

Метод итераций для расчета железобетонных элементов на основе нелинейной деформационной модели

Андрей Викторович ШЕВЧЕНКО¹, кандидат технических наук, главный инженер, e-mail: a.shevchenko@ktbbeton.com

Артём Алексеевич ДАВИДУК², кандидат технических наук, доцент, e-mail: artemd@ktbbeton.com

Николай Николаевич БАГЛАЕВ¹, генеральный директор, e-mail: n.baglaev@ktbbeton.com

¹ КТБ Железобетон, 109428 Москва, 2-я Институтская ул., 6, стр. 64

² Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337 Москва, Ярославское ш., 26

Аннотация. Несмотря на бурное развитие методов нелинейного расчета, приведенных в многочисленных публикациях и нормативной литературе, практически отсутствует их численная реализация, а также подробное описание алгоритмов расчета. В статье рассматривается решение системы уравнений нелинейной деформационной модели нормального сечения сжато-изогнутого элемента методом итераций. Подробно излагается разбиение нормального сечения на отдельные участки, порядок вычисления жесткостных коэффициентов, определение текущего модуля деформаций, положение нейтрального слоя на начальном и последующих этапах итерационного процесса. Приводится анализ сходимости итерационного процесса и оценки точности расчета. Даны численный пример расчета с диаграммами деформирования стали и бетона, анализ и сравнение результатов с нормативной методикой. Проведены дополнительные численные исследования и построена поверхность предельных усилий сжато-изогнутого элемента. Для решения уравнений в физически нелинейной постановке применен метод итераций. Статья может быть полезна специалистам, область деятельности которых связана с расчетами строительных конструкций в физически нелинейной постановке.

Ключевые слова: железобетонные изгибаемые элементы, расчет строительных конструкций, итерационный метод, нелинейная деформационная модель, напряженно-деформированное состояние.

ITERATION METHOD FOR THE CALCULATION OF REINFORCED CONCRETE ELEMENTS BASED ON A NONLINEAR DEFORMATION MODEL

Andrey V. SHEVCHENKO¹, e-mail: a.shevchenko@ktbbeton.com

Artem A. DAVIDYUK², e-mail: artemd@ktbbeton.com

Nikolay N. BAGLAEV¹, e-mail: n.baglaev@ktbbeton.com

¹ KTB Beton Group, 2nd Institutskaya ul., 6, str. 64, Moscow 109428, Russian Federation

² Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavl'skoe shosse, 26, Moscow 129337, Russian Federation

Abstract. Despite the rapid development of nonlinear calculation methods given in numerous monographs and normative literature, there is practically no numerical implementation of them, as well as a detailed description of calculation algorithms. The article considers the solution of the equation system of a nonlinear deformation model of a normal section of a compressed-curved element by the iteration method. The splitting of the normal section into separate sections, the procedure for calculating the stiffness coefficients, the determination of the secant modulus of deformations, the position of the neutral layer at the initial and subsequent stages of the iterative process are considered in detail. The analysis of the convergence of the iterative process and the estimation of the calculation accuracy is given. A numerical example of calculation with diagrams of concrete steel deformation is given and an analysis and comparison of the results with the normative methodology are presented. Additional numerical studies were carried out and the surface of the limiting forces of the compressed-curved element was constructed. To solve the equations in a physically nonlinear formulation, the iteration method is used. The article may be useful for specialists whose field of activity is related to the calculations of building structures in a physically nonlinear formulation.

Keywords: reinforced concrete bendable elements, calculation of building structures, iterative method, nonlinear deformation model, stress-strain state.

Введение

В настоящее время методика расчета нормальных сечений на основе нелинейной деформационной модели получила значительное развитие в мно-

гочисленных публикациях [1–9]. Однако в нормативных и методических документах отсутствует ее численная реализация, что вызывает затруднения у инженеров при выборе как методики решения та-

ких систем уравнений, так и инструмента для их решения.

