

СТРОИТЕЛЬСТВО. АРХИТЕКТУРА.

УДК 624.01

**И. М. Кузменко, канд. техн. наук, доц., О. В. Леоненко, канд. техн. наук,
В. Н. Медведев, М. Э. Подымако**

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ КОМПОЗИТНОГО ЭЛЕМЕНТА СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ЕГО НЕСУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ

Рассмотрено напряженно-деформированное состояние (НДС) композитного несущего элемента строительных конструкций (КНЭСК) для различных схем закрепления и нагружения. Получены регрессионные зависимости показателей несущей способности и массы от параметров металлической составляющей КНЭСК.

КНЭСК как элемент строительных конструкций [1–3] должен удовлетворять ряду требований, определяющих эффективность его использования. Он должен быть технологичен в изготовлении, иметь высокую несущую способность и низкую стоимость. Требования являются противоречивыми, вследствие чего конструктивно-технологическое исполнение КНЭСК должно производиться на основе взвешенного компромиссного решения. Для его принятия необходимо иметь представление о степени влияния параметров КНЭСК на его эксплуатационно-экономические показатели. Рассматривая КНЭСК как композитный элемент, можно сделать вывод, что металлическая составляющая (арматура) в наибольшей степени определяет его несущую способность и стоимостные характеристики. Таким образом, подбор рациональных параметров металлической составляющей КНЭСК является важной, требующей решения задачей. Одним из способов ее решения является математическое моделирование НДС КНЭСК. При этом необходимо выполнить ряд шагов: выбрать расчетную схему, составить математическую модель КНЭСК, определить факторы варьирования и функции отклика, получить зависимости функций отклика от факторов варьирования.

Выбор расчетной схемы обуславливается спецификой работы конструкции,

составляющим элементом которой является КНЭСК. Широкая область применения КНЭСК определяет разнообразие схем нагружения и закрепления, которые, однако, можно свести к нескольким основным, показанным на рис. 1.

Математическая модель КНЭСК должна быть гибкой, учитывающей максимальное число параметров, и в то же время адекватной. Этим требованиям удовлетворяют математические модели с распределенными параметрами, методы реализации которых формализованы и дают хорошие результаты при расчете сложных моделей. Одним из методов с распределенными параметрами является метод конечных элементов, который и используем в качестве инструмента для расчета НДС КНЭСК.

Выбор параметров варьирования и функций отклика определяется требованиями, предъявляемыми к КНЭСК. В качестве факторов варьирования принимаем конструктивные размеры металлической составляющей, определяющие ее форму и расположение (рис. 2): X_1 – количество рядов фасонной арматуры по ширине; X_2 – толщина листа фасонной арматуры; X_3 – количество волн фасонной арматуры; X_4 – высота поперечного сечения фасонной арматуры; X_5 – угол наклона фасонной арматуры; X_6 – толщина опорного листа.

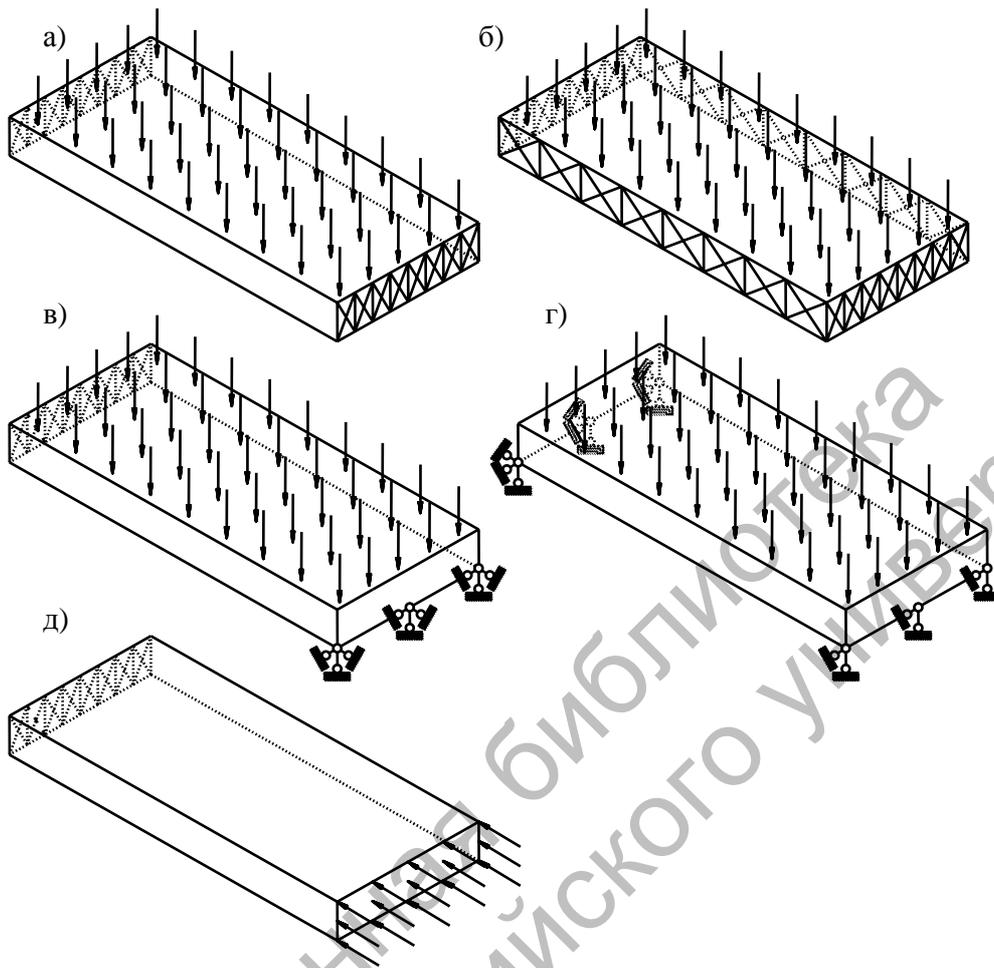


Рис. 1. Расчетные схемы КНЭСК: а – изгиб при двустороннем жестком опирании; б – изгиб при четырехстороннем жестком опирании; в – изгиб при двустороннем жестко-шарнирном опирании; г – изгиб при двустороннем шарнирном опирании; д – сжатие при одностороннем жестком опирании

