

С. С. МОРДОВСКИЙ
Д. О. ФРАНЦЕВА

ПОИСК ОПТИМАЛЬНОЙ ПЛОЩАДИ СЕЧЕНИЯ АРМАТУРЫ ВНЕЦЕНТРЕННО СЖАТЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОЛЬЦЕВОГО СЕЧЕНИЯ

SEARCH FOR THE OPTIMAL SECTION AREA ANNULAR SECTION ECENTRALLY
COMPRESSED ELEMENTS OF REINFORCEMENT

Рассматриваются вопросы поиска оптимальной площади сечения арматуры внецентренно сжатых железобетонных элементов кольцевого сечения с помощью программного комплекса Mathcad. Определение оптимальной площади сечения арматуры производится путем реализации алгоритмов поиска минимума, соответствующего требованиям прочности и устойчивости железобетонных элементов. Приводится анализ полученных данных при помощи сравнения с решенной задачей в пособии к СП 63.13330.2018. Разработанные программы позволяют сэкономить время проектировщика при выборе сечения арматуры и проверке на прочность и устойчивость железобетонных элементов.

This article deals with the search for the optimal cross-sectional area of reinforcement of eccentrically compressed reinforced concrete elements of an annular section using the Mathcad software package. The determination of the optimal cross-sectional area of the reinforcement is carried out using the implementation of algorithms for finding the minimum that meets the requirements of the strength and stability of reinforced concrete elements. An analysis of the obtained data is given by comparison with the problem solved in the Handbook to SP 63.13330. The developed programs make it possible to save the designer's time when choosing the reinforcement section and checking the strength and stability of reinforced concrete elements.

Ключевые слова: колонна кольцевого сечения, внецентренно сжатый элемент, железобетонная колонна, площадь сечения арматуры, прочность

Keywords: annular column, eccentrically compressed element, reinforced concrete column, reinforcement cross-sectional area, strength

На данном этапе развития проектирования внецентренно сжатых железобетонных элементов кольцевого сечения одним из основных аспектов является подбор площади сечения арматуры. Подбор осуществляется при непосредственном расчёте конкретного железобетонного элемента на прочность и устойчивость при определённых условиях. Расчёт бетонных и железобетонных конструкций осуществляется согласно требованиям, изложенным в действующем своде правил (СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003»). Подбор требуемой площади арматуры [1, 2] при этом может выполняться как с помощью циклических расчётов, так и с применением графиков несущей способности внецентренно сжатых элементов кольцевого сечения [2]. Циклический расчёт вносит некоторое усложнение ввиду возможности допущения ошибки проектировщиком в процессе множественных перерасчётов требуемой площади сечения арматуры. Использование же графиков несущей способности имеет достаточно большой недостаток: точность расчётов резко снижается за счёт работы проектировщика с неоцифрованными

графиками. Подбор требуемой площади сечения арматуры [1] может быть реализован с помощью диаграмм деформирования материалов по нелинейной деформационной модели [3–7]. Данный метод хоть и имеет некоторые неоспоримые преимущества на фоне метода предельных усилий, однако является сложным в практической реализации и требует наличия вычислительных мощностей в виде персонального компьютера с установленными программными продуктами. Таким образом, расчёты на основе предельных усилий обеспечивают достаточную точность и относительную простоту.

Данная работа направлена на автоматизацию определения минимально возможной площади сечения арматуры при условии соблюдения требований по устойчивости и прочности внецентренно сжатых колонн кольцевого сечения.

В нормативно-технической документации (СП 63.13330.2018) дается исчерпывающая информация для проверки проектируемых внецентренно сжатых железобетонных элементов кольцевого сечения, однако вопрос выбора метода подбора площади сечения арматуры остается за проектировщиком.

Для автоматизации процесса подбора сечения были разработаны две программы в программном комплексе MathCad, в основе которых лежит подбор минимально возможной площади сечения арматуры, удовлетворяющей требованиям прочности и устойчивости железобетонных элементов кольцевого сечения.

