}$; $J_2 = 42,667 \cdot 10^{-3} \text{ (м}^4\text{)}$; $J_3 = 5,334 \cdot 10^{-3} \text{ (м}^4\text{)}$.

Модуль упругости материала железобетонной балки – $E = 2,1 \cdot 10^4 \text{ МПа}$. Модуль упругости основания – $E_0 = 0,3 \cdot 10^4 \text{ МПа}$.

Исходное дифференциальное уравнение изгиба балки переменного поперечного сечения, лежащего на упругом основании [2]:

$$[EJ(x)y''(x)]' + K(x)y(x) - q(x) = 0, \quad (1)$$

где $y(x)$ – функция прогибов балки; $EJ(x)$ – функция изгибной жесткости балки; $K(x)$ – функция коэффициентов постели основания (постоянная Винклера); $q(x)$ – внешняя, распределенная по длине балки нагрузка.

В дальнейшем уравнение (1) будет реализовано методом конечных разностей (МКР) для i -го узла линейной сетки с равными шагами сетки (рисунок 2).

$$\begin{aligned} EJ_3 &= EJ_0 = 11,2014 \cdot 10^4 \text{ кНм}^2; \\ EJ_2 &= 8EJ_0 = 89,6 \cdot 10^4 \text{ кНм}^2; \\ EJ_1 &= 1,953EJ_0 = 21,8757 \cdot 10^4 \text{ кНм}^2. \end{aligned}$$

Конечно-разностное уравнение имеет известный вид [10, 12] (для i -го узла).

$$\begin{aligned} \alpha_k y_k - 2(\alpha_k + \alpha_i) y_i + (\alpha_k + 4\alpha_i + \alpha_e + \frac{K\lambda^4}{EJ_0}) y_i - \\ - 2(\alpha_i + \alpha_e) y_l + \alpha_l y_o = \frac{P_i \lambda^3}{EJ_0}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\alpha_k = EJ_k / EJ_0$, $\alpha_i = EJ_i / EJ_0$, $\alpha_l = EJ_l / EJ_0$ – жесткостные параметры в узлах сетки, $EJ_0 = 11 \cdot 10^4 \text{ кПа}$ – изгибная жесткость участка (рисунок 3).

На нижнюю грань железобетонной балки нанесем линейную сетку с шагом ($\lambda = l/10 = 5/10 = 0,5 \text{ м}$) (рисунок 3). Здесь: а, б, в, г – законтурные узлы, которые будут исключаться с использованием граничных условий на концах балки (узлы 1, 11). Из граничных условий (рисунок 3):

$$\begin{aligned} M_1 &= EJ \left(\frac{d^2 y}{dx^2} \right)_1 = 0, \quad y_6 = 2y_1 - 2y_2; \\ Q_1 &= EJ \left(\frac{d^3 y}{dx^3} \right)_1 = 0, \quad y_a = 4(y_1 - y_2 + y_3); \\ M_{11} &= EJ \left(\frac{d^2 y}{dx^2} \right)_{11} = 0, \quad y_b = 2y_{11} - y_{10}; \\ Q_{11} &= EJ \left(\frac{d^3 y}{dx^3} \right)_{11} = 0, \quad y_2 = 4(y_{11} - y_{10}) + y_9. \end{aligned}$$

По рисунку 3:

$$\begin{aligned} \alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = \alpha_5 = 1,953; \\ \alpha_6 = \alpha_7 = \alpha_8 = 8,0; \quad \alpha_9 = 4,5; \quad \alpha_{10} = \alpha_{11} = 1,0. \end{aligned} \quad (3)$$

Определим коэффициент постели для кирпичной стены ($E_0 = 3 \cdot 10^6 \text{ кН/м}^2$, $\mu = 0,42$).

а) по [13]:

$$C_z = \aleph_z \left(\frac{E_0}{1 - \mu^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{F}} \right). \quad (4)$$

Здесь, $\aleph_z = 2,0$; $\mu = 0,42$; $F = 1 \cdot 5 = 5 \text{ м}^2$ – площадь подошвы фундамента железобетонной балки.

$$C_z = \frac{1}{\sqrt{5}} \cdot \frac{2,0 \cdot 3 \cdot 10^6}{1 - 0,42^2} = 3,258 \cdot 10^6 \text{ кН/м}^2.$$

б) по [11]:

$$C_s = \frac{E_s}{f\sqrt{F}}. \quad (5)$$

Здесь, $E_s = E_0 = 3 \cdot 10^6 \text{ кН/м}^2$; $f = 0,4$; $C_s = \frac{3 \cdot 10^6}{0,4\sqrt{5}} \text{ кН/м}^2$.