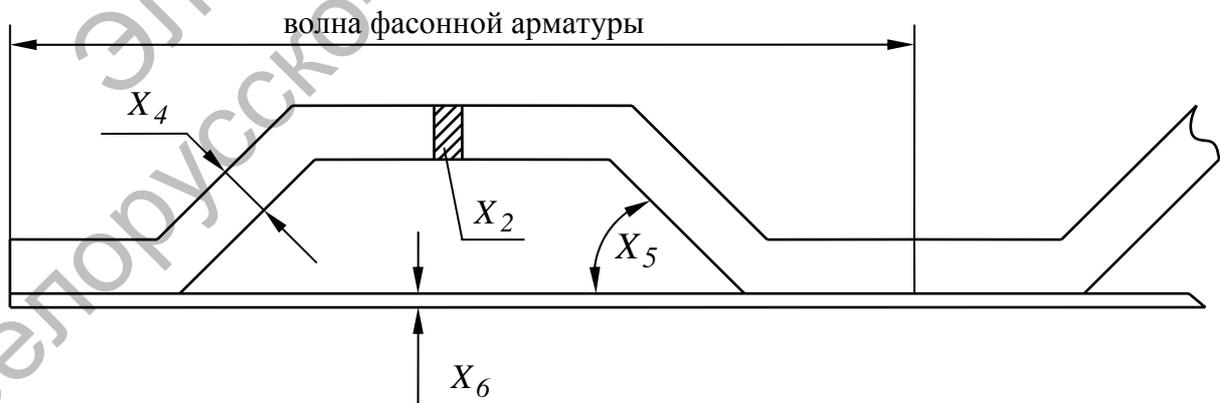


Рис. 2. Конструктивные размеры металлической составляющей

В качестве функций отклика принимаем прочностно-жесткостные и массовые характеристики КНЭСК: Y_1 – максимальный вертикальный прогиб; Y_2 – максимальные эквивалентные напряжения в арматуре; Y_3 – масса металлической составляющей.

Формирование математической модели при использовании метода конечных элементов производится в несколько этапов:

- создание геометрической модели КНЭСК;
- создание конечно-элементной модели;
- задание граничных условий;
- реализация математической модели.

Геометрическая модель является базой для анализа и определяет степень детализации объекта исследования. Тип и особенности геометрической модели определяются целью и задачами расчета. В нашем случае КНЭСК рассматривается в трехмерной постановке и включает в себя фасонную арматуру, опорный лист и бетонную составляющую. В модель не включены сварные швы, а также прутко-

вая арматура. Эти элементы важны при выполнении уточненного расчета, целью которого является получение точных количественных характеристик напряженно-деформированного состояния КНЭСК.

Конечно-элементная модель представляет собой дискретизированную на отдельные элементы геометрическую модель. В качестве конечных использованы гексаэдрические восьмиузловые элементы, дающие хорошую точность для моделей с плоскими поверхностями. Конечно-элементная модель металлической составляющей КНЭСК показана на рис. 3.

Граничные условия определяют тип закрепления и нагружения в соответствии с рис. 1. КНЭСК рассматривается в бесконтактной постановке без учета нелинейных свойств бетона.

Рассмотрим изгиб плиты с двусторонним жестким опиранием (см. рис. 1, а).

В качестве объекта исследования принимаем КНЭСК с размерами $L \times B \times H = 3 \text{ м} \times 1,5 \text{ м} \times 0,2 \text{ м}$. Расчетная схема показана на рис. 4.