Цель данной работы — численная реализация определения напряженно-деформированного состояния нормального сечения железобетонных элементов на основе нелинейной деформационной модели.

Методика расчета нормальных сечений

Рассмотрим решение такой задачи для сечения, где действуют как продольная сила, так и изгибающие моменты. Уравнения равновесия приняты в следующем виде [10]:

$$D_{11} \frac{1}{\rho_x} + D_{12} \frac{1}{\rho_y} + D_{13} \varepsilon_0 = M_x; \quad (1)$$

$$D_{21} \frac{1}{\rho_x} + D_{22} \frac{1}{\rho_y} + D_{23} \varepsilon_0 = M_y; \quad (2)$$

$$D_{31} \frac{1}{\rho_x} + D_{32} \frac{1}{\rho_y} + D_{33} \varepsilon_0 = N, \quad (3)$$

где M_x и M_y — изгибающие моменты относительно осей сечения; N — продольная сила от внешней нагрузки; $D_{11}, D_{12}, D_{13}, D_{21}, D_{22}, D_{23}, D_{31}, D_{32}, D_{33}$ — коэффициенты, определяемые по методике [10]; $1/\rho_x, 1/\rho_y$ — кривизна продольной оси элемента в плоскости действия соответствующего изгибающего момента; ε_0 — относительная деформация (сжатия или растяжения) сечения в целом.

Примем некоторое приближенное решение уравнений (1)–(3), приводя их к следующему виду [11]:

$$\left(\frac{1}{\rho_x}\right)^{(k)} = \frac{M_x}{D_{11}^{(k-1)}} - \left(\frac{D_{12}^{(k-1)}}{D_{11}^{(k-1)}}\right) \left(\frac{1}{\rho_y}\right)^{(k-1)} - \left(\frac{D_{13}^{(k-1)}}{D_{11}^{(k-1)}}\right) (\varepsilon_0)^{(k-1)}; \quad (4)$$

$$\left(\frac{1}{\rho_y}\right)^{(k)} = \frac{M_y}{D_{22}^{(k-1)}} - \left(\frac{D_{21}^{(k-1)}}{D_{22}^{(k-1)}}\right) \left(\frac{1}{\rho_x}\right)^{(k-1)} - \left(\frac{D_{23}^{(k-1)}}{D_{22}^{(k-1)}}\right) (\varepsilon_0)^{(k-1)}; \quad (5)$$

$$(\varepsilon_0)^{(k)} = \frac{N}{D_{33}^{(k-1)}} - \left(\frac{D_{31}^{(k-1)}}{D_{33}^{(k-1)}}\right) \left(\frac{1}{\rho_x}\right)^{(k-1)} - \left(\frac{D_{32}^{(k-1)}}{D_{33}^{(k-1)}}\right) \left(\frac{1}{\rho_y}\right)^{(k-1)}; \quad (6)$$

где k — номер итерации.

Для оценки сходимости итерационного процесса должно выполняться условие

$$|D_{ii}| > |D_{i1}| + \dots + |D_{i,j-1}| + |D_{i,j+1}| + \dots + |D_{in}|$$

для всех i или, по крайней мере, для одного i .

Расчет ведем в следующем порядке:

- задаем размеры, класс бетона, армирование;
- сечение стержня разбиваем на отдельные участки;
- задаем площади участков бетона и арматуры $A_{b\bar{y}}, A_{s\bar{y}}$;
- задаем начало координат (например, вверху) и координаты центра тяжести каждого участка $x_{\bar{y}}, y_{\bar{y}}$;