К расчету принимаем среднее значение:

$k = C_z = C_s = \frac{(3,354 + 3,258)}{2} \cdot 10^6 = 3,306 \cdot 10^6 \text{ кН/м}^2$ – параметр, учитывающий упругость основания [2].

По формулам (4), (5) вычислим коэффици-

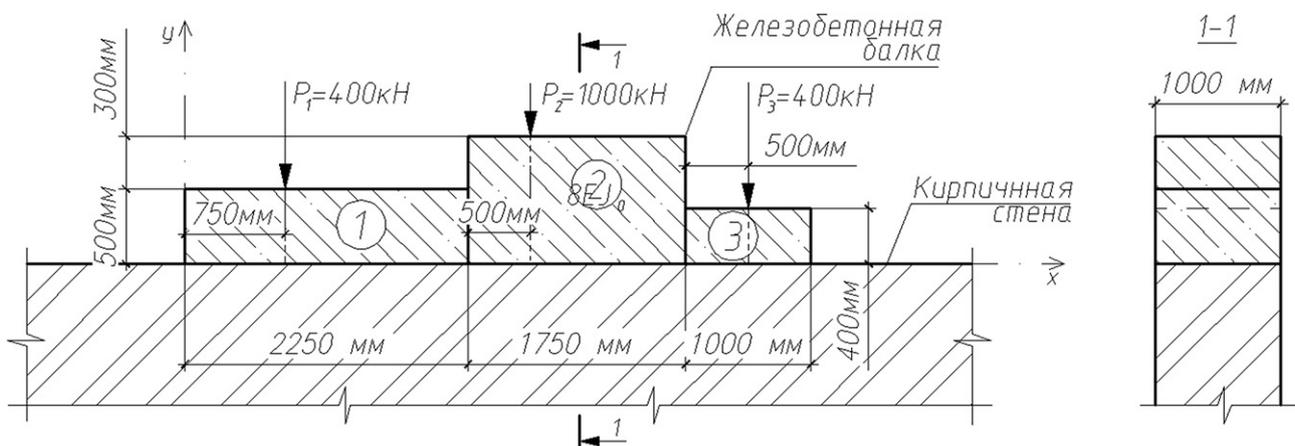


Рисунок 1 – Исходная схема конструкций момента инерции

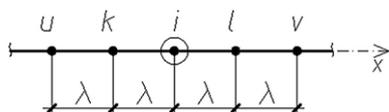


Рисунок 2 – Линейный сеточный шаблон

енты постели и параметры упругости основания (грунта) (рисунок 1):

а) для участка 1 ($\mu = 0,42; F_1 = 2,25 \text{ м}^2; \lambda = 0,5 \text{ м}$):

$$C_1 = \frac{2,0 \cdot 3 \cdot 10^6}{(1 - 0,42^2) \cdot \sqrt{2,25}} = 4,8567 \cdot 10^6 \text{ кН/м}^2;$$

$$k_1 = \frac{4,8567 \cdot 10^6 \cdot (0,0625)}{11,2014 \cdot 10^4} = 2,7099.$$

б) для участка 2 ($F_2 = 1,75 \text{ м}^2$):

$$C_2 = \frac{2,0 \cdot 3 \cdot 10^6}{0,8236 \cdot \sqrt{1,75}} = 5,5066 \cdot 10^6 \text{ кН/м}^2;$$

$$k_2 = \frac{5,5066 \cdot 10^6 \cdot (0,0625)}{11,2014 \cdot 10^4} = 3,0725.$$

в) для участка 3 ($F_3 = 1,0 \text{ м}^2$):

$$C_3 = \frac{2,0 \cdot 3 \cdot 10^6}{(1 - 0,42^2) \cdot \sqrt{1,0}} = 7,285 \cdot 10^6 \text{ кН/м}^2;$$