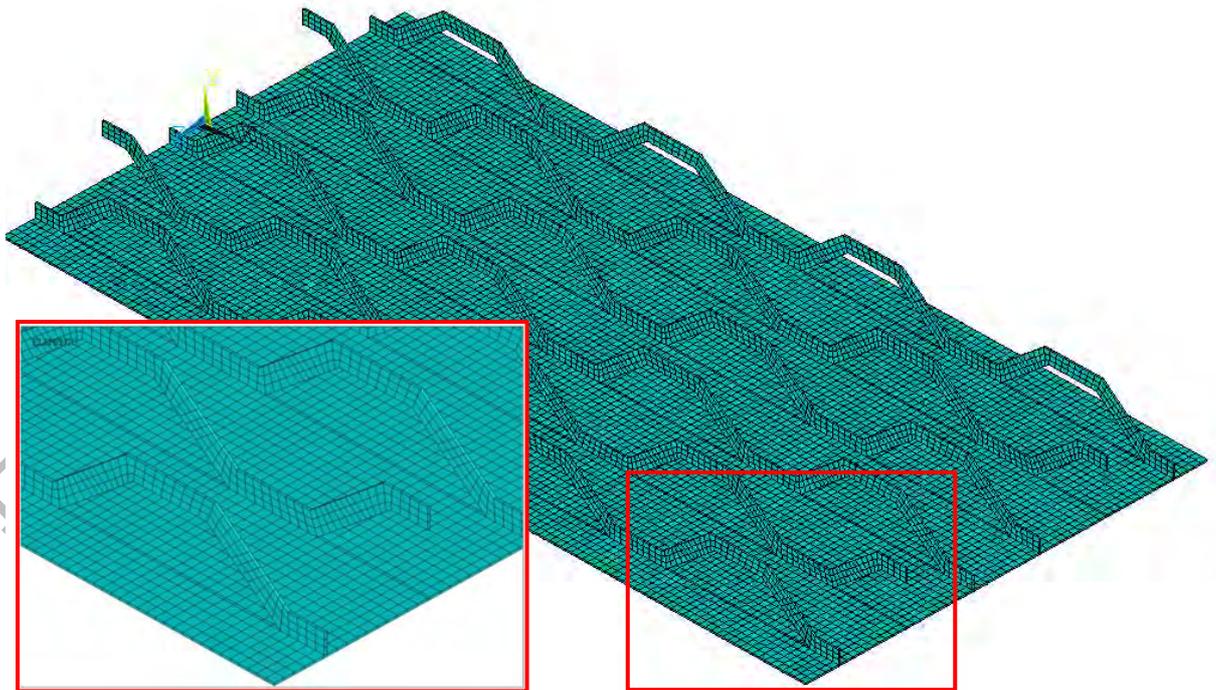


Рис. 3. Конечно-элементная модель металлической составляющей КНЭСК

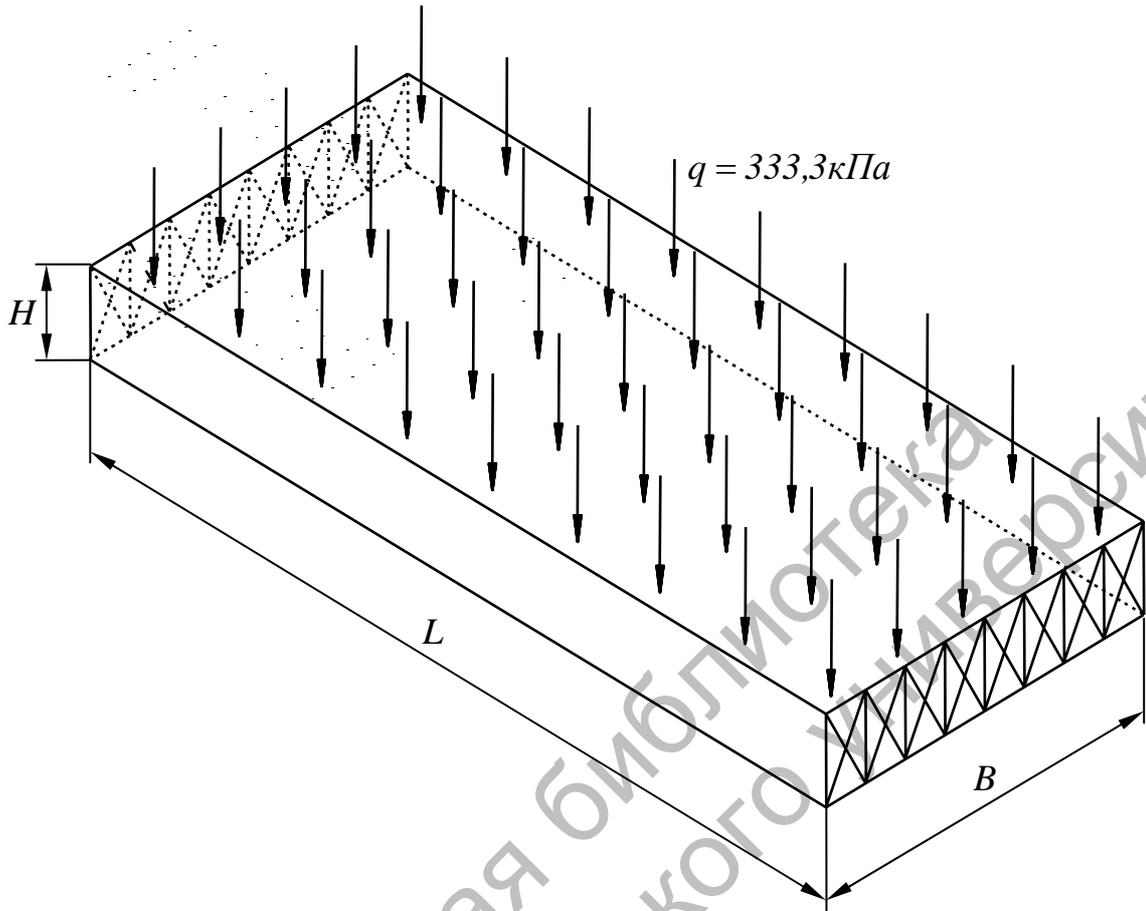


Рис. 4. Расчетная схема с двусторонним жестким опиранием

Диапазоны изменения факторов варьирования принимаем следующие:

X_1 – количество рядов фасонной арматуры (4...8), шт.;

X_2 – толщина листа фасонной арматуры (4...8), мм;

X_3 – количество волн фасонной арматуры (6...10), шт.;

X_4 – высота поперечного сечения фасонной арматуры (45...55), мм;

X_5 – угол наклона фасонной арматуры (35...45), град;

X_6 – толщина опорного листа (4...8), мм.

Функции отклика:

Y_1 – максимальный вертикальный прогиб, мм;

Y_2 – максимальные эквивалентные напряжения в арматуре, МПа;

Y_3 – масса металлической состав-

ляющей, кг.

