

УДК 624.04

М. Саллум, А. Аль Хаджаль, Г. В. Дегтярев

Кубанский государственный аграрный университет им. И. Т. Трубилина

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЦИФРОВЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ НАПРЯЖЕНИЙ В ВЕРХНЕМ ПОЯСЕ ФЕРМЫ С КАРКАСОМ УСИЛЕНИЯ И БЕЗ УСИЛЕНИЯ

В статье рассматривается усиление железобетонной фермы внешним каркасом из швеллера, предложенным авторами. Поскольку верхний пояс рассчитывается как сжатый элемент, основное внимание уделено анализу напряжения в верхнем поясе. Расчет напряжений в ферме до и после усиления при симметричной нагрузке в узлах верхнего пояса проводился с использованием метода конечных элементов с помощью программного продукта «Лира-САПР».

К л ю ч е в ы е с л о в а: железобетонная ферма, напряжение, усиление, «Лира-САПР», wxMaxima.

Введение

В современном мире, когда архитектура становится все более сложной и требования к конструкциям растут, усиление конструкций играет важную роль [1, 2].

В наклонных бетонных элементах возникают главные растягивающие напряжения, действующие под наклоном к оси элемента под влиянием нормальных и касательных напряжений [3].

Если деформации бетона превысят предельные деформации при растяжении или главные напряжения в бетоне превысят предел прочности, то в конструкции могут возникнуть наклонные трещины [4]. При возникновении наклонной трещины главные растягивающие напряжения передаются на арматуру, как продольную, так и поперечную [5].

Верхний пояс обеспечивает прочность и устойчивость конструкции [6]. Он распределяет нагрузку от поперечных элементов (ребер) на стойки, что позволяет ферме выдерживать значительные нагрузки и сохранять форму. Верхний пояс также служит для соединения ребер и сохраняет жесткость всей конструкции, что важно для предотвращения деформаций и долговечности здания.

Для уменьшения напряжений в бетонных элементах можно применить армирование элемента снаружи железными стержнями, что помогает усилить его, снизить напряжения и позволяет верхнему поясу и ферме выдерживать большие нагрузки, делает конструкцию более прочной [7].

Материалы и методы

Расчет напряжений в ферме до и после усиления при симметричной нагрузке в узлах верхнего пояса проводился с помощью программного продукта «Лира-САПР».

В результате эксперимента получены определенные параметры системы: напряжения от приложенных нагрузок, загрузка и длина, координаты исследуемой точки верхнего пояса. Вычисленные данные обработаны и проанализированы с помощью программного комплекса wxMaxima [8–10]. Результаты математического моделирования представлены на рис. 1–4.

