

## Сравнительный анализ цифровыми технологиями моментов в железобетонной балке покрытия, усиленной швеллером или двутавром

*Г. В. Дегтярев, Аль Хаджаль Ахмад Сами, Саллум Модар Рауф*

*Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина*

**Аннотация:** Эффективное усиление балки покрытия, посредством сооружения вокруг нее обрамляющего каркаса, предполагает обоснованный выбор конструктива из сортамента металлопроката. Каркас создает с балкой покрытия единую систему посредством натяжных приспособлений, изменение усилий в которых обеспечивает управление состоянием. В статье к сравнительному исследованию предложен сопоставительный анализ моментов в каркасе из балки двутавровой и швеллера стального специального, как обладающих потенциально равными рабочими характеристиками. Исследования проведены на основе численного моделирования методом конечных элементов с применением программного продукта Etabs. Результатом эксперимента явились определенные во вновь образованной системе – балка покрытия плюс каркас – поперечные усилия и моменты от приложенных нагрузок и процента армирования балки при учете каркаса. Взятый за основу массив цифр, полученный в результате численного эксперимента, был обработан посредством цифрового математического анализа при использовании программного комплекса wxMaxima. Полученные математические модели процессов, происходящих в системах при их реализации посредством швеллера или двутавра, позволили на основе анализа установить степень влияния на момент в балке факторов принятых к исследованию, а также определить конструктивно-технологические параметры устройств, акцентировав внимание на эффективном.

**Ключевые слова:** железобетонная балка, усиление двутавром, усиление швеллером, момент, процент армирования, нагрузка, численный метод, математическая модель, сравнение результатов, программные комплексы Etabs и wxMaxima.

Ненормативная производственная деятельность, а в ряде случаев и боевые действия, как, например, в странах Ближнего Востока, приводят к механическому повреждению приопорных частей железобетонных балок покрытия. Восстановление их работоспособного состояния при возвращении несущей способности, исключаящей полную замену балки, является актуальной задачей в поиске экономически эффективного способа хозяйствования [1, 2]. В настоящее время предложен ряд конструктивно технологических решений по восстановлению работоспособного состояния железобетонных балок, анализ которых позволил акцентировать внимание на ряде недостатков, где основным является невозможность их реализации без

---

предварительной разгрузки балки [3, 4]. Предложены конструктивно-технологические решения, лишённые отмеченных недостатков: способ реконструкции и усиления приопорных частей железобетонных балок, а также устройство, его реализующее [5, 6].

На рис. 1 представлено устройство реконструкции и усиления приопорной части железобетонной балки.

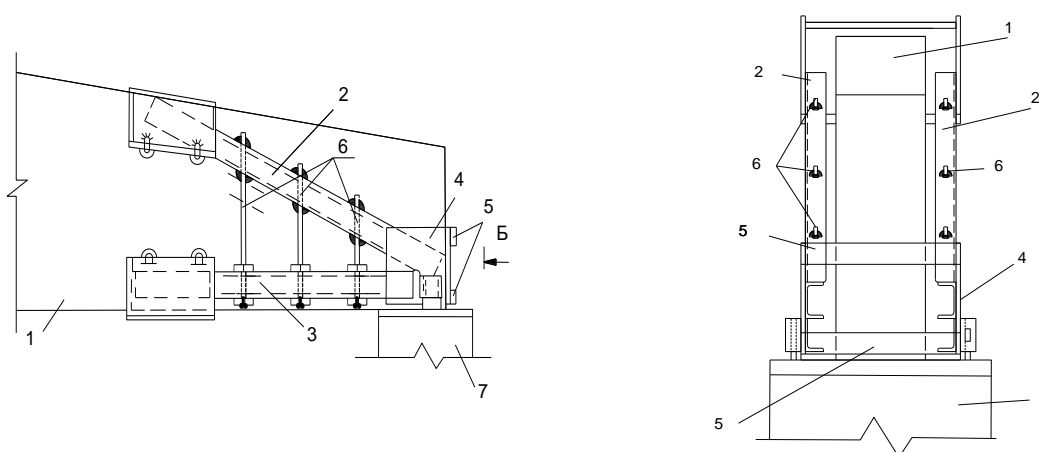


Рис. 1. – Устройство для усиления приопорных частей железобетонных балок покрытия (1 – железобетонная балка; 2 и 3 – стержневые элементы; 4 – опорные пластины; 5 – планки; 6 – натяжные приспособления; 7 – колонна)

На рис. 2 даны сечения по железобетонной балке покрытия с каркасом из двутавра, а на рис. 3 – из швеллера, рассматриваемые при исследованиях.