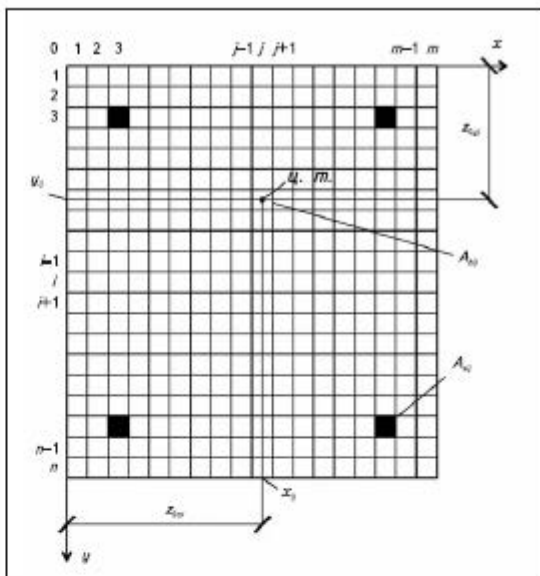


Рис. 1. К расчету нормального сечения

- назначаем начальные кривизну, относительную деформацию и координату нейтрального слоя (обычно из условия упругой работы материалов). Например, для прямоугольного сечения на первом шаге итерации:

$$\left(\frac{1}{\rho_x}\right)^{(0)} = \frac{M_x}{E_b J_{bx}}; \quad (7) \quad \left(\frac{1}{\rho_y}\right)^{(0)} = \frac{M_y}{E_b J_{by}}; \quad (8)$$

$$(\varepsilon_0)^{(0)} = \frac{N}{E_b A_b}; \quad (9)$$

$$z_{y0j}^{(0)} = -h/2; \quad (10) \quad z_{x0i}^{(0)} = -b/2, \quad (11)$$

где J_{bx} и J_{by} — моменты инерции сечения (по бетону); E_b — начальный модуль упругости; z_{y0j} и z_{x0i} — положение нейтрального слоя для каждой строки (i) и столбца (j);

- вычисляем относительные деформации на участках

$$\varepsilon_{ij}^{(0)} = (\varepsilon_0)^{(0)} + \left(\frac{1}{\rho_x}\right)^{(0)} (y_{\bar{y}} + z_{y0j}^{(0)}) + \left(\frac{1}{\rho_y}\right)^{(0)} (x_{\bar{y}} + z_{x0i}^{(0)}); \quad (12)$$

- вычисляем напряжения и секущие модули бетона и стали согласно законам $\sigma_{bij}(\varepsilon_{ij}^{(0)})$, $\sigma_{sij}(\varepsilon_{ij}^{(0)})$

$$E_{b,red\bar{y}}^{(0)} = \frac{\sigma_{bij}(\varepsilon_{ij}^{(0)})}{\varepsilon_{ij}^{(0)}}; \quad (13)$$

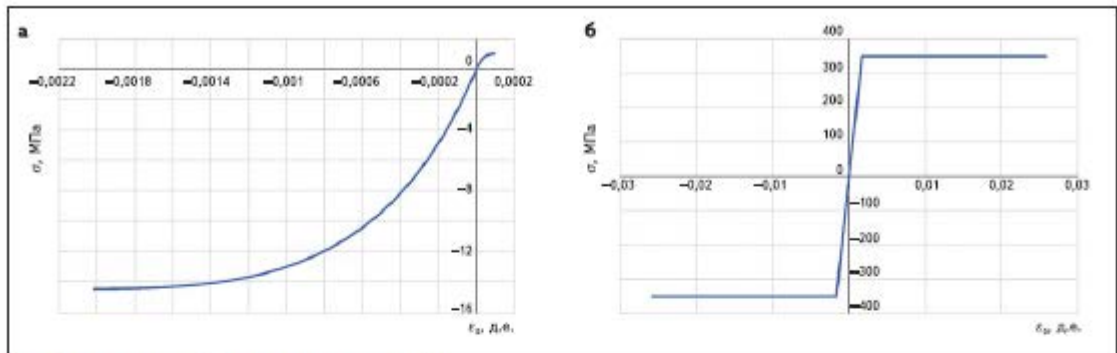


Рис. 2. Диаграммы бетона (а) и стали (б)

$$E_{s,redij}^{(0)} = \frac{\sigma_{sij}(\varepsilon_{ij}^{(0)})}{\varepsilon_{ij}^{(0)}}; \quad (14)$$