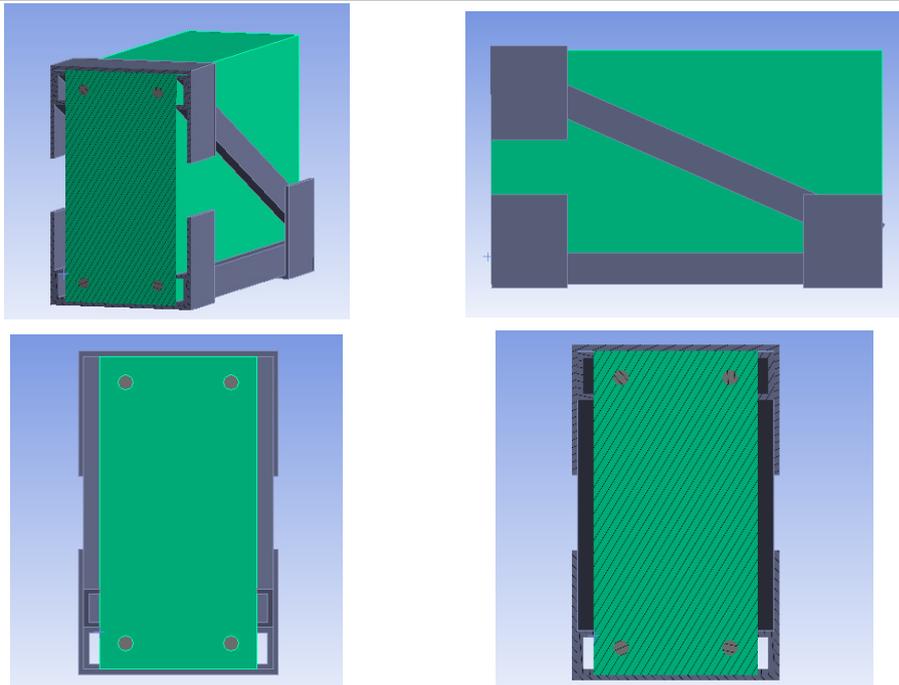


Рис. 1. Устройство для усиления приопорных частей железобетонных ферм покрытия

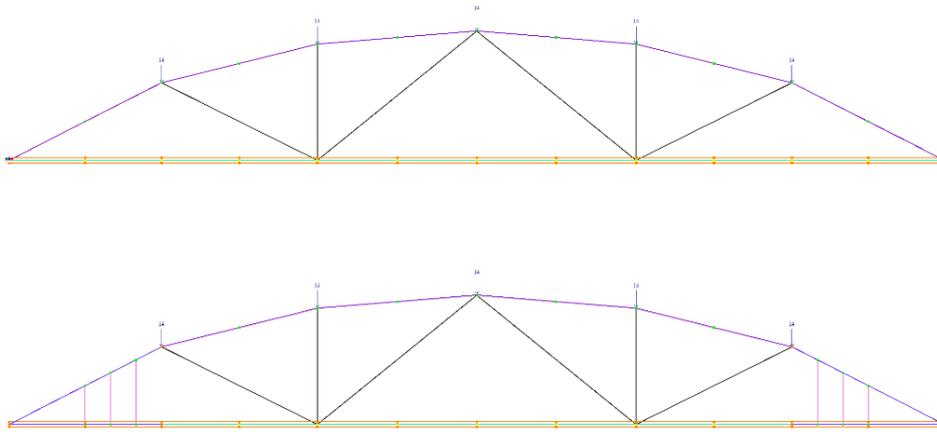


Рис. 2. Расчетные математические модели

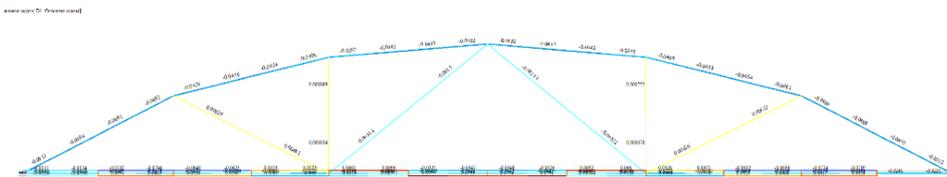


Рис. 3. Расчетная эпюра напряжения в ферме до усиления

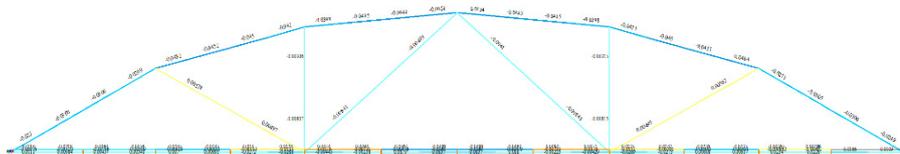


Рис. 4. Расчетная эпюра напряжения в ферме, усиленной швеллером

Вид математической модели фермы по напряжению, в верхнем поясе:

$$Z(x, y) = -7499,5274 + 1053,43923x - 129,17933y + \\ + 0,31453xy - 60,12935x^2 - 0,69628y^2.$$

Вид математической модели фермы с каркасом по напряжению, в верхнем поясе:

$$Z(x, y) = -2674,97629 - 379,49552x - 49,15403y + \\ + 0,00748xy + 21,5773x^2 - 0,14368y^2.$$

Поверхность функции отклика фермы по напряжению представлена на рис. 5.

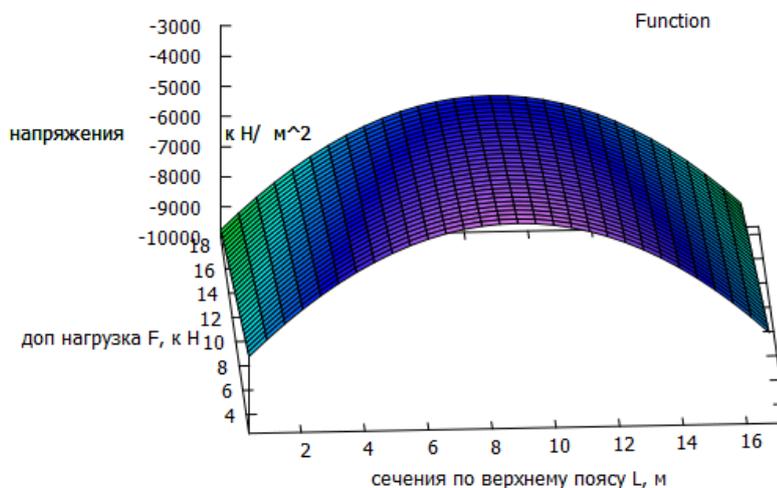


Рис. 5. Поверхность функции отклика по математической модели напряжения (кН/м²) в ферме по верхнему поясу, без каркаса

Анализ поверхности функции отклика по математической модели напряжения (кН/м²) по верхнему поясу фермы без каркаса позволяет констатировать, что при изменении аргумента по оси Ox расстояний до сечений по стержням от 0,36 до 17,24 м, а также по оси Oy дополнительной нагрузки по узлам от 2,45 до 18,63 кН, значения напряжений, т. е. функции отклика, могут измениться от -1000 до -300 кН/м². При этом поверхность отклика представляет собой достаточно равномерную выпуклую плоскость, что указывает на

безусловное наличие экстремальных значений в исследуемом диапазоне аргументов [11, 12].