Получение зависимостей функций отклика от факторов варьирования выполним методами регрессионного анализа с использованием теории планирования вычислительного эксперимента. В качестве плана вычислительного эксперимента принимаем дробнофакторный план второго порядка в нормированных значениях. Полиномиальная модель, описывающая зависимость функций отклика от значений факторов варьирования, имеет следующий вид:

$$Y = a_0 + a_1 X_1^2 + a_2 X_2^2 + a_3 X_3^2 + a_4 X_4^2 + a_5 X_5^2 + a_6 X_6^2 + a_7 X_1 + a_8 X_2 + a_9 X_3 + a_{10} X_4 + a_{11} X_5 + a_{12} X_6,$$

где a_i – подлежащие определению коэффициенты.

На рис. 5 и 6 показаны результаты

реализации математической модели для рассматриваемой расчетной схемы.

Коэффициенты полиномиальных моделей приведены в табл. 1.

На рис. 7–9 показаны зависимости функций отклика от факторов варьирования в диапазоне их изменения для схемы изгиба

при двустороннем жестком опирании.

На рис. 10–12 показаны зависимости функций отклика от факторов варьирования в диапазоне их изменения для схемы сжатия при одностороннем жестком опирании.

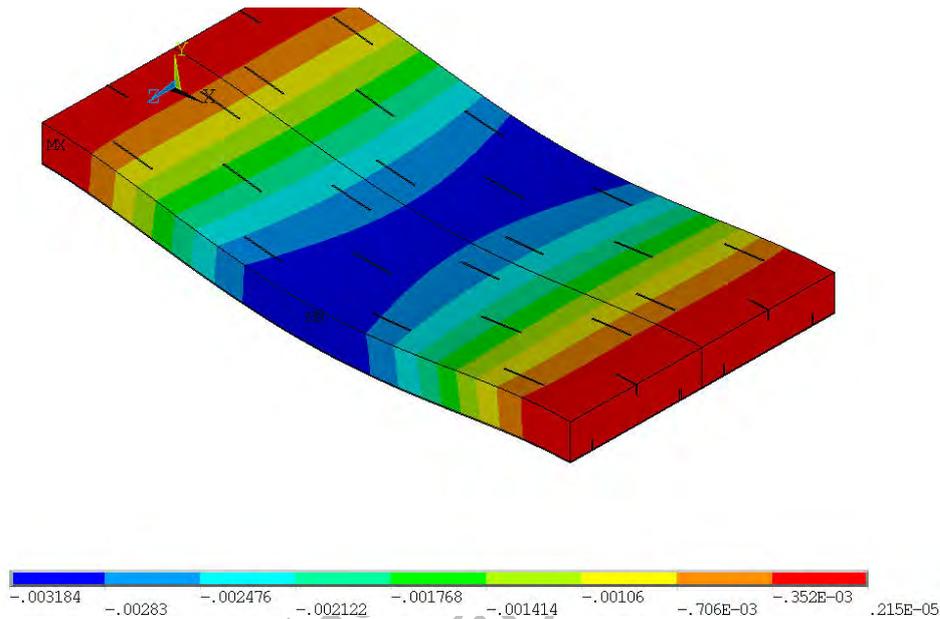


Рис. 5. Вертикальный прогиб КНЭСК

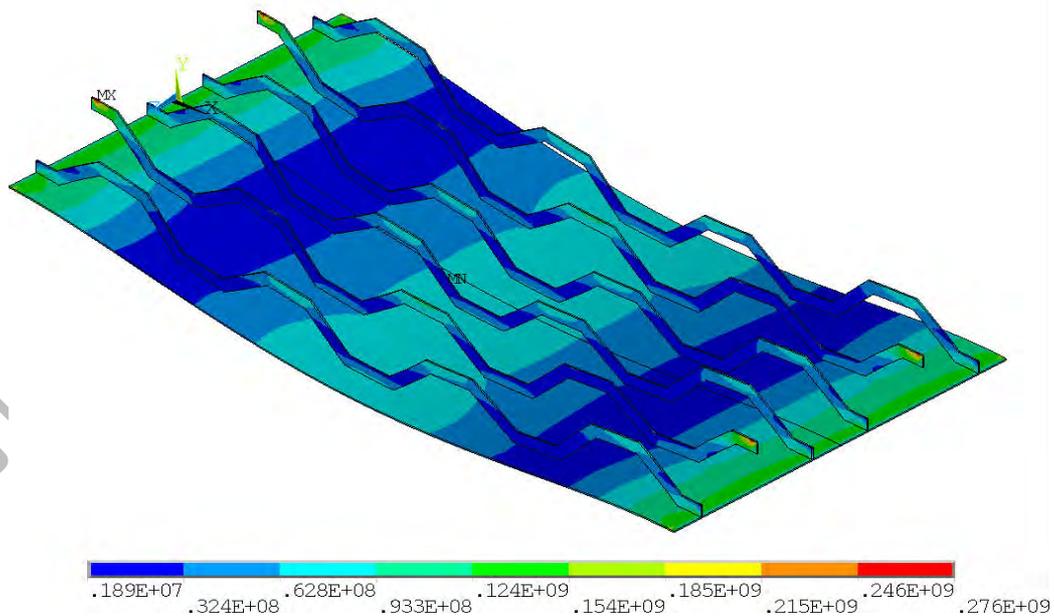


Рис. 6. Эквивалентные напряжения в металлической составляющей КНЭСК

Табл. 1. Коэффициенты полиномиальных моделей

Расчетная схема	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9	a_{10}	a_{11}	a_{12}