$$k_3 = \frac{7,285 \cdot 10^6 \cdot (0,0625)}{11,2014 \cdot 10^4} = 4,0678.$$

$$k_1 = 2,7099; \quad k_2 = 3,0725; \quad k_3 = 4,0678. \quad (6)$$

По значениям коэффициентов k_1, k_2, k_3 выполним расчет балки переменной изгибной жесткости методом конечных разностей (МКР). В таблице 1 дана разрешающая квадратная матрица 11-го порядка, соответствующая МКР, разработанная авторами статьи:

$$A\vec{y} = \vec{P}, \quad (7)$$

где $\vec{y} = \{y_1, y_2, \dots, y_{11}\}$ – вектор узловых перемещений (прогибов) балки; $\vec{P} = \{P_1, P_2, \dots, P_{12}\}$ – вектор свободных членов, учитывающий внешнюю нагрузку.

Решение уравнения (7) и получение вектора \vec{y} (таблица 2).

Значение реакции (отпор основания (грунта)) вычисляется по формуле:

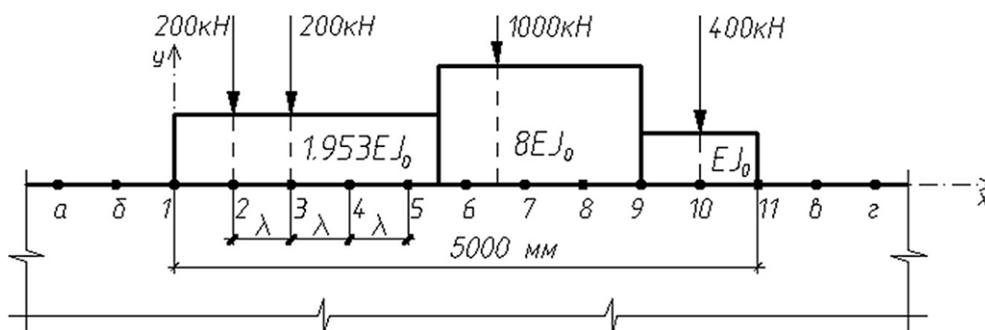


Рисунок 3 – Расчетная схема балки МКР

Таблица 1 – Разрешающая матрица «А» МКР (в уравнении 7)

№	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6	y_7	y_8	y_9	y_{10}	y_{11}	Правая часть
1	$3.906+C_1$	-3.906	1.953	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	-3.906	$9.765+C_1$	-7.812	1.953	0	0	0	0	0	0	0	2.232×10^{-4}
3	1.953	-7.812	$11.718+C_1$	-7.812	1.953	0	0	0	0	0	0	2.232×10^{-4}
4	0	1.953	-7.812	$11.718+C_1$	-7.812	1.953	0	0	0	0	0	0
5	0	0	1.953	-7.812	$17.765+C_1$	-19.906	8	0	0	0	0	0
6	0	0	0	1.953	-19.906	$41.95+C_2$	-32	8	0	0	0	11.16×10^{-4}
7	0	0	0	0	8	-32	$48+C_2$	-32	8	0	0	0
8	0	0	0	0	0	8	-25	$48+C_2$	-25	4.5	0	0
9	0	0	0	0	0	0	8	-25	$27+0.5(C_1+C_2)$	-11	1	0
10	0	0	0	0	0	0	0	4.5	-11	$8.5+C_3$	-2	2.232×10^{-4}
11	0	0	0	0	0	0	0	0	2	-4	$8.5+C_3$	0

$$P(x) = R(x) \cdot y(x), \quad (8)$$

где $R(x)$ – коэффициенты (параметры) упругости постели (основания) (6).

Значение изгибающих моментов в узлах сетки вычисляется по следующей формуле (рисунок 2) для i -го узла:

$$M_i = EJ_i \left(\frac{d^2 y}{dx^2} \right) = \frac{EJ_i}{\lambda^2} (y_k - 2y_i + y_c). \quad (9)$$

На рисунке 4 приведены результаты расчета рассматриваемой балки в виде эпюр прогибов y_i

(рисунок 4, а), эпюры реакций (отпор основания (грунта)) (рисунок 4, б), эпюры изгибающих моментов (рисунок 4, в).