Поверхность функции отклика по математической модели напряжения (кН/м^2) по верхнему поясу в ферме с каркасом представлена на рис. 6.

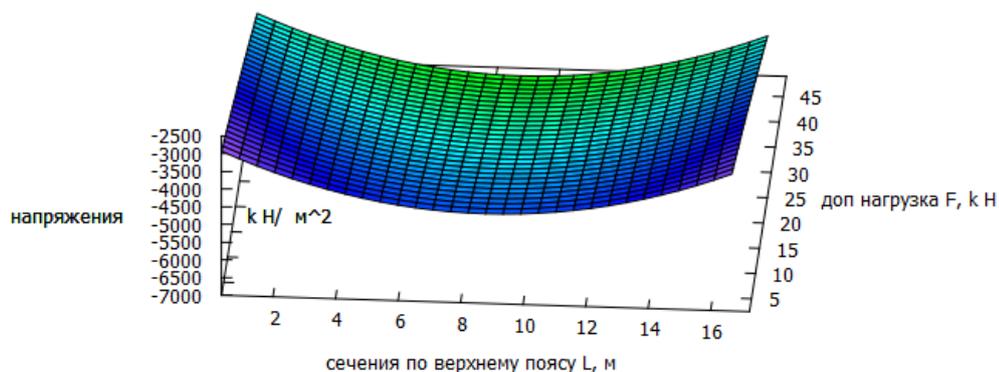


Рис. 6. Поверхность функции отклика по математической модели напряжения (кН/м^2) в ферме по верхнему поясу, с каркасом

Результаты

Анализ линий равных уровней по функции отклика по напряжению (кН/м^2) по верхнему поясу в ферме без каркаса

Анализ линий равных уровней по функции отклика по математической модели по верхнему поясу фермы без каркаса (рис. 7) позволяет констатировать, что при изменении аргумента по оси Ox расстояний до сечений по стержням от 0,36 до 17,24 м, а также по оси Oy дополнительной нагрузки по узлам от 2,45 до 18,63 кН, значения напряжений, т. е. функции отклика, по уточненным данным могут изменяться от -2500 до -7000 кН/м^2 . При этом явно подтвердилось предположение, что функция отклика обладает экстремальными значениями в исследуемом диапазоне аргумента [13, 14].

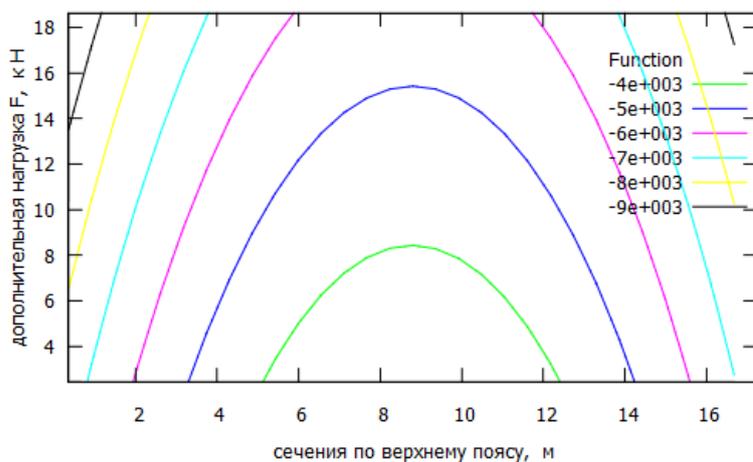


Рис. 7. Линии равных уровней по поверхности функции отклика по математической модели напряжения в ферме по верхнему поясу, без каркаса

Анализ поверхности функции отклика по математической модели напряжения (кН/м^2) по верхнему поясу фермы с каркасом позволяет констатировать, что при изменении аргумента по оси Ox расстояний до сечений по стержням от 0,36 до 17,24 м, а также по оси Oy дополнительной нагрузки по узлам от 2,45 до 49,03 кН, значения напряжений, т. е. функции отклика, могут изменяться от $-9\text{e}+003$ до $-4\text{e}+003$ кН/м^2 . При этом поверхность отклика представляет собой достаточно равномерную вогнутую плоскость, что указывает на безусловное наличие экстремальных значений в исследуемом диапазоне аргументов [15].