Изгиб при двустороннем жестком опирании	Y_1	3,196	-0,0039	-0,0021	-0,003	-0,004	0,059	-0,041	-0,036	0,01	-0,012	-0,016	-0,358
	Y_2	266,25	-7,33	3,8	-4,33	1,92	5,3	3,67	-9,17	-10,33	-4,58	0,83	-13,83
	Y_3	250,19	0,908	0,908	0,908	-1,66	0,903	14,08	13,85	1,96	8,46	4,04	70,84
Изгиб при четырехстороннем жестком опирании	Y_1	0,228	-0,00024	-0,00012	-0,00012	-0,00024	-0,0035	-0,0008	-0,0006	0,00008	-0,0003	-0,0003	-0,021
	Y_2	40,1	0,33	0,038	0,038	0,338	1,8	0,712	-0,13	0,021	-0,69	-0,154	-6,68
Изгиб при двустороннем жесткошарнирном опирании	Y_1	5,56	-0,0034	-0,00081	-0,0034	-0,0042	0,084	-0,074	-0,065	0,015	-0,021	-0,029	-0,545
	Y_2	354,8	-6,57	-2,94	-2,82	-5,19	20,4	-1,04	-8,2	1,3	12,2	2,54	-40,9
Изгиб при двустороннем шарнирном опирании	Y_1	8,3	-0,00481	0,007	-0,0051	-0,0053	0,087	-0,12	-0,1	0,025	-0,038	-0,042	-0,576
	Y_2	608	-14,4	-13,3	-10,2	-18,2	31,6	4,25	15,3	31,25	-26,8	-13,75	-142,3
Сжатие при одностороннем жестком опирании	Y_1	0,249	0,00042	0,00067	0,00017	0,00055	-0,0076	-0,0064	-0,0055	0,00083	-0,0018	-0,0019	0,041
	Y_2	4,2	-0,029	0,014	-0,0082	-0,011	0,132	0,044	-0,047	-0,048	-0,197	-0,031	-0,145
	Y_3^*	0,058	0,000067	0,000092	0,00003	0,000067	0,000055	-0,0003	-0,001	-0,0009	0,000092	-0,0003	-0,0003

Примечание -* – горизонтальное перемещение, мм

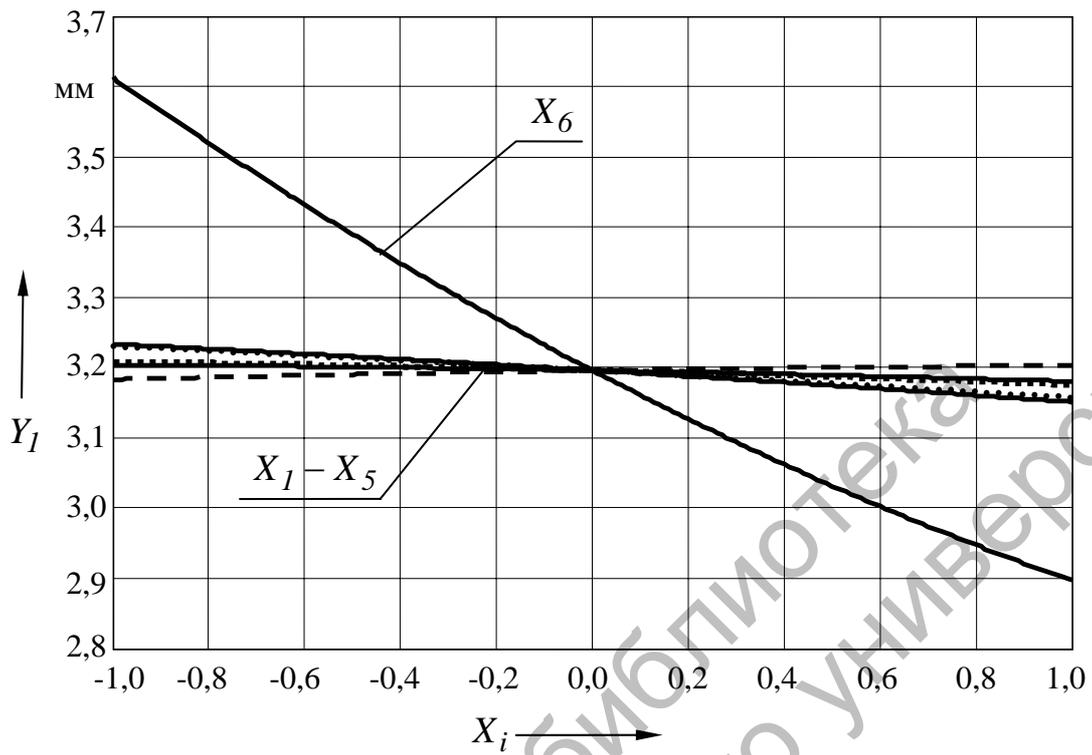


Рис. 7. Зависимость вертикального прогиба от факторов варьирования (изгиб)