В работе профессора Б.Н. Жемочкина выполнен расчет балки со следующими результатами:

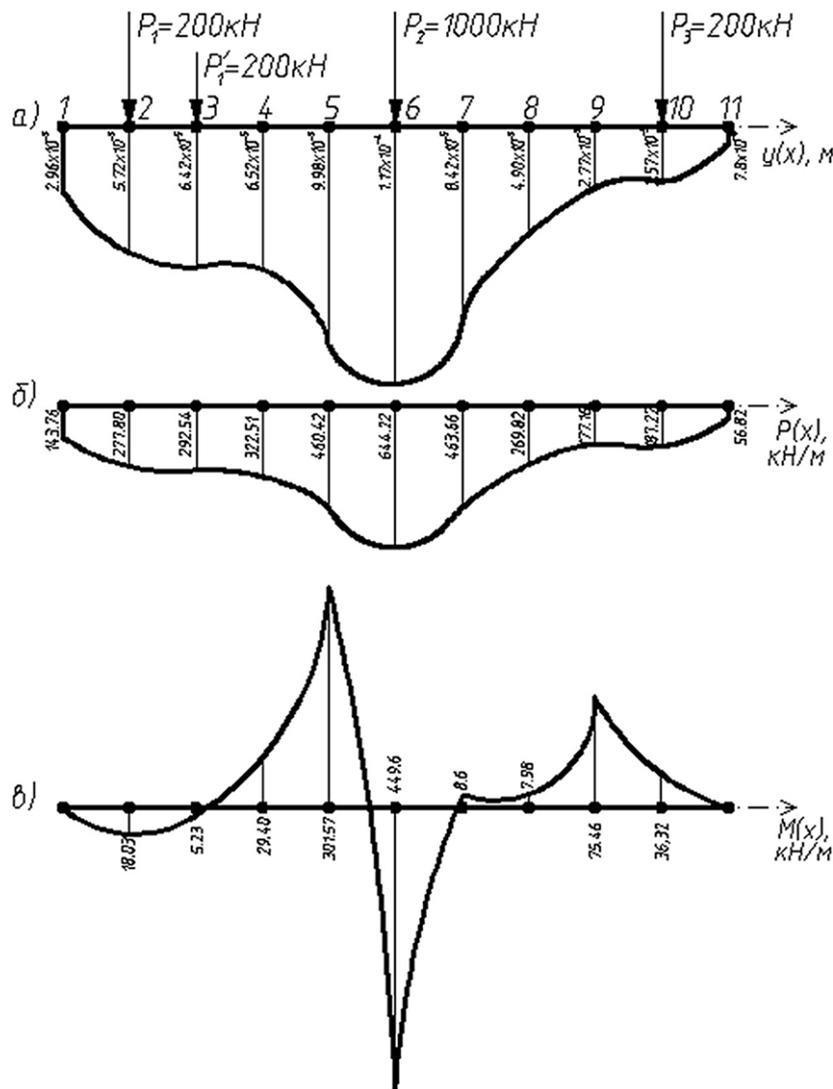
$$\begin{aligned} P_6(x) &= 49,4 \text{ Т/м} = 494 \text{ кН/м}; \\ M_6(x) &= 27,1 \text{ Т/м} = 271 \text{ кН/м}. \end{aligned} \quad (10)$$

Значения (10) близки к величинам, приведенным на рисунке 4, б, в.

Далее выполним исследование влияния степени упругости основания, меняя значения коэф-

Таблица 2 – Значение прогибов балки в узлах сетки

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$y_i, \text{ м}$ (рисунок 3)	2.96×10^{-5}	5.78×10^{-5}	6.42×10^{-5}	6.52×10^{-5}	9.98×10^{-5}	1.17×10^{-4}	8.42×10^{-5}	4.90×10^{-5}	2.77×10^{-5}	2.27×10^{-5}	7.80×10^{-5}



а) – эпюра осадок; б) – эпюра опорных реакций; в) – эпюра момента

Рисунок 4 – Результаты расчета балки на рисунке 1

фициентов постели (k_i) и параметров упругости (C_i) (таблица 3).

По данным таблицы 3 произведем расчет балки переменной изгибной жесткости, расположенной на упругом основании (грунта) (рисунок 1). В таблице 4 приведена зависимость результатов по прогибам в узлах 2, 3, 6, 10, 11 балки (рисунок 3) от изменения величин модуля упругости материала основания (грунта) при монотонном их уменьшении на один порядок.

По данным таблицы 4 на рисунке 5 показан график зависимости $y_i = f(E_0)$, ($i=2, 3, 6, 10, 11$).