Анализ линий равных уровней по функции отклика по напряжению (кН/м^2) по верхнему поясу в ферме с каркасом

Анализ линий равных уровней по функции отклика по математической модели напряжений по верхнему поясу фермы с каркасом (рис. 8) позволяет констатировать, что при изменении аргументов по оси Ox расстояний до сечений по стержням от 0,36 до 17,24 м, а также по оси Oy дополнительной нагрузки по узлам от 2,45 до 49,03 кН, значения напряжений, т. е. функции отклика, могут изменяться по уточненным данным от $-3\text{e}+003$ до $-6,5\text{e}+003$ кН/м^2 . При этом явно подтвердилось предположение, что функция отклика обладает экстремальными значениями в исследуемом диапазоне аргументов.

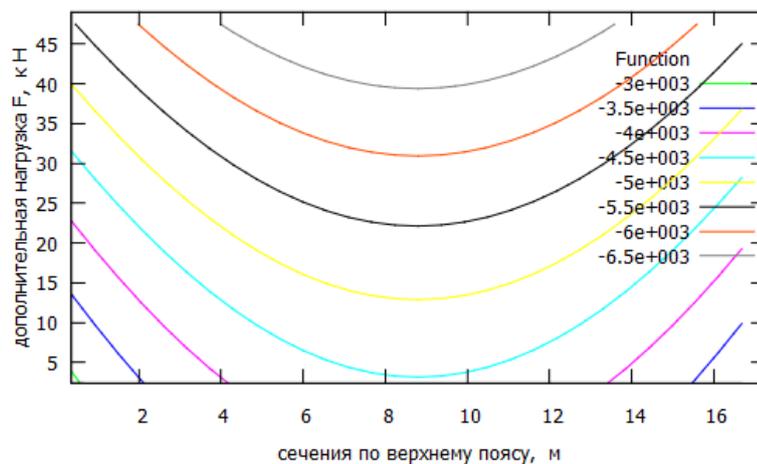


Рис. 8. Линии равных уровней по поверхности функции отклика по математической модели по напряжению в ферме по верхнему поясу, с каркасом

Обсуждение

Анализ функции отклика при постоянной нагрузке в узлах фермы по верхнему поясу без каркаса, $F_1(x; 2,45)$, $F_2(x; 10,54)$, $F_3(x; 18,63)$

Анализ функции отклика по напряжению (т/м^2) при постоянной нагрузке в узлах фермы $F_1(x; 2,45)$, $F_2(x; 10,54)$, $F_3(x; 18,63)$ позволил получить следующие упрощенные уравнения:

$$F_1(x; 2,45) = -60,12935x^2 + 1054,2098285x - 7820,1961792,$$

$$F_2(x; 10,54) = -60,12935x^2 + 1056,7543762x - 8938,428397447999,$$

$$F_3(x; 18,63) = -60,12935x^2 + 1059,2989239x - 10147,801021832.$$

Анализ математических моделей и функций отклика при постоянных нагрузках в узлах фермы $F_1(x; 2,45)$, $F_2(x; 10,54)$, $F_3(x; 18,63)$ позволил зафиксировать наличие экстремальных значений функций по напряжению (кН/м^2) при любых постоянных нагрузках в узлах фермы (рис. 9).

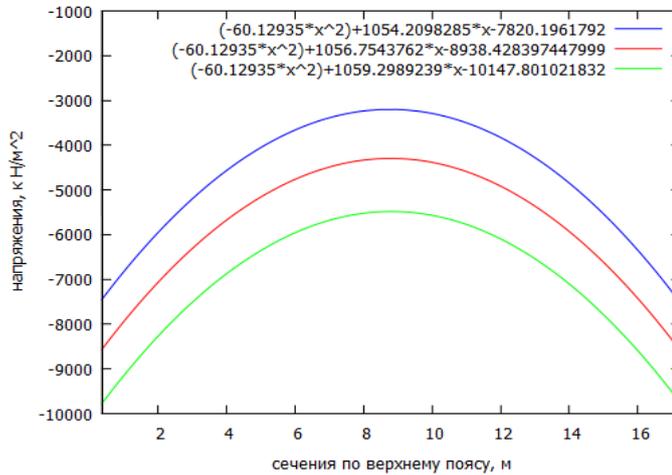


Рис. 9. Значения напряжений (кН/м^2) по верхнему поясу в ферме без каркаса при постоянных нагрузках в узлах фермы

При наименьшей нагрузке в узлах фермы, равной $F_1(x; 2,45)$, экстремальное значение функции максимально равно $3223,79 \text{ кН/м}^2$ при расстоянии до сечения $8,8 \text{ м}$. При сечении $0,36 \text{ м}$ значение напряжения равно $-7419,79 \text{ кН/м}^2$, при расстоянии до сечения $17,24 \text{ м}$ напряжение равно $-7538,59 \text{ кН/м}^2$.