• определяем новое положение нейтрального слоя:

$$z_{x0if}^{(0)} = - \frac{\sum_{j=1}^m (A_{bij} E_{b,redij}^{(0)} + A_{sij} E_{s,redij}^{(0)}) x_{ij}}{\sum_{j=0}^n (A_{bij} E_{b,redij}^{(0)} + A_{sij} E_{s,redij}^{(0)})}; \quad (15)$$

$$z_{y0j}^{(0)} = - \frac{\sum_{i=1}^n (A_{bij} E_{b,redij}^{(0)} + A_{sij} E_{s,redij}^{(0)}) y_{ij}}{\sum_{i=0}^n (A_{bij} E_{b,redij}^{(0)} + A_{sij} E_{s,redij}^{(0)})}; \quad (16)$$

• вычисляем коэффициенты системы уравнений равновесия:

$$D_{11}^{(0)} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (A_{bij} E_{b,redij}^{(0)} + A_{sij} E_{s,redij}^{(0)}) (y_{ij} + z_{y0j}^{(0)})^2; \quad (17)$$

$$D_{12}^{(0)} = D_{12}^{(0)} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (A_{bij} E_{b,redij}^{(0)} + A_{sij} E_{s,redij}^{(0)}) \times (x_{ij} + z_{x0if}^{(0)}) (y_{ij} + z_{y0j}^{(0)}); \quad (18)$$

$$D_{22}^{(0)} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (A_{bij} E_{b,redij}^{(0)} + A_{sij} E_{s,redij}^{(0)}) (x_{ij} + z_{x0if}^{(0)})^2; \quad (19)$$

$$D_{13}^{(0)} = D_{31}^{(0)} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (A_{bij} E_{b,redij}^{(0)} + A_{sij} E_{s,redij}^{(0)}) \times (y_{ij} + z_{y0j}^{(0)}); \quad (20)$$

$$D_{23}^{(0)} = D_{32}^{(0)} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (A_{bij} E_{b,redij}^{(0)} + A_{sij} E_{s,redij}^{(0)}) \times (x_{ij} + z_{x0if}^{(0)}); \quad (21)$$

$$D_{33}^{(0)} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (A_{bij} E_{b,redij}^{(0)} + A_{sij} E_{s,redij}^{(0)}); \quad (22)$$

• вычисляем новые значения кривизны и осевой деформации на следующей итерации:

$$\left(\frac{1}{\rho_x}\right)^{(1)} = \frac{M_x}{D_{11}^{(0)}} - \left(\frac{D_{12}^{(0)}}{D_{11}^{(0)}}\right) \left(\frac{1}{\rho_y}\right)^{(0)} - \left(\frac{D_{13}^{(0)}}{D_{11}^{(0)}}\right) (\varepsilon_0)^{(0)}; \quad (23)$$

$$\left(\frac{1}{\rho_y}\right)^{(1)} = \frac{M_y}{D_{22}^{(0)}} - \left(\frac{D_{21}^{(0)}}{D_{22}^{(0)}}\right) \left(\frac{1}{\rho_x}\right)^{(0)} - \left(\frac{D_{23}^{(0)}}{D_{22}^{(0)}}\right) (\varepsilon_0)^{(0)}; \quad (24)$$

$$(\varepsilon_0)^{(1)} = \frac{N}{D_{33}^{(0)}} - \left(\frac{D_{31}^{(0)}}{D_{33}^{(0)}}\right) \left(\frac{1}{\rho_x}\right)^{(0)} - \left(\frac{D_{32}^{(0)}}{D_{33}^{(0)}}\right) \left(\frac{1}{\rho_y}\right)^{(0)}; \quad (25)$$