Выводы:

1. В данной работе исследовано изгибное состояние железобетонной балки переменной изгибной жесткости, расположенной на упругой полуплоскости (модель Винклера) (рисунок 1).

2. Исследование проведено на основе исходного неоднородного дифференциального уравнения 4-го порядка с учетом внешней нагрузки и коэффициентов постели упругого основания (грунта) (уравнение 1).

3. На основе классической процедуры метода конечных разностей (МКР) получены типовые

Таблица 3 – Величины коэффициентов постели и параметров упругости основания

№	Модуль упругости материала основания, кПа	Коэффициенты постели, кг/м ²			Параметры упругости		
		k_1	k_1	k_1	C_1	C_2	C_2
1	$3 \cdot 10^6$	$4.8567 \cdot 10^6$	$5.5066 \cdot 10^6$	$7.285 \cdot 10^6$	2.7099	3.0725	4.06478
2	$3 \cdot 10^5$	$4.8567 \cdot 10^5$	$5.5066 \cdot 10^5$	$7.285 \cdot 10^5$	0.2710	0.3073	0.4065
3	$1.5 \cdot 10^5$	$4.8567 \cdot 10^4$	$5.5066 \cdot 10^4$	$7.285 \cdot 10^4$	0.136	0.154	0.203
4	$1.0 \cdot 10^5$	$4.8567 \cdot 10^3$	$5.5066 \cdot 10^3$	$7.285 \cdot 10^3$	0.09	0.102	0.135
5	$0.75 \cdot 10^4$	$4.8567 \cdot 10^2$	$5.5066 \cdot 10^2$	$7.285 \cdot 10^2$	0.06	0.077	0.102
6	$0.6 \cdot 10^4$	48.567	55.066	72.85	0.05	0.061	0.081
7	$5 \cdot 10^4$	4.8567	5.5066	7.285	0.04	0.051	0.058
8	$4.2 \cdot 10^3$	4.8567	5.5066	7.285	0.034	0.0844	0.051

Таблица 4 – Прогибы балки по узлам сетки

Узлы сетки, (рисунок 3)	Прогибы балки y_i , м (при значении E_0 , кПа)							
	$3 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^5$	$1.5 \cdot 10^5$	$1.0 \cdot 10^5$	$0.75 \cdot 10^4$	$0.6 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^4$	$4.2 \cdot 10^3$
2	$2.96 \cdot 10^{-5}$	$4.48 \cdot 10^{-4}$	$1.091 \cdot 10^{-3}$	$1.816 \cdot 10^{-3}$	$2.583 \cdot 10^{-3}$	$3.337 \cdot 10^{-3}$	$4.18 \cdot 10^{-3}$	$4.997 \cdot 10^{-3}$
3	$6.42 \cdot 10^{-5}$	$7.16 \cdot 10^{-4}$	$1.459 \cdot 10^{-3}$	$2.206 \cdot 10^{-3}$	$2.956 \cdot 10^{-3}$	$3.708 \cdot 10^{-3}$	$5.217 \cdot 10^{-3}$	$5.934 \cdot 10^{-3}$
6	$8.42 \cdot 10^{-5}$	$8.353 \cdot 10^{-4}$	$1.536 \cdot 10^{-3}$	$2.20 \cdot 10^{-3}$	$2.846 \cdot 10^{-3}$	$3.484 \cdot 10^{-3}$	$4.116 \cdot 10^{-3}$	$4.75 \cdot 10^{-3}$
10	$2.57 \cdot 10^{-5}$	$2.985 \cdot 10^{-4}$	$6.446 \cdot 10^{-4}$	$1.025 \cdot 10^{-3}$	$1.419 \cdot 10^{-3}$	$1.82 \cdot 10^{-3}$	$2.226 \cdot 10^{-3}$	$2.636 \cdot 10^{-3}$
11	$7.80 \cdot 10^{-6}$	$1.297 \cdot 10^{-4}$	$3.737 \cdot 10^{-4}$	$6.682 \cdot 10^{-4}$	$9.882 \cdot 10^{-4}$	$1.323 \cdot 10^{-3}$	$1.667 \cdot 10^{-3}$	$2.018 \cdot 10^{-3}$