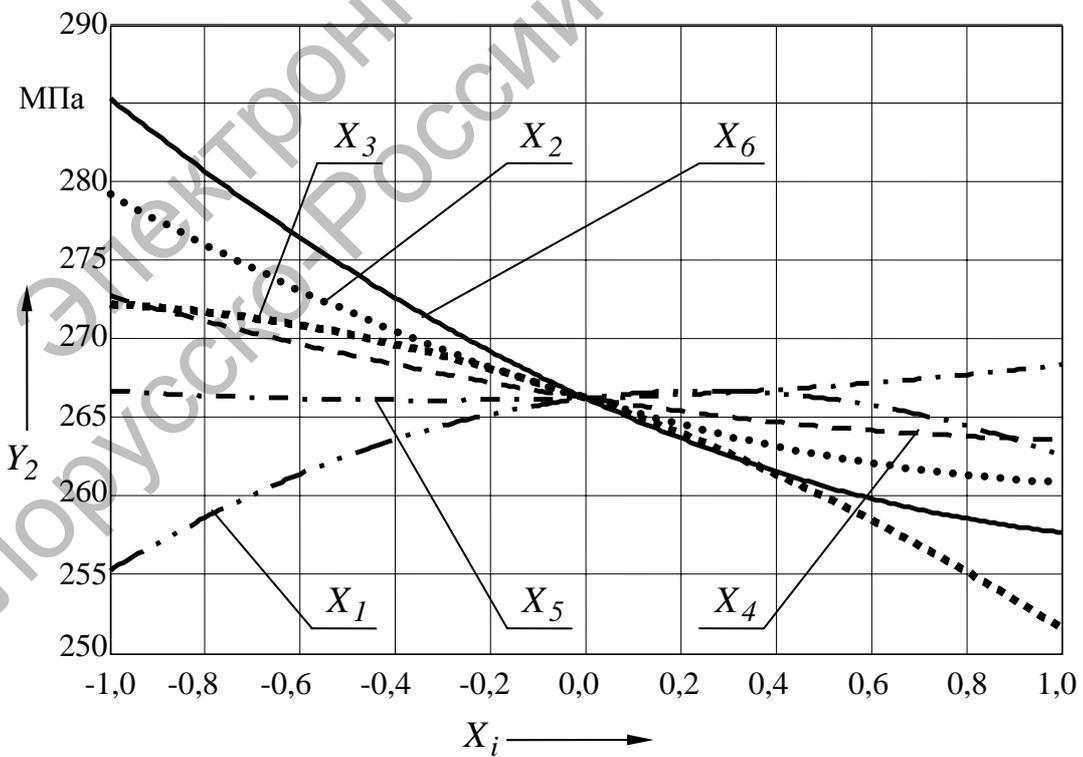


Рис. 8. Зависимость эквивалентных напряжений от факторов варьирования (изгиб)

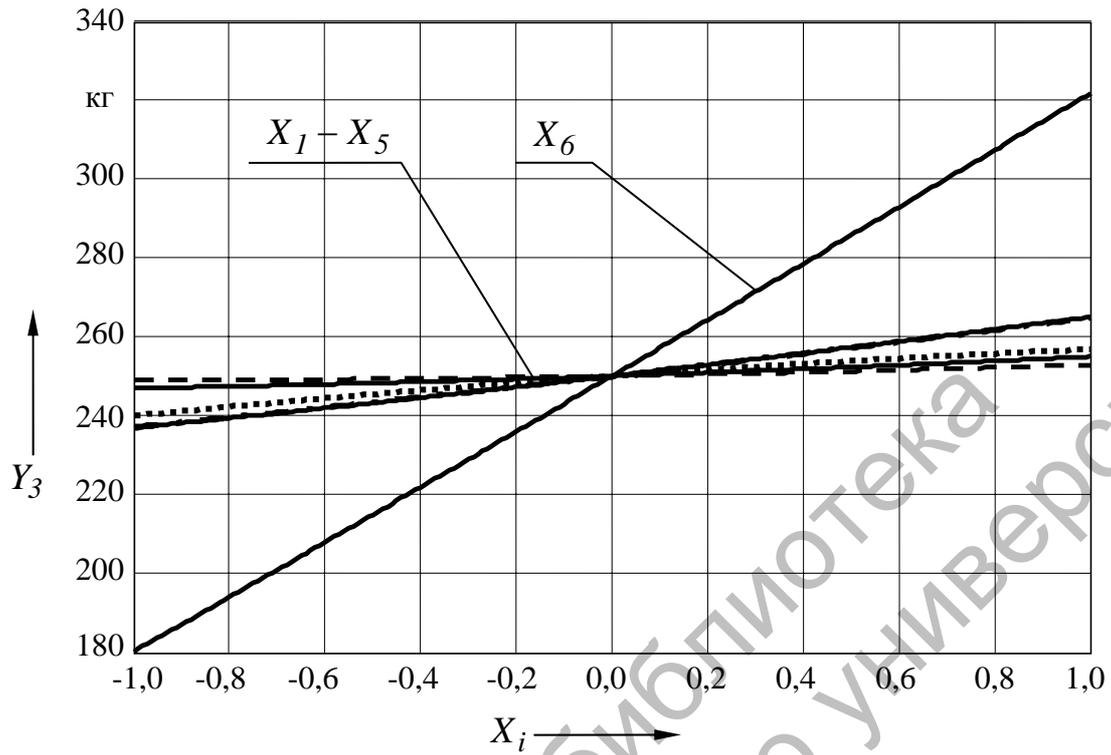


Рис. 9. Зависимость массы металлической составляющей от факторов варьирования (изгиб)