Оба алгоритма были построены на основе задачи, приведенной в пособии к СП 63.13330 «Методическое пособие. Расчет железобетонных конструкций без предварительно напря-

женной арматуры», что позволило оценить экономический эффект в использовании материалов при проектировании с сохранением требуемых прочностных характеристик для данной задачи.

Первая программа содержит алгоритм, основанный на итерационном расчете минимально требуемого сечения с заданной точностью.

Исходные данные заносятся в форму заполнения (рис. 1), после чего происходит итерационный расчет.

Исходные данные:

$r_2 = 0,25$	м	внешний радиус сечения колонны
$r_1 = 0,15$	м	внутренний радиус сечения колонны
$R_b = 14,5 \cdot 10^6$	Па	расчётное сопротивление бетона на осевое сжатие
$E_b = 3 \cdot 10^{10}$	Па	начальный модуль упругости бетона
$R_s = R_{sc} = 350 \cdot 10^6$	Па	расчётное сопротивление продольной арматуры на растяжение
$E_s = 2 \cdot 10^{11}$	Па	модуль упругости продольной арматуры
$a = (r_2 - r_1)/2 = 0,05$	м	расстояние от края колонны до центра тяжести арматурного стержня
$r_s = r_2 - a = 0,2$	м	радиус окружности, проходящей через центры тяжести стержней продольной арматуры
$H_{стойки} = 6$	м	высота стойки
$N_v = 120000$	Н	вертикальная сила, действующая на колонну
$M_v = 40000$	Н·м	момент от вертикальной силы
$N_h = 0$	Н	сила от ветровой нагрузки, действующая на колонну
$M_h = 70000$	Н·м	момент от ветровой силы

Рис. 1. Форма заполнения данных для расчета по первой программе

Как сказано выше, алгоритм содержит описанную в своде правил (СП 63.13330.2018) методику по проверке сечения колонны на прочность и устойчивость. За счет итерационного метода расчета происходит последовательное увеличение гипотетически применяемой в элементе площади сечения арматуры и оценка его прочности и устойчивости. Расчет продолжается до тех пор,

пока не будет достигнуто значение минимальной площади сечения арматуры, обеспечивающее выполнение условия, согласно которому максимальный момент, воспринимаемый колонной, больше момента, создаваемого при заданных параметрах воздействующей нагрузки.

Итоги расчета выводятся в матричной форме (рис. 2).

PROGRAMM =	("ξ.cir"	"A.s.tot, мм ² "	"M.ult, кН*м"	"M.cr, кН*м"	"M.ult > M.cr")
		0,214	1833	136,816	136,772	«выполнено»	

Рис. 2. Результаты расчета по первой программе

В основе второй программы также лежит итерационный расчет, однако в данном случае среди исходных данных появляются две новые величины, без которых невозможна реализация алгоритма: количество шагов (определяют конечную точность сечения арматуры) и максимальное значение сечения арматуры, задаваемое пользователем (рис. 3).

Данный алгоритм также построен на описанной в своде правил (СП 63.13330.2018) ме-

тодике. Помимо используемого алгоритма, программа отличается от предыдущей и выходными данными, которые представлены в виде таблицы (рис. 4).

С помощью разработанных программ была решена задача, содержащаяся в приложении пособия к СП 63.13330, где выполнялась проверка прочности сечения при заданной арматуре 10Ø16 ($A_{s,tot} = 2011 \text{ мм}^2$).