Анализ математической модели и функции отклика при средней нагрузке в узлах фермы, равной $F_2(x; 10,54)$, дает максимальное экстремальное значение функции, равное $-4284,67 \text{ кН/м}^2$, при расстоянии до сечения $8,8 \text{ м}$. При сечении $0,36 \text{ м}$ значение напряжения равно $-8551,95 \text{ кН/м}^2$, при расстоянии до сечения $17,24 \text{ м}$ напряжение будет так же равно $-8621,84 \text{ кН/м}^2$.

Анализ математической модели и функции отклика при наибольших нагрузках в узлах фермы, равных $F_3(x; 18,63)$, дает максимальное экстремальное значение функции $-5493,71 \text{ кН/м}^2$ при расстоянии до сечения $8,8 \text{ м}$. При сечении $0,36 \text{ м}$ значение напряжения равно $-9800,12 \text{ кН/м}^2$, при расстоянии до сечения $17,24 \text{ м}$ напряжение равно $-9777,76 \text{ кН/м}^2$.

На основании представленных данных можно констатировать, что работа фермы по напряжению симметрична в диапазоне представленных нагрузок [16, 17]. Анализ функции отклика по напряжению (т/м^2) при постоянной нагрузке в узлах фермы $F_1(x; 2,45)$; $F_2(x; 25,74)$; $F_3(x; 49,03)$ позволил получить следующие упрощенные уравнения:

$$F_1(x; 25,74) = 21,5773x^2 - 379,47719x - 2796,2661,$$

$$F_2(x; 25,74) = 21,5773x^2 - 379,30298x - 4035,39586,$$

$$F_3(x; 1900) = 21,5773x^2 - 379,12878x - 5430,39661.$$

Анализ функции отклика при постоянной нагрузке в узлах фермы по верхнему поясу с каркасом $F_1(x; 2,45)$, $F_2(x; 25,74)$, $F_3(x; 49,03)$

Анализ математических моделей и функций отклика при постоянных нагрузках в узлах фермы $F_1(x; 2,45)$, $F_2(x; 25,74)$, $F_3(x; 49,03)$ позволил зафиксировать наличие экстремальных значений функций по напряжению (кН/м^2) при любых постоянных нагрузках в узлах фермы (рис. 10).

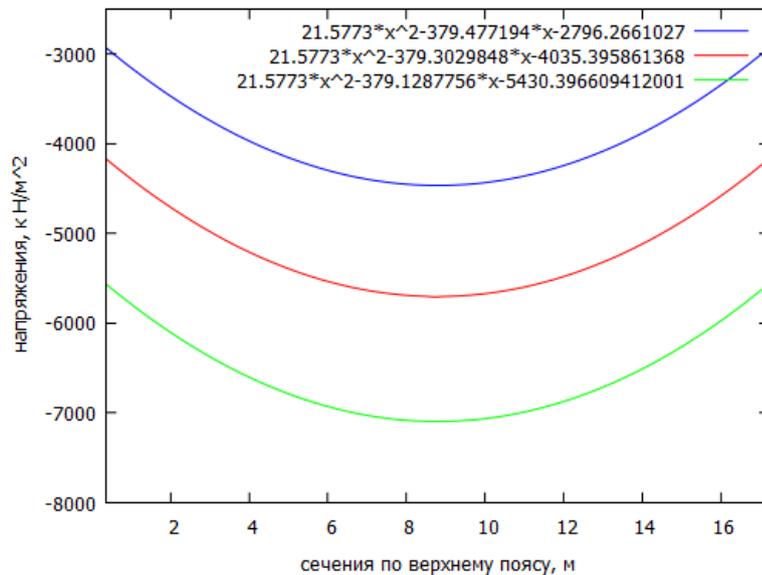


Рис. 10. Значения напряжений (кН/м^2) по верхнему поясу в ферме с каркасом при постоянных нагрузках в узлах фермы

При наименьших нагрузках в узлах фермы $F_1(x; 2,45)$ минимальное экстремальное значение функции равно $-4460,32 \text{ кН/м}^2$ при расстоянии до сечения 8,81 м. При сечении 0,36 м значение напряжения равно $-2927,08 \text{ кН/м}^2$, и при расстоянии до сечения 17,24 м напряжение будет $-2913,41 \text{ кН/м}^2$.

Анализ математической модели и функции отклика при средних нагрузках в узлах фермы $F_2(x; 25,74)$ позволяет фиксировать минимальное экстремальное значение функции $-5700,57 \text{ кН/м}^2$ при расстоянии до сечения 8,82 м. При сечении 0,36 м значение напряжения равно $-4153,67 \text{ кН/м}^2$, при расстоянии до сечения 17,23 м напряжение будет $-4167,34 \text{ кН/м}^2$.