• расчет по формулам (8)–(18) продолжается пока не выполняются условия:

$$\left| \frac{\left(\frac{1}{\rho_x}\right)^{(k)} - \left(\frac{1}{\rho_x}\right)^{(k-1)}}{\left(\frac{1}{\rho_x}\right)^{(k-1)}} \right| < \delta; \quad (26)$$

$$\left| \frac{\left(\frac{1}{\rho_y}\right)^{(k)} - \left(\frac{1}{\rho_y}\right)^{(k-1)}}{\left(\frac{1}{\rho_y}\right)^{(k-1)}} \right| < \delta; \quad (27)$$

$$\left| \frac{(\varepsilon_0)^{(k)} - (\varepsilon_0)^{(k-1)}}{(\varepsilon_0)^{(k-1)}} \right| < \delta, \quad (28)$$

где δ – точность расчета.

Пример расчета нормального сечения

Для верификации и валидации методики проведем расчет нормального сечения со следующими исходными данными, принятыми из работы [12]: прямоугольное сечение колонны с шириной $b = 400$ мм и высотой $h = 500$ мм; тяжелый бетон класса В25 ($R_b = 14,5$ МПа); продольная арматура класса А400 ($R_s = R_{sc} = 350$ МПа); армирование четырьмя стержнями диаметром 32 мм. В сечении одновременно действуют сила $N = 2600$ кН и изгибающие моменты $M_x = 150$ кН·м, $M_y = 100$ кН·м. Основные обозна-

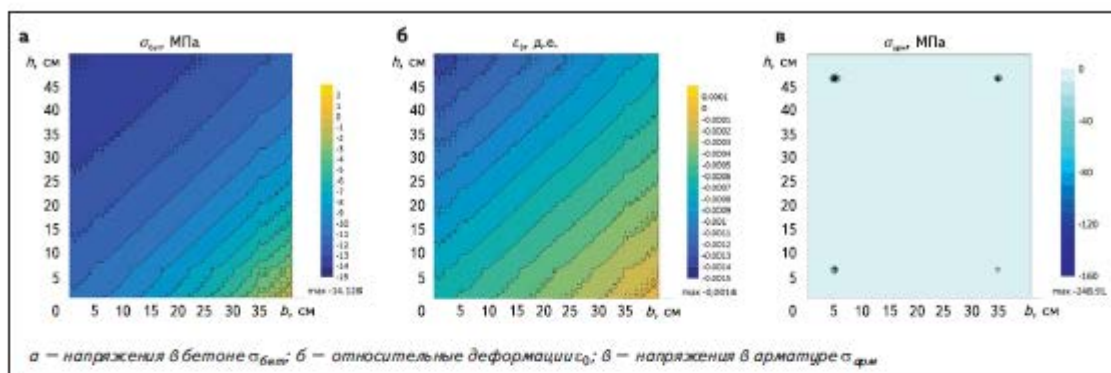
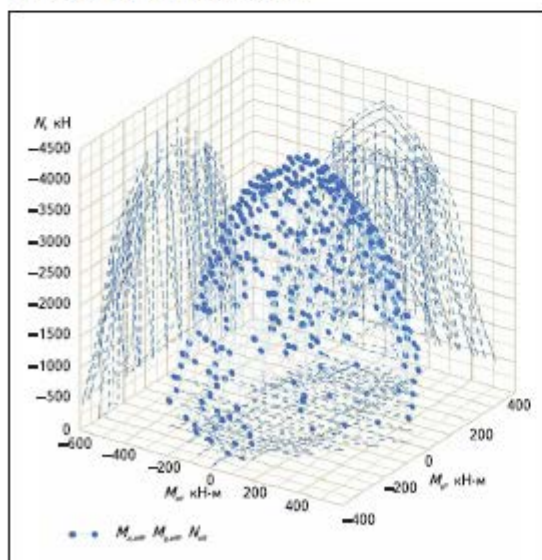