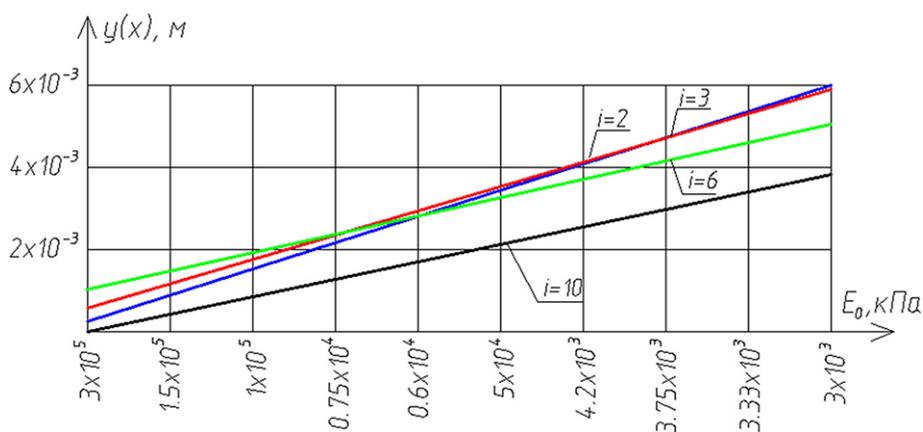


Рисунок 5 – Зависимость прогибов балки на упругом основании от величин модуля деформации материала основания

разрешающие конечно-разностные уравнения (выражения 2).

4. Разрешающая матрица 11-го порядка учитывает переменность изгибной жесткости балки, величины сосредоточенных узловых сил, а также переменные параметры упругости (C_i) связанных с переменным значением коэффициентов постели основания (k_i) (таблица 1).

5. На основе разрешающих матриц выполнен тестовый расчет балки, результаты приведены в таблице 2; по формулам (8), (9) определены величины опорных реакций (отпор) и изгибающие моменты по оси железобетонной балки (рисунок 4); приведенные результаты хорошо согласуются с аналогичными, полученными по методу профессора Б.Н. Жемочкина, что подтверждает достоверность теоретических и расчетных положений

авторов.

6. Выполнено исследование влияния свойств упругого основания (грунтов) – модуля их деформации – на величину прогибов в узлах балки (таблица 4). На рисунке 5 показан график зависимости прогибов балки от изменения модуля упругости материала основания (грунта): установлено, что при монотонном уменьшении величины E_0 , прогибы в узлах балки монотонно уменьшаются в узлах 2, 3, 6, 10, 11. Данные этого графика позволяют вычислить прогибы балки при любых значениях E_0 .

7. Полученные в данной работе теоретические и практические результаты найдут широкое применение как в строительной технике, так и в научных исследованиях работы строительных конструкций на упругих основаниях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барменкова Е.В. Расчет плит переменной жесткости на упругом основании с переменным коэффициентом постели // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2019. – № 1. – С. 201-208. <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2019-21-1-201-208>
2. Цвей А.Ю. Балки и плиты на упругом основании. – М.: Мади, 2014. – 96 с.
3. Потапов В.Д. К вопросу о расчете балок на нелокально упругом основании // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2014. – № 4. С. 63-68.
4. Матрасов А.В. Численно-аналитический алгоритм метода начальных параметров для расчета балок на упругом основании // Вестник Санкт-Петербургского университета. – 2013. – № 2. – С. 72-81.
5. Andreev V.I. The calculation of the two-layer beam model on an elastic basis with variable modulus of subgrade reaction / V.I. Andreev, E.V., Varmenkova, A.V. Matveeva // Applied Mechanics and Materials. – 2013. – Vol. 351-352. – pp. 566-569.
6. Филатов В.В., Кужин Б.Ф., Тхи Линь Куен Хоанг. Расчет двухслойной составной балки, свободно лежащей на упругом основании // Вестник МГСУ. – 2020. – Т. 15 (12). – С. 1685-1692. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.12.1685-1692
7. Габбасаов Р.Ф., Уварова Н.Б., Филатов В.В. Расчет балок на упругом основании с двумя коэффициентами постели // Вестник МГСУ. – 2020. – № 2. – С. 25-29.
8. Андреев В.И., Барменкова Е.В. Моделирование реальной системы «здание – фундамент – основание» двухслойной балкой переменной жесткости на упругом основании // Вестник МГСУ. – 2012. – № 6. – С. 37-41.
9. Демченко Д. Б., Маяцкая И. А., Полисмаков А. И. Численная реализация задачи об изгибе балки-полосы на упругом основании методом конечных разностей // Молодой исследователь Дона. – 2017. – № 2 (5). – С. 81-94.
10. Андреев В.И., Барменкова Е.В., Матвеева А.В. Расчет плит переменной жесткости на упругом основании методом конечных разностей // Вестник МГСУ. – 2014. – № 12. – С. 31-39.
11. Атаров Н.М., Леонтьев А.Н., Леонтьева А.Г. Изгиб составной балки, расположенной на упругом основании // Вестник МГСУ. – 2011. – № 4. – С. 212.
12. Лебедев А.В. Численные методы расчета строительных конструкций / СПбГАСУ. СПб, 2012. – 55 с.
13. Савельев, А.В. Основания и фундаменты сооружений. – М.: МГАВТ, 2014. – 119 с.