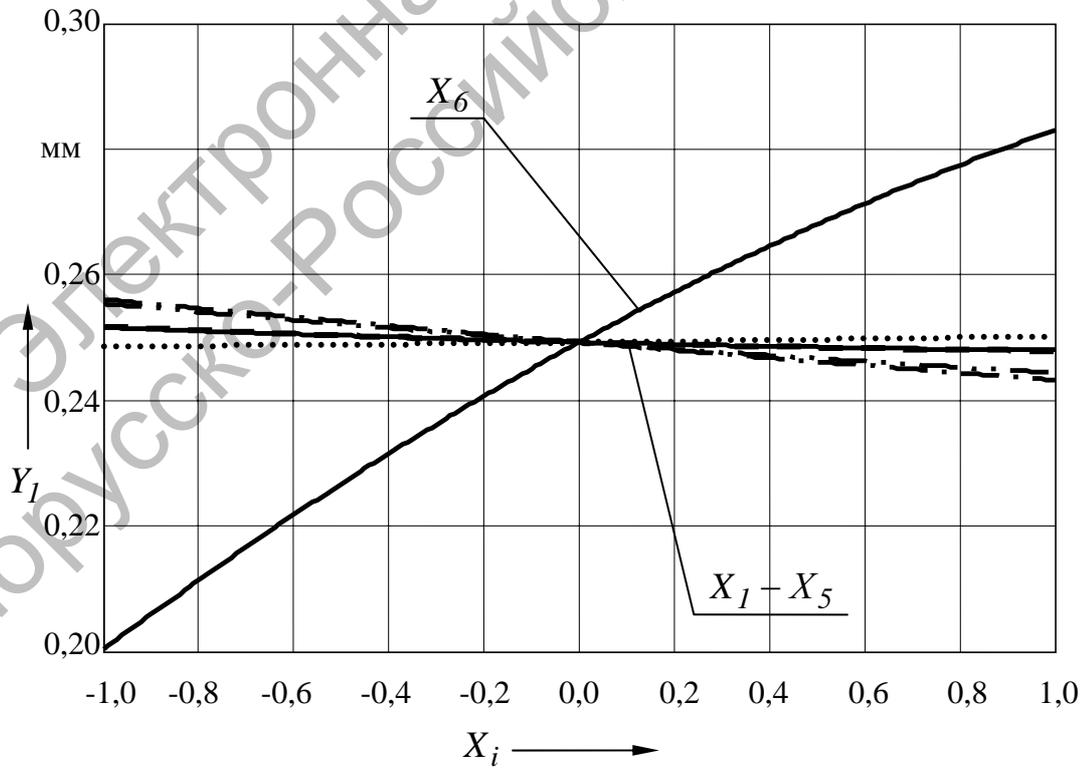


Рис. 10. Зависимость вертикального прогиба от факторов варьирования (сжатие)

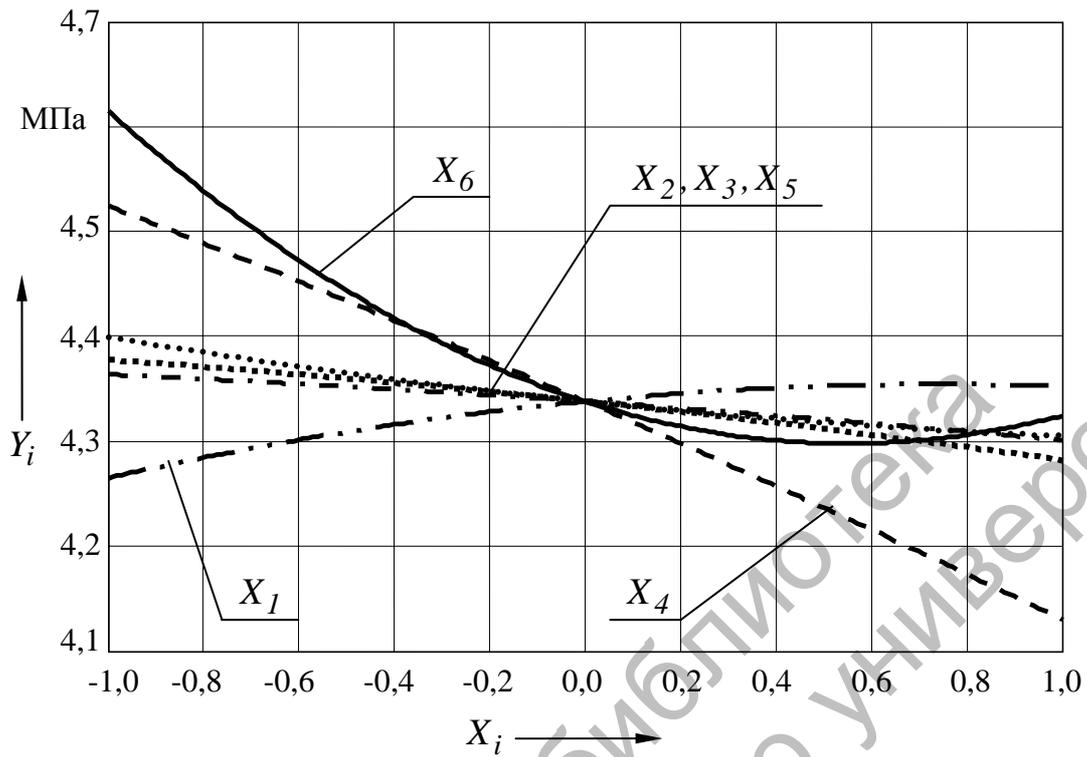


Рис. 11. Зависимость эквивалентных напряжений от факторов варьирования (сжатие)