Рис. 3. Результаты расчета

1. Результаты последовательных приближений

Итерация (k)	$\left(\frac{1}{\rho_x}\right)^{(k)} \cdot 10^{-6}, \text{ мм}^{-1}$	$100 \cdot \left \frac{\left(\frac{1}{\rho_x}\right)^{(k)} - \left(\frac{1}{\rho_x}\right)^{(k-1)}}{\left(\frac{1}{\rho_x}\right)^{(k-1)}} \right , \%$	$\left(\frac{1}{\rho_y}\right)^{(k)} \cdot 10^{-6}, \text{ мм}^{-1}$	$100 \cdot \left \frac{\left(\frac{1}{\rho_y}\right)^{(k)} - \left(\frac{1}{\rho_y}\right)^{(k-1)}}{\left(\frac{1}{\rho_y}\right)^{(k-1)}} \right , \%$	$(\varepsilon_0)^{(k)} \cdot 10^{-4}$	$100 \cdot \left \frac{(\varepsilon_0)^{(k)} - (\varepsilon_0)^{(k-1)}}{(\varepsilon_0)^{(k-1)}} \right , \%$
0	1,2000	—	1,2500	—	-4,3333	—
1	1,3778	14,8	1,4698	17,6	-5,5471	28,0
2	1,5077	9,4	1,6216	10,3	-6,1355	10,6
3	1,5706	4,2	1,6950	4,5	-6,4010	4,3
4	1,5991	1,8	1,7282	2,0	-6,5243	1,9
5	1,6123	0,8	1,7427	0,8	-6,5814	0,9

Рис. 4. Поверхность предельных усилий сжато-изогнутого элемента



2. Результаты расчета

Методика расчета	Коэффициент запаса (отношение)	Примечание
СП 63.133.30	0,682	—
Метод итераций	0,700	$\frac{\varepsilon_{br}}{\varepsilon_{0,ult}} = \frac{-0,0014}{-0,002} = 0,7$

чения даны на рис. 1. Диаграммы принимаем криволинейными по прил. Г СП 63.133.30.2018 «СНиП 52-01-2003 Бетонные и железобетонные конструкции» (рис. 2).

Для реализации описанной методики воспользуемся Microsoft Excel с применением VBA. Прикладное применение достаточно подробно рассмотрено в работе [12]. По формулам (23)–(25) получаем первое приближение:

$$\left(\frac{1}{\rho_x}\right)^{(1)} = 1,3876 \cdot 10^{-6} - 8,0244 \cdot 10^{-3} \cdot 1,25 \cdot 10^{-6} - 4,3921 \cdot 10^{-7} \cdot 4,3333 \cdot 10^{-4} = 1,377 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^{-1};$$

$$\left(\frac{1}{\rho_y}\right)^{(1)} = 1,4858 \cdot 10^{-6} - 1,2888 \cdot 10^{-2} \cdot 1,2 \cdot 10^{-6} - 3,1793 \cdot 10^{-7} \cdot 4,3333 \cdot 10^{-4} = 1,4698 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^{-1};$$

$$(\epsilon_0)^{(1)} = -5,5472 \cdot 10^{-4} + 1,013 \cdot 10^{-2} \cdot 1,2 \cdot 10^{-6} - 4,5654 \cdot 10^{-3} \cdot 1,25 \cdot 10^{-6} = -5,5471 \cdot 10^{-4}.$$

После получения новых значений определяем новые секущие модули и напряжения на каждом участке. После этого вычисляем координаты расположения нейтрального слоя по формулам (15), (16) и коэффициенты системы уравнений $D_{11} \dots D_{33}$ по формулам (17)–(22). Таким образом, получаем новое приближение искомых неизвестных. Результаты расчета даны в *табл. 1* и на *рис. 3*.