Исходные данные:

$r_2 = 0,25$	м	внешний радиус сечения колонны
$r_1 = 0,15$	м	внутренний радиус сечения колонны
$R_b = 14,5 \cdot 10^6$	Па	расчётное сопротивление бетона на осевое сжатие
$E_b = 3 \cdot 10^{10}$	Па	начальный модуль упругости бетона
$R_s = R_{sc} = 350 \cdot 10^6$	Па	расчётное сопротивление продольной арматуры на растяжение
$E_s = 2 \cdot 10^{11}$	Па	модуль упругости продольной арматуры
$a = (r_2 - r_1)/2 = 0,05$	м	расстояние от края колонны до центра тяжести арматурного стержня
$r_s = r_2 - a = 0,2$	м	радиус окружности, проходящей через центры тяжести стержней продольной арматуры
$H_{стойки} = 6$	м	высота стойки
$N_v = 120000$	Н	вертикальная сила, действующая на колонну
$M_v = 40000$	Н·м	момент от вертикальной силы
$N_h = 0$	Н	сила от ветровой нагрузки, действующая на колонну
$M_h = 70000$	Н·м	момент от ветровой силы
$n = 10000$		количество итераций при поиске оптимального сечения
$A_{s, \text{tot}, \text{max}} = 2000$	мм ²	максимальное суммарное сечение арматуры

Рис. 3. Форма заполнения данных для расчета по второй программе

Строка	Параметр				
	ξ_{cir}	$A_{s, \text{tot}}, \text{ мм}^2$	$M_{\text{ult}}, \text{ кН} \cdot \text{м}$	$M_{\text{cr}}, \text{ кН} \cdot \text{м}$	$M_{\text{ult}} > M_{\text{cr}}$
9157	0,214	1831,4	136,734	136,789	«Не выполнено»
9158	0,214	1831,6	136,745	136,787	«Не выполнено»
9159	0,214	1831,8	136,755	136,785	«Не выполнено»
9160	0,214	1832	136,765	136,783	«Не выполнено»
9161	0,214	1832,2	136,775	136,781	«Не выполнено»
9162	0,214	1832,4	136,786	136,779	«Выполнено»
9163	0,214	1832,6	136,796	136,777	«Выполнено»
9164	0,214	1832,8	136,806	136,774	«Выполнено»
9165	0,214	1833	136,816	136,772	«Выполнено»
9166	0,214	1833,2	136,827	136,77	«Выполнено»
9167	0,214	1833,4	136,837	136,768	«Выполнено»
9168	0,214	1833,6	136,847	136,766	«Выполнено»
9169	0,214	1833,8	136,857	136,764	«Выполнено»

Рис. 4. Результаты расчета по второй программе

Анализируя результаты, можно сделать следующие **выводы**:

1. По итогу расчетов были получены минимальные значения площади сечения арматуры, которые составили 1833 и 1832,4 мм² соответственно для первой и второй программ. Согласно сортаменту, ближайшей конфигурацией арматуры является 12Ø14 ($A_{s, \text{tot}} = 1847 \text{ мм}^2$).

2. При реализации предложенной замены арматуры прочность сечения для рассмотрен-

ной задачи будет обеспечена, а площадь сечения арматуры снизится на 8 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Ильин Н.А., Мордовский С.С., Васильева Е.Е., Таланова В.Н. Определение площади арматуры железобетонной колонны круглого сечения // Градостроительство и архитектура. 2018. Т.8, №3. С. 8–11. DOI: 10.17673/Vestnik.2018.03.2.

2. Свидетельство РФ о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019663245 «Графики несущей способности внецентренно сжатых элементов кольцевого сечения» / Мордовский С. С., Шарафутдинов К. Б., заяв. СамГТУ: 08.10.2019; опубл. 14.10.2019.

3. Мурашкин Г.В., Мурашкин В.Г. Моделирование диаграммы деформирования бетона и схемы напряженно-деформированного состояния // Известия высших учебных заведений. Строительство. 1997. № 10. С. 4–6.

4. Мурашкин Г.В., Мордовский С.С. Применение диаграмм деформирования для расчета несущей способности внецентренно сжатых железобетонных элементов // Жилищное строительство. 2013. №3. С. 38–40.