Анализ математической модели и функции отклика при наибольших нагрузках в узлах фермы $F_3(x; 49,03)$ позволяет фиксировать минимальное экстремальное значение функции, равное $-7100,56 \text{ кН/м}^2$ при расстоянии до сечения 8,83 м. При сечении 0,36 м значение напряжения равно $-5539,99 \text{ кН/м}^2$, при расстоянии до сечения 17,23 м напряжение равно $-5553,66 \text{ кН/м}^2$.

Таким образом, на основании представленных данных можно констатировать, что работа фермы по напряжению симметрична в диапазоне представленных нагрузок.

Анализ математической модели и функции отклика при постоянных расстояниях до сечений по ферме $F_1(0,36; y)$, $F_2(8,975; y)$, $F_3(17,24; y)$ позволил получить следующие упрощенные уравнения:

$$F_1(0,36; y) = -0,69628y^2 - 129,0660992y - 7128,082040959999,$$

$$F_2(8,975; y) = -0,69628y^2 - 126,411466y - 2885,67904,$$

$$F_3(17,24; y) = -0,69628y^2 - 123,7568328y - 7209,73617136.$$

Анализ математической модели и функции отклика при наименьшем постоянном расстоянии до сечения $F_1(0,36; y)$ позволяет фиксировать практически линейную связь между аргументом и функцией, как, между прочим, и для всех других рассмотренных сечений (рис. 11, 12). При этом в случае наименьшей нагрузки, равной 2,45 кН, значение напряжения равно $-7470,29 \text{ кН/м}^2$, а при наибольшей нагрузке, равной 18,63 кН, значение напряжения равно $-9768,91 \text{ кН/м}^2$.

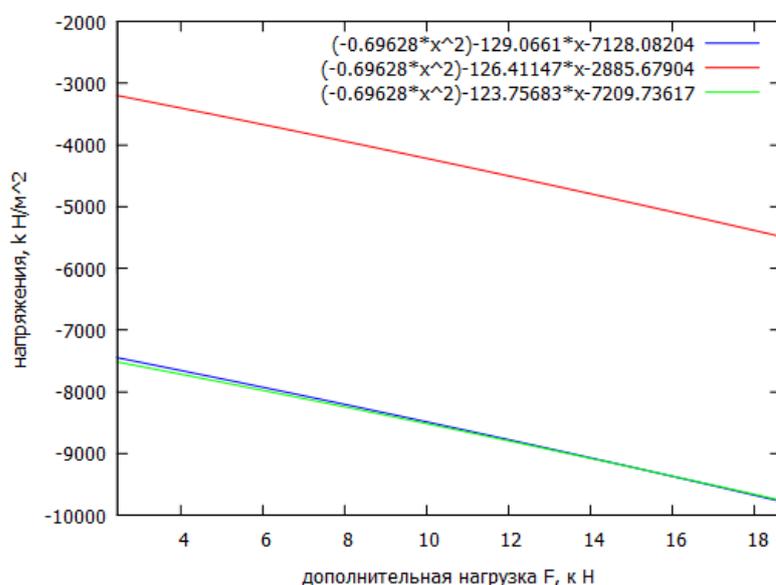


Рис. 11. Значения напряжений, по верхнему поясу в ферме без каркаса при постоянных расстояниях до сечений $F_1(0,36; y)$, $F_2(8,975; y)$, $F_3(17,24; y)$

В рассматриваемом случае выявилось, что практически совпадают данные по значениям аргумента и функции при наибольшем и наименьшем постоянных расстояниях до сечения, равных $F_1(0,36; y)$ и $F_3(17,24; y)$, что нашло подтверждение в виде совпадения прямых при $F_1(0,36; y)$ и при $F_3(17,24; y)$ (см. рис. 11).

Анализ математической модели и функции отклика при среднем постоянном расстоянии до сечения $F_2(8,975; y)$ позволяет фиксировать также практически линейную связь между аргументом и функцией, однако в этом случае значения напряжений меньше в сравнении с предыдущими. Так в случае наименьшей нагрузки, равной 2,45 кН, значение напряжения равно $-3203,91 \text{ кН/м}^2$, а при наибольшей нагрузке, равной 18,63 кН, значение напряжения составляет $-5482,53 \text{ кН/м}^2$.

Анализ математической модели и функции отклика при постоянных расстояниях до сечений по ферме $F_1(0,36; y)$, $F_2(8,975; y)$, $F_3(17,24; y)$ позволил получить следующие упрощенные уравнения:

$$F_1(0,36; y) = -0,14368y^2 - 49,15134y - 2808,79826,$$

$$F_2(8,975; y) = -0,14368y^2 - 49,08821y - 4343,59075,$$

$$F_3(17,24; y) = -0,14368y^2 - 49,02507y - 2804,32573.$$

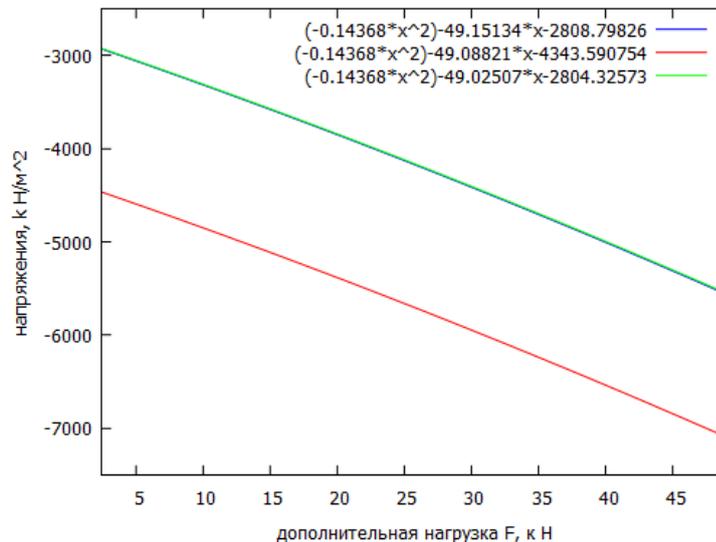


Рис. 12. Значения напряжений по верхнему поясу (т/м^2) в ферме с каркасом при постоянных расстояниях до сечений $F_1(0,36; y)$, $F_2(8,975; y)$, $F_3(17,24; y)$

Заклучение

Анализ математической модели и функции отклика при наименьшем постоянном расстоянии до сечения $F_1(0,36; y)$ позволяет фиксировать практически линейную зависимость между аргументом и функцией, как и для всех других рассмотренных сечений. При этом в случае наименьшей нагрузки, равной 2,45 кН, значение напряжения равно $-2926,31 \text{ кН/м}^2$, а при наибольшей нагрузке 49,03 кН значение напряжения равно $-5574,24 \text{ кН/м}^2$.

В рассматриваемом случае выявилось практическое совпадение значений аргумента и функции, наблюдающихся при наибольшем и наименьшем постоянных расстояниях до сечения $F_1(0,36; y)$ и $F_3(17,24; y)$, что нашло подтверждение в совпадении прямых при $F_1(0,36; y)$ и при $F_3(17,24; y)$.

Анализ математической модели и функции отклика при среднем постоянном расстоянии до сечения $F_2(8,975; y)$ позволяет фиксировать так же практически линейную связь между аргументом и функцией, однако в этом случае значения напряжений будут больше по сравнению с предыдущими случаями. В случае наименьшей нагрузки 2,45 кН значение напряжения будет равно $-4452,94 \text{ кН/м}^2$, а при наибольшей нагрузке 49,03 кН значение напряжения будет $-7101,07 \text{ кН/м}^2$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дегтярев Г. В., Аль Хаджаль А. С. Исследование цифровыми технологиями поперечной силы в железобетонной балке покрытия, усиленной швеллером // Инженерный вестник Дона. 2022. № 8(92). С. 207—218.

2. Дегтярев Г. В., Аль Хаджаль А. С., Саллум М. Р. Сравнительный анализ цифровыми технологиями моментов в железобетонной балке покрытия, усиленной швеллером или двутавром // Инженерный вестник Дона. 2023. № 2(98). С. 297—310.
3. Дегтярев В. Г., Дегтярев Г. В., Дегтярева О. Г. Численное моделирование и цифровой математический анализ при исследовании сложных систем // Известия НВ АУК. 2023. № 3(71). С. 540—553.
4. Способ реконструкции и усиления приопорных частей железобетонных балок: пат. 2754840 Российская Федерация, МПК E04G 23/0218 / Г. В. Дегтярев, С. К. Сайда, Д. А. Дацьо, П. С. Кошевец, А. С. Аль Хаджаль // Заявитель и патентообладатель Кубанский государственный аграрный университет (RU). № № 2020140688; заявл. 08.12.2020; опубл. 08.09.2021.
5. Устройство для усиления приопорных частей железобетонных балок: пат. 2761800 Российская Федерация, МПК E04G 23/02 / Г. В. Дегтярев, С. К. Сайда, А. С. Аль Хаджаль, М. Р. Саллум, С. Г. Або Аррадж // Заявитель и патентообладатель Кубанский государственный аграрный университет (RU). № 2020140730; заявл. 09.12.2020; опубл. 13.12.2021.
6. Degtyarev G. V., Salloum M. R., Abo Arraj S. G. The design parameters analysis of typical support parts for the ferro-concrete roof beams reinforced with unweighted frame. // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1083. 012007.
7. Degtyarev G. V., Saida S. K., Al Hajal A. Comparative analysis of typical and reinforced support parts design parameters for reinforced concrete roof beams. // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1083. 012006.
8. Голиков А. В., Терновой В. А., Якимов П. В. Характер развития повреждений и распределения напряженно-деформированного состояния в несущих конструкциях эксплуатируемого покрытия с балочными фермами перекрестной системы // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2023. Вып. 5(93). С. 18—30.
9. Esmaeili M., Bakhshi A., Soltani R. Comparative analysis of the behavior of reinforced and non-reinforced steel roof trusses using digital image correlation // Journal of Constructional Steel Research. 2019. Vol. 154. Pp. 20—32.
10. Голиков А. В., Терновой В. А., Габова В. В. Метод усиления решетчатых башен // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2022. Вып. 1(86). С. 18—32.
11. Haghghi A. R., Rahmani A. Numerical and experimental investigation of the behavior of steel roof trusses with and without strengthening // Thin-Walled Structures. 2018. Vol. 130. Pp. 238—248.
12. Kala Z. Sensitivity analysis of the lateral-torsional buckling resistance of steel beams // Engineering Structures. 2016. Vol. 124. Pp. 1—15.
13. Salehi H., Burgueño R. Emerging artificial intelligence methods in structural engineering // Engineering Structures. 2018. Vol. 171. Pp. 170—189.
14. Moharrami H., Louhghalam A., Tootkaboni M. Optimal reinforcement design of steel roof trusses // Engineering Structures. 2014. Vol. 81. Pp. 162—173.
15. Saedi Daryan A., Sheidaii M. R. Experimental and numerical investigation on the behavior of reinforced and non-reinforced steel roof trusses // Journal of Constructional Steel Research. 2013. Vol. 85. Pp. 81—88.
16. Zhu Z., Yan B. Numerical and experimental study on the behavior of steel roof trusses with and without strengthening // Journal of Constructional Steel Research. 2017. Vol. 137. Pp. 63—76.
17. Esmaeili M., Bakhshi A., Soltani R. Digital image correlation analysis of the behavior of reinforced and non-reinforced steel roof trusses // Journal of Constructional Steel Research. 2019. Vol. 154. Pp. 20—32.