Серпімді негіздегі айнымалы қималы арқалықты есептеудің сандық әдісі

¹*ХАБИДОЛДА Омирхан, PhD, аға оқытушы, oka-kargtu@mail.ru,

²АХМЕДИЕВ Серик Кабултаевич, т.ф.к., профессор, s.ahmediev@kstu.kz,

³ЖОЛМАГАМБЕТОВ Сырлыбек Рысбекович, т.ф.к., доцент, syrlybekzh@mail.ru,

³КОЖАСОВ Сарсенбек Кенжебекович, ғылыми қызметкер, sarsenbek@yandex.ru,

³АДЕКЕНОВ Берикказы Серикович, кіші ғылыми қызметкер, adberik@mail.ru,

¹Е.А. Бөкетов атындағы Қарағанды университеті, Қазақстан, Қарағанды, Университет көшесі, 28,

²«Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті» КеАҚ, Қазақстан, Қарағанды, Н. Назарбаев даңғылы, 56,

³Қазақстандық көп салалы қайта құру және даму институты, Қазақстан, Қарағанды, Н. Назарбаев даңғылы, 56/б,

*автор-корреспондент.

Аңдатпа. Мақалада серпімді негіздегі (кірпіш қабырға) иілу қатаңдығы айнымалы арқалықты сандық әдіспен зерттеуі қарастырылған. Серпімді негіз зерттелетін құрылымға қарсыласу түрінде өзіндік әсер көрсетеді

(негіздер реакциясы). Осылайша, серпімді негіздегі құрылымдарды зерттеу кезінде «құрылым-негіз» физикалық моделін тұтастай қарастыру қажет. Винклердің классикалық моделі негізінде сызықтық тордың 11 есептелген түйіндері үшін (жалпы түрде) ақырлы элементтер әдісінің шешуші теңдеулері келтірілген. Винклердің классикалық моделіне сүйене отырып, ақырғы айырмашылықтар әдісінің рұқсат беретін теңдеулері 11 есептелген сызықтық тор түйіндері үшін (жалпы) беріледі. Сонымен қатар, серпімді негіздегі айнымалы модулінің кернеулі-деформациялық күйінің (иілуі, иілу моменті) параметрлеріне әсері зерттелген. Зерттеу барысында алынған нәтижелер басқа әдістермен салыстырылған (профессор Б.Н. Жемочкина әдісімен). Осы жұмыстағы нәтижелер көрсетілген теориялық және қолдану ережелерінің дұрыстығын растайды.

Кілт сөздер: серпімділік теориясы, серпімді негіздегі арқалық есебі, ақырлы айырымдар әдісі, ғимараттардың бірлескен есебі, тор әдісі, серпімділік модулі, иілу, майысу, арқалық, эпюра, момент, іргетас, базалық модель.

Numerical Method of Calculating a Variable Section Beam Lying on an Elastic Base

¹*KHABIDOLDA Omirkhan, PhD, Senior Lecturer, oka-kargtu@mail.ru,

²AKHMEDIYEV Serik, Cand. of Tech. Sci., Professor, s.ahmediev@kstu.kz,

³ZHOLMAGAMBETOV Syrlybek, Cand. of Tech. Sci., Associate Professor, syrlybekzh@mail.ru,

³KOZHASOV Sarsenbek, Researcher, sarsenbek@yandex.ru,

³ADEKENOV Berikkazy, Junior Researcher, adberik@mail.ru,

¹Karaganda Buketov University, Kazakhstan, Karaganda, University Street, 28,

²NPJSC «Abylkas Saginov Karaganda Technical University», Kazakhstan, Karaganda, N. Nazarbayev Avenue, 56,

³Kazakhstan Multidisciplinary Institute for Reconstruction and Development, Kazakhstan, Karaganda, N. Nazarbayev Avenue, 56/6,

*corresponding author.