5. Карпенко Н.И., Соколов Б.С., Радайкин О.В. Анализ и совершенствование криволинейных диаграмм деформирования бетона для расчета железобетонных конструкций по деформационной модели // Промышленное и гражданское строительство. 2013. №1. С. 25–27.

6. Мордовский С.С. Совершенствование расчета прочности внецентренно сжатых железобетонных элементов: дис. ... канд. техн. наук. Казань, 2013. 214 с.

7. Тошин Д.С., Анисимова М.П. Поиск оптимального способа реализации итерационного приближения при расчете по деформационной модели // Научное обозрение. 2016. №17. С. 25–29.

REFERENCES

1. Ilyin N.A., Mordovsky S. S., Vasilyeva E. E., Talanova V. N. Determination of the area of reinforcement of reinforced concrete columns of circular cross section. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2018, vol.8, no.3, p.8-11. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2018.03.2

Об авторах:

МОРДОВСКИЙ Сергей Сергеевич

кандидат технических наук, доцент кафедры железобетонных конструкций
Самарский государственный технический университет
Академия строительства и архитектуры
443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244
E-mail: qaer1@yandex.ru

ФРАНЦЕВА Дарья Олеговна

магистрант кафедры железобетонных конструкций
Самарский государственный технический университет
Академия строительства и архитектуры
443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

2. Mordovsky S. S., SHarafutdinov K. B. *Grafi-ki nesushchej sposobnosti vnecentrenno szhatyh elementov kol'cevogo secheniya* [Graphs of the bearing capacity of eccentrically compressed elements of the annular section]. Certificate RF on the state registration of the computer program, 2019, art. no. 2019663245,

3. Murashkin G.V., Murashkin V.G. Modeling of concrete deformation diagram and scheme of stress-strain state. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Stroitel'stvo* [Izvestiya of Higher Educational Institutions. Construction], 1997, no.10, pp. 4–6. (in Russian)

4. Murashkin G.V., Mordovsky S.S. Application of the deformation diagram for calculating the increased activity of eccentrically compressed reinforced concrete elements. *Zhilishchnoe stroitel'stvo* [Housing Construction], 2013, no.3, pp. 38–40. (in Russian)

5. Karpenko N.I., Sokolov B.S., Radaikin O.V. Analysis and improvement of curvilinear diagrams of concrete deformation for the calculation of reinforced concrete structures according to the deformation model. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2013, no.1, pp. 25–27. (in Russian)

6. Mordovsky S.S. *Sovershenstvovanie raschyota prochnosti vnecentrenno szhatyh zhelezobetonnih elementov. Kand. Diss.* [Improving the calculation of the strength of extra-centered compressed reinforced concrete elements. Ph.Doct, Diss]. Kazan, 2013. 214 p.

7. Toshin D.S., Anisimova M.P. Search for the optimal way to implement the iterative approximation in the calculation of the deformation model. *Nauchnoe obozrenie* [Scientific Review], 2016, no.17, pp. 25–29. (in Russian)

MORDOVSKY Sergey S.

PhD in Engineering Science, Associate Professor of the Reinforced Concrete Structures Chair
Samara State Technical University
Academy of Civil Engineering and Architecture
443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244
E-mail: qaer1@yandex.ru

FRANTSEVA Daria O.

Master's Degree Student of the Faculty of Industrial and Civil Engineering
Samara State Technical University
Academy of Civil Engineering and Architecture
443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244

Для цитирования: Мордовский С.С., Францева Д.О. Поиск оптимальной площади сечения арматуры внецентренно сжатых элементов кольцевого сечения // Градостроительство и архитектура. 2022. Т. 12, № 4. С. 11–14. DOI: 10.17673/Vestnik.2022.04.2.

For citation: Lutchenko S.I., Kornya E.A. Search for the Optimal Section Area of Annular Section Excentrally Compressed Elements of Reinforcement. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2022, vol. 12, no. 4, pp. 11–14. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2022.04.2.