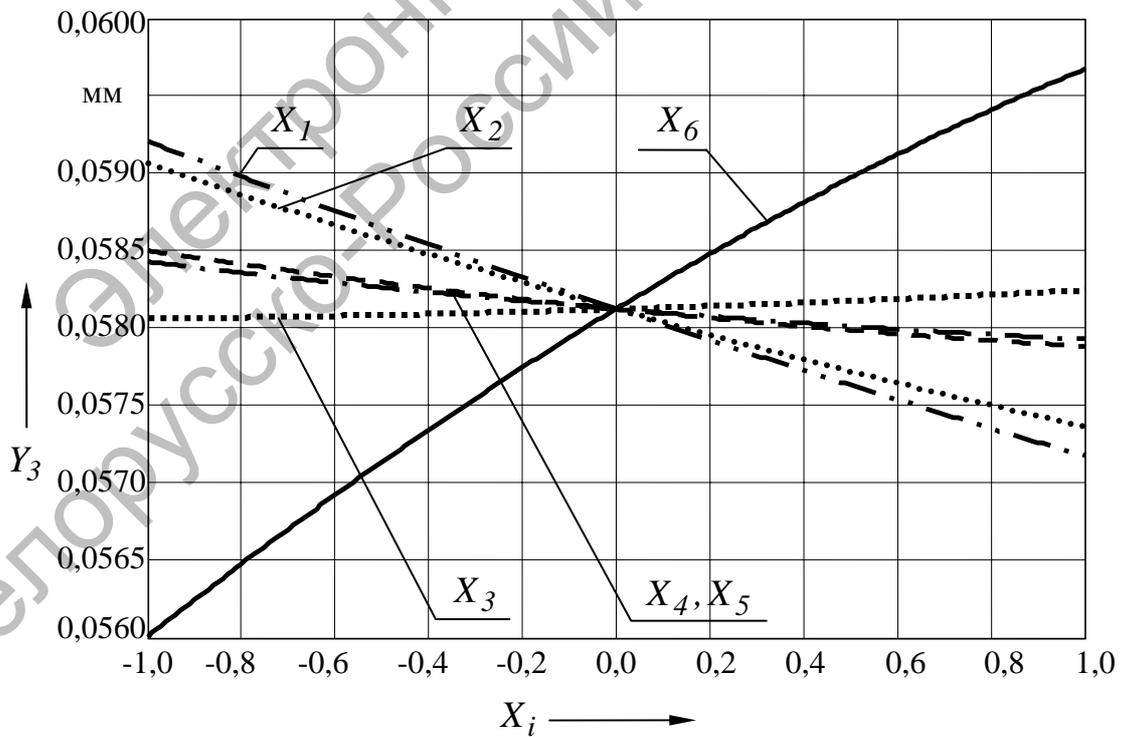


Рис. 12. Зависимость горизонтального перемещения от факторов варьирования (сжатие)

Графики влияния конструктивных параметров на напряжения и прогибы при работе КНЭСК на изгиб (см. рис. 7 и 8) имеют одинаковый качественный вид. Их анализ показывает, что подбор рациональных параметров металлической составляющей необходимо выполнять на основании экспертных оценок. Это обусловлено тем, что один и тот же фактор (толщина опорного листа X_6) оказывает наибольшее влияние как на жесткостные (см. рис. 7), так и на массовые (см. рис. 9) характеристики КНЭСК. Поэтому при проектировании КНЭСК необходимо определить, какая из качественных характеристик (жесткость или масса) является более важной в конкретном случае. Возможно задание значений одной или двух характеристик в виде функций штрафа. Остальные факторы оказывают незначительное влияние на характеристики КНЭСК. Степень влияния факторов варьирования на уровень напряжений (см. рис. 8) является приблизительно одинаковой. Вследствие того, что уровнем напряжений варьировать значительно легче, чем прогибом или массой, их значения носят больше информативный, чем руководящий характер. Таким образом, при работе КНЭСК на изгиб рациональность конструкции в каждом конкретном случае будет определяться предъявляемыми к ней требованиями.

При работе КНЭСК на сжатие, кроме толщины опорного листа X_6 на вели-

чину горизонтального перемещения (по направлению действия нагрузки) (см. рис. 12), значительное влияние оказывают количество рядов X_1 и толщина листа X_2 фасонной арматуры. Т. е. при данном виде нагружения жесткость конструкции может быть повышена при несущественном увеличении массы.

Результатом работы являются регрессионные зависимости характеристик КНЭСК от ряда параметров, которые позволяют на стадии проектирования обоснованно принять решение о рациональном конструктивном исполнении КНЭСК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кузменко, И. М.** Применение сварных несущих элементов в новых композитных строительных конструкциях / И. М. Кузменко, С. К. Павлюк, В. М. Фридкин // Сварочное производство. – 2003. – № 9. – С. 47–50.
2. **Пат. 4082 РБ, МПК⁷ Е 04 С 2/28.** Композитный несущий элемент строительных конструкций / В. М. Фридкин, А. В. Носарев (РФ), И. М. Кузменко, С. К. Павлюк, А. В. Семенов, В. А. Попковский, А. А. Филатенков (РБ). – № 970421 ; заявл. 29.07.97 ; опубл. 30.09.2001, Бюл. № 3. – 3 с. : ил.
3. **Пат. 2181406 РФ, МПК⁷ Е 01 D 12/00, Е 04 С 2/24.** Композитный несущий элемент строительных / В. М. Фридкин, А. В. Носарев (РФ), И. М. Кузменко, С. К. Павлюк, А. В. Семенов, В. А. Попковский, А. А. Филатенков (РБ). – № 97121947 ; заявл. 29.07.97 ; опубл. 20.04.2002, Бюл. № 11. – 6 с. : ил.

Белорусско-Российский университет
Материал поступил 15.01.2007

**I. M. Kuzmenko, O. V. Leonenko,
V. N. Medvedev, M. E. Podymako**
**Analysis of parameters influence
of metallic component of composite
element of building constructions
on its bearing capacity**
Belarusian-Russian University

Stress-strain state of composite bearing element of building constructions (CBEBC) for different fixing and forcing schemes is considered. Regression dependencies of factors of bearing capacity and mass from parameters of metallic component of CBEBC are received.