Таким образом, для решения с погрешностью 5 % и менее достаточно 3–5 итераций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Карпенко Н. И. Теория деформирования железобетона с трещинами. М.: Стройиздат, 1976. 196 с.
2. Wood R. Plastic and elastic design of slabs and plates [Пластическая и упругая работа плит]. London: Thames & Hudson Publ., 1961. 344 p.
3. Карпенко Н. И., Карпенко С. Н. О диаграммной методике расчета деформаций стержневых элементов и ее частных случаях // Бетон и железобетон. 2012. № 6. С. 20–27.
4. Карпенко Н. И., Круглов В. М., Соловьев Л. Ю. Нелинейное деформирование бетона и железобетона. Новосибирск: СГУПС, 2001. 276 с.
5. Симбиркин В. Н., Матковский В. В. К расчету напряженно-деформированного состояния и прочности элементов железобетонных конструкций по нормальным сечениям // Строительная механика и расчет сооружений. 2010. № 4. С. 20–26.
6. Соловьев Л. Ю. Нелинейная модель бетона на основе теории пластичного сечения // Системы. Методы. Технологии. 2014. № 4(24). С. 131–140.

REFERENCES

1. Karpenko N. I. *Teoriya deformirovaniya zhelezobetona s treshchinami* [Theory of deformation of reinforced concrete with cracks]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1976. 196 p. (In Russian).
2. Wood R. *Plastic and elastic design of slabs and plates*. London, Thames & Hudson Publ., 1961. 344 p.
3. Karpenko N. I., Karpenko S. N. On the diagrammatic method of calculating deformations of rod elements and its special cases. *Beton i zhelezobeton*, 2012, no. 6, pp. 20–27. (In Russian).
4. Karpenko N. I., Kruglov V. M., Solov'ev L. Yu. *Nelineynoe deformirovanie betona i zhelezobetona* [Non-linear deformation of concrete and reinforced concrete]. Novosibirsk, SGUPS Publ., 2001. 276 p. (In Russian).

Сравнение результатов расчета по нормативной методике и методом итераций дано в *табл. 2*.

Дополнительно построена поверхность предельных усилий скато-изопного элемента (*рис. 4*), которая показывает качественное совпадение с нормативной методикой [10].

Вывод

Применение метода итераций при решении задач в физически нелинейной постановке, как показал численный пример, является весьма эффективным и простым в практической реализации, что окажет значительную помощь специалистам, деятельность которых связана с расчетом строительных конструкций в физически нелинейной постановке.

7. Давидюк А. А., Артемьев Е. А., Шокот С. В. Подбор армирования перекрытия в программных комплексах ЛИРА-САПР, SCAD, ЛИРА 10 // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 10. С. 69–73.
8. Городецкий Д. А., Барабаш М. С., Водопьянов Р. Ю. [и др.]. Программный комплекс ЛИРА-САПР. Киев; М., 2013. 376 с.
9. Родина А. Ю., Барбашев Н. П., Домарова Е. В. Проектирование монолитных железобетонных перекрытий многоэтажного здания. М.: НИУ МГСУ, 2014. 60 с.
10. Расчет железобетонных конструкций без предварительного напряженной арматуры: Пособие к СП 63.13330. М.: Минстрой России, 2015.
11. Демидович Б. П., Марон И. А. Основы вычислительной математики. М.: Наука, 1966. 664 с.
12. Pangaribuan G. An introduction to Excel for civil engineers [О введении в Excel для инженеров-строителей]. 2016. 387 p.

5. Simbirkin V. N., Matkovskij V. V. To the calculation of the stress-strain state and strength of elements of reinforced concrete structures in normal sections. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy*, 2010, no. 4, pp. 20–26. (In Russian).
6. Solov'ev L. Yu. Nonlinear concrete model based on the theory of plastic flow. *Sistemy. Metody. Tekhnologii*, 2014, no. 4(24), pp. 131–140. (In Russian).
7. Davidyuk A. A., Artem'ev E. A., Shokot S. V. Selection of reinforcement for floor slabs using software packages LIRA-SAPR, SCAD, LIRA-10. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2018, no. 10, pp. 69–73. (In Russian).
8. Gorodeckiy D. A., Barabash M. S., Vodop'yanov R. Yu. et al. *Programmny kompleks LIRA-SAPR* [LIRA-