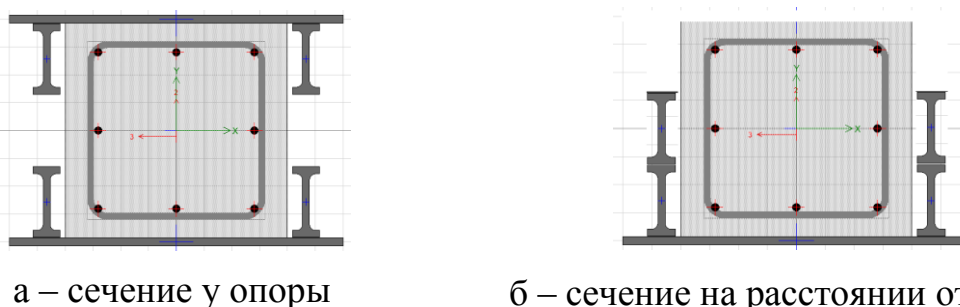


Рис. 2. – Сечения по железобетонной балке покрытия с каркасом из двутавра

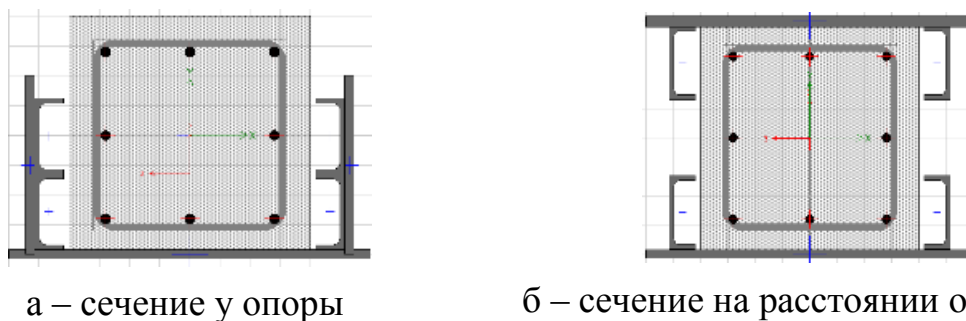


Рис. 3. – Сечения по железобетонной балке покрытия с каркасом из швеллера

С целью оценки эффективности работы каркаса усиления железобетонной балки покрытия из двутавра или швеллера, первоначально был реализован численный эксперимент в программе *Etabs* [7, 8]. Численное моделирование выполнено при дискретном увеличении сосредоточенных нагрузок  $F1$  и  $F2$  от 6 до 21 т с шагом 0,5 т, действующих на балку длиной  $L = 6$  м на расстоянии  $1/4$  пролета от каждой опоры [9]. Локальный процент армирования балки с учетом каркаса для швеллера составлял от 13 до 17 %, а для двутавра этот показатель изменялся от 15 до 16 %. Полученные в результате рассмотренного состояния системы значения по максимальным моментам в железобетонной балке покрытия, усиленной каркасом из швеллера С 4х7.25, при суммарном воздействии на балку 15 т представлены на рис. 4, а усиленной каркасом их двутавра М 4х6 при суммарном воздействии на балку 14 т – на рис. 5.