Abstract. In this work, there has been studied a beam of variable bending stiffness that lies on an elastic base (brick wall). The elastic base renders a specific effect on the structure under study in the form of its rebound (the base reaction). Thus, when studying structures on an elastic base, it is necessary to consider the physical model «structure-base» as a whole. On the basis of the classical Winkler model, the resolving equations of the finite difference method (FDM) for 11 computational nodes of the linear grid (in general form) are given. The effect of the stress-strain state on the parameters (deflections, bending moments) of the variability of the elastic base elastic modulus has been studied. The comparison of the research results of the authors with other methods (for example, with the method of Professor B.N. Zhemochkin) is given. The closeness of the results obtained is shown, which confirms reliability of the theoretical and applied provisions presented in this work.

Keywords: theory of elasticity, calculation of beams on an elastic base, finite difference method, joint calculation of buildings, method of grids, elasticity modulus, flexure, bending, beam, curve, moment, foundation, base models.

REFERENCES

1. Barmekova E.V. Strength analysis of variable rigidity slabs on elastic support with variable subgrade ratio // JOURNAL of Construction and Architecture. – 2019. – No. 1. pp. 201-208.
2. Tsvei A.Yu. Beams and plates on elastic base. Moscow: MADI, 2014. – 96 p.
3. Potapov V.D. On calculation of bars lying on nonlocal elastic base // Structural mechanics of engineering constructions and buildings. – 2014. – No. 4. pp. 63-68.
4. Matrasov A.V. Chislenno-analiticheskij algoritm metoda nachal'nyh parametrov dlya rascheta balok na uprugom osnovanii // Vestnik Sankt-Petersburgskogo universiteta. – 2013. – No. 2. – pp. 72-81.
5. Andreev V.I. The calculation of the two-layer beam model on an elastic basis with variable modulus of subgrade reaction / V.I. Andreev, E.V., Barmenkova, A.V. Matveeva // Applied Mechanics and Materials. – 2013. – Vol. 351-352. – pp. 566-569.
6. Filatov V.V., Kuzhin B.F., Thi Lin' Kuen Hoang. Raschet dnuhslojnoj sostavnoj balki, svobodno lezhashhej na uprugom osnovanii // Vestnik MGSU. – 2020. – T. 15. – Vyp. 12. – pp. 1685-1692. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.12.1685-1692
7. Gabbasaov R.F., Uvarova N.B., Filatov V.V. Raschet balok na uprugom osnovanii s dvumja koeficientami posteli // Vestnik MGSU. – 2020. – No. 2. – pp. 25-29.
8. Andreev V.I., Barmenkova E.V. Modelirovanie real'noj sistemy «zdanie – fundament – osnovanie» dnuhslojnoj balkoj peremennoj zhestkosti na uprugom osnovanii // Vestnik MGSU. – 2012. – No. 6. – pp. 37-41.
9. Demchenko D.B., Majackaja I.A., Polismakov A.I. Chislenaja realizacija zadachi ob izgibe balki-polosy na uprugom osnovanii metodom konechnyh raznostej // Molodoj issledovatel' Dona. – 2017. – No. 2 (5). – pp. 81-94.
10. Andreev V.I., Barmenkova E.V., Matveeva A.V. Raschet plit peremennoj zhestkosti na uprugom osnovanii metodom konechnyh raznostej // Vestnik MGSU. – 2014. – No. 12. – pp. 31-39.
11. Atarov N.M., Leont'ev A.N., Leont'eva A.G. Izgib sostavnoj balki, raspolozhennoj na uprugom osnovanii // Vestnik MGSU. – 2011. – No. 4. – P. 212.
12. Lebedev A.V. Numerical methods of designing building structures / SPbSACU. Saint Petersburg, 2012. – 55 p.
13. Savel'ev, A.V. Osnovaniya i fundamenty` sooruzhenij. – Moscow: MGAVT, 2014. – 119 p.