© Саллум М., Аль Хаджаль А., Дегтярев Г. В., 2024

Поступила в редакцию
в сентябре 2024 г.

Ссылка для цитирования:

Саллум М., Аль Хаджаль А., Дегтярев Г. В. Сравнительный анализ цифровыми технологиями напряжений в верхнем поясе фермы с каркасом усиления и без усиления // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2024. Вып. 4(97). С. 74—84. DOI: 10.35211/18154360_2024_4_74.

Об авторах:

Саллум Модар — аспирант, Кубанский государственный аграрный университет им. И. Т. Трубилина. Российская Федерация, 350044, г. Краснодар, ул. Калинина, 13; modar.salloum29.23.14.27@gmail.com

Аль Хаджаль Ахмед — ассистент, Кубанский государственный аграрный университет им. И. Т. Трубилина. Российская Федерация, 350044, г. Краснодар, ул. Калинина, 13; alhajalahmed@mail.ru

Дегтярев Георгий Владимирович — д-р техн. наук, проф. каф. архитектуры, Кубанский государственный аграрный университет им. И. Т. Трубилина. Российская Федерация, 350044, г. Краснодар, ул. Калинина, 13; degtyarev.g.v@mail.ru

Modar Salloum, Ahmed Al Hajal, Georgy V. Degtyarev

Trubilin Kuban State Agrarian University

**COMPARATIVE ANALYSIS OF DIGITAL TECHNOLOGIES OF STRESS
IN THE UPPER PLATE OF A TRUSS
WITH AND WITHOUT REINFORCEMENT FRAMEWORK**

This article analyzes the strengthening of a reinforced concrete truss with an external channel frame proposed by the authors. Since the top chord is calculated as a compression element, the main attention is paid to the analysis of stress in the top chord. Stress analysis in the truss with a comparison of assumptions before and after amplification under symmetrical load in the nodes of the upper chord of the truss was carried out using digital technologies using the Lira-SAPR software product.

Key words: reinforced concrete truss, tension, reinforcement, Lira-SAPR, wxMaxima.

For citation:

Salloum M., Al Hajal A., Degtyarev G. V. [Comparative analysis of digital technologies of stress in the upper plate of a truss with and without reinforcement framework]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2024, iss. 4, pp. 74–84. DOI: 10.35211/18154360_2024_4_74.

About authors:

Modar Salloum — Postgraduate student, Trubilin Kuban State Agrarian University. 13, Kalinina st., Krasnodar, 350044, Russian Federation; modar.salloum29.23.14.27@gmail.com

Ahmed Al Hajal — Assistant, Trubilin Kuban State Agrarian University. 13, Kalinina st., Krasnodar, 350044, Russian Federation; alhajalahmed@mail.ru

Georgy V. Degtyarev — Doctor of Engineering Sciences, Trubilin Kuban State Agrarian University. 13, Kalinina st., Krasnodar, 350044, Russian Federation; degtyarev.g.v@mail.ru