- SAPR software package]. Kiev; Moscow, 2013. 376 p. (In Russian).
9. Rodina A. Yu., Barbashev N. P., Domarova E. V. *Proektirovanie monolitnykh zhelezobetonnykh perekrytiy mnogoetazhnogo zdaniya* [Design of monolithic reinforced concrete floors of a multi-storey building]. Moscow, NIU MGSU Publ., 2014. 60 p. (In Russian).
 10. *Raschet zhelezobetonnykh konstruktsiy bez predvaritel'no napryazhennoj armatury. Posobie k SP 63.13330* [Calculation of reinforced concrete structures without prestressed reinforcement. Manual for SP 63.13330]. Moscow, Minstroy Rossii Publ., 2015. (In Russian).
 11. Demidovich B. P., Maron I. A. *Osnovy vychislitel'noy matematiki* [Fundamentals of computational mathematics]. Moscow, Nauka Publ., 1966. 664 p. (In Russian).
 12. Pangaribuan G. *An Introduction to Excel for Civil Engineers*. 2016. 387 p.

Для цитирования: Шевченко А. В., Давидюк А. А., Баглаев Н. Н. Метод итераций для расчета железобетонных элементов на основе нелинейной деформационной модели // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 3. С. 13–18. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.03.13-18.

For citation: Shevchenko A. V., Davidiuk A. A., Baglaev N. N. Iteration Method for the Calculation of Reinforced Concrete Elements Based on a Nonlinear Deformation Model. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2022, no. 3, pp. 13–18. (In Russian). DOI: 10.33622/0869-7019.2022.03.13-18.

НА НАШЕЙ ОБЛОЖКЕ

СТАНЦИЯ «АВИАМОТОРНАЯ»

Архитектурное решение станции «Авиамоторная» основано на авиационной тематике, что обусловлено ее названием. Формы элементов интерьеров станции (от колонн до светильников) ассоциативно связаны либо с движением воздушных потоков, либо с элементами оперения и интерьеров самолетов.

На платформенном участке световые непрерывные линии имеют уникальную форму: помимо изменяющейся ширины светильников, плавные переходы кривых выполнены не только в плоскости, но и в пространстве — корпуса светильников и рассеиватели имеют кривизну в трех направлениях, обеспечивая таким образом четкое соответствие изготовленных форм заложенному в проект рисунку. Также, специально под проект, выполнены встроенные в потолок платформенной части огромные светильники — треугольники-крылья, изготовленные без швов в светящейся части, при этом их каркас со встроенным механизмом позволяет легко открывать светящуюся часть для обслуживания.

Не только светильники, но и основные элементы отделки интерьера имеют уникальное исполнение. Масштабность сооружения подчеркивается крупным членением облицовочных панелей. Белые части каждой стороны колонны выполнены из трех

объемных фибробетонных панелей, с встроенным в них каркасом. Такое решение облицовки станции впервые выполнено на Московском метрополитене. Противоположные грани колонн, обращенные навстречу движению пассажиров, изготовлены из алюминиевых сотовых панелей с лицевой поверхностью из нержавеющей стали из единого элемента переменной ширины высотой 6,1 м. Также специально под проект были изготовлены три вида экструдированных алюминиевых панелей с индивидуальной фактурой поверхности, каждая из которых имеет длину 6 м. В сочетании с тремя цветами окраски получилось девять видов панелей, из которых сложена мозаика динамичного рисунка путевых стен.

Специально для этой станции народным художником Российской Федерации А. И. Рукавишниковым были выполнены из алюминия и фибробетона две настенные художественные композиции «Крылатые люди». При строительстве пересадки на станцию «Авиамоторная» Калининской линии метрополитена скульптура «Икар» народного художника Российской Федерации А. М. Мосийчука была отреставрирована и перенесена в новый просторный зал в пересадочной галерее.

При строительстве станции был применен уникальный способ закрытой проходки пассажирского тоннеля длиной 70 м под действующими путями Казанской железной дороги без остановки движения по ней.

Продолжение. Начало на с. 12, окончание на с. 50.