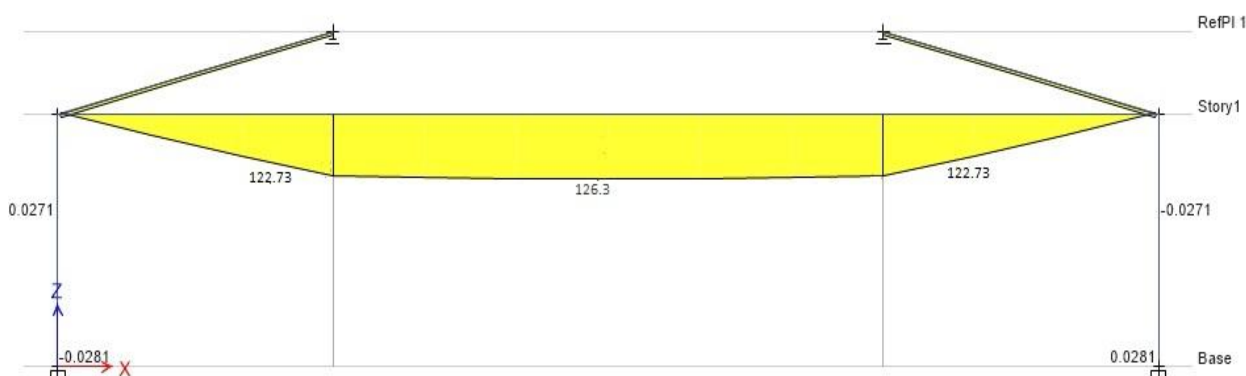


Рис. 4. – Расчетная эпюра моментов (кН · м) в балке, усиленной швеллером

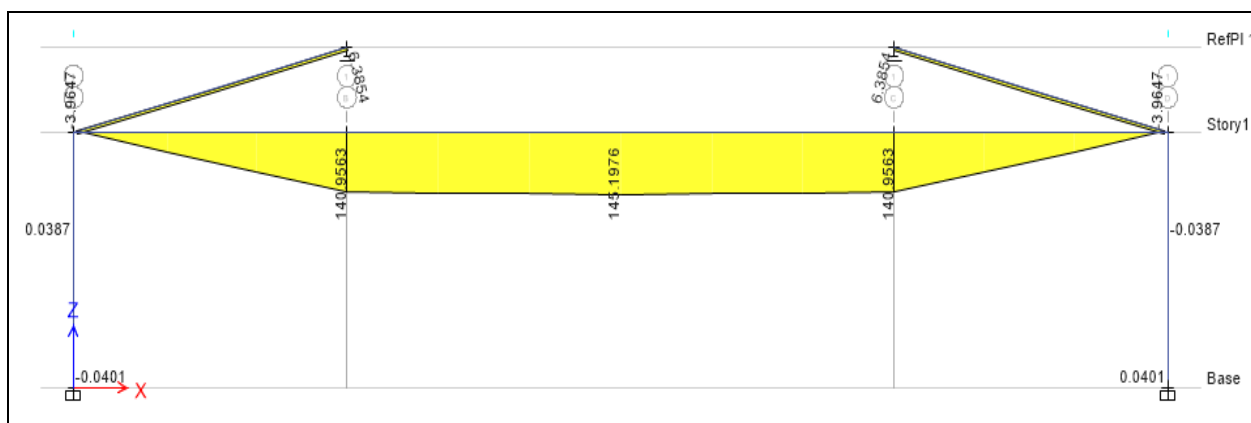


Рис. 5. – Расчетная эпюра моментов (кН · м) в балке, усиленной двутавром

Моменты в балке (кН · м), усиленной швеллером или двутавром, в численном эксперименте были взяты за функцию отклика  $Z = f(x, y)$ , где  $x$  – приложенные нагрузки (т), а  $y$  – процент армирования балки с учетом усиливающего каркаса (%).

На основе массива экспериментальных данных в программном комплексе *wxMaxima* используя файл: *s: lsquares estimates M, [x, y, z]* были получены аппроксимационные уравнения, представленные в виде полиномов, отдельно для швеллера и для двутавра [10, 11]. Канонический вид модели, параметры которой оцениваются, следующий:

$$Z = a + b \times x + c \times y + d \times x \times y + e \times x^2 + f \times y^2. \quad (1)$$

Параметры, включающие названия критериев, для которых отыскиваются оценки, следующие –  $[a, b, c, d, e, f]$ .

В окончательном виде математические модели процессов для швеллера и двутавра сведены в таблицу № 1, при этом модели доведены до уровня адекватности, что предполагает возможность построения поверхностей отклика вида  $3d$  для чего в программе *wxMaxima* использован файл *wxplot3d*.

Визуализация поверхностей функций отклика  $Z = f(x, y)$ , посредством цветового кодирования результатов, представлена на рис. 6 для швеллера, а для двутавра - на рис. 7.

Таблица № 1

Математические модели процессов для швеллера и двутавра

| Конструктивный элемент каркаса | Математическая модель процесса  |
|--------------------------------|---|
| Швеллер                        | $Z(x, y) = 217,065 - 23,46 \cdot x - 0,876 \cdot y - 0,039 \cdot x \cdot y + 0,783 \cdot x^2 + 0,182 \cdot y^2$   |
| Двутавр                        | $Z(x, y) = -146,722 + 23,301 \cdot x + 1,274 \cdot y - 0,205 \cdot x \cdot y - 0,693 \cdot x^2 + 0,186 \cdot y^2$ |

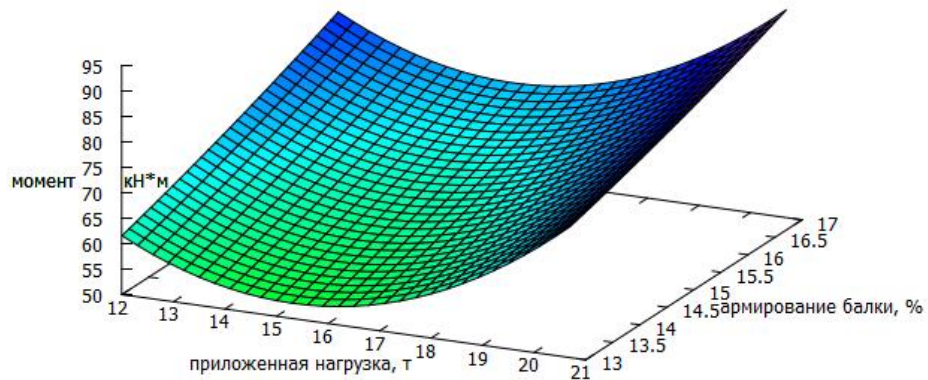


Рис. 6. – Визуализация поверхности функции отклика  $Z = f(x, y)$ , посредством цветового кодирования результатов для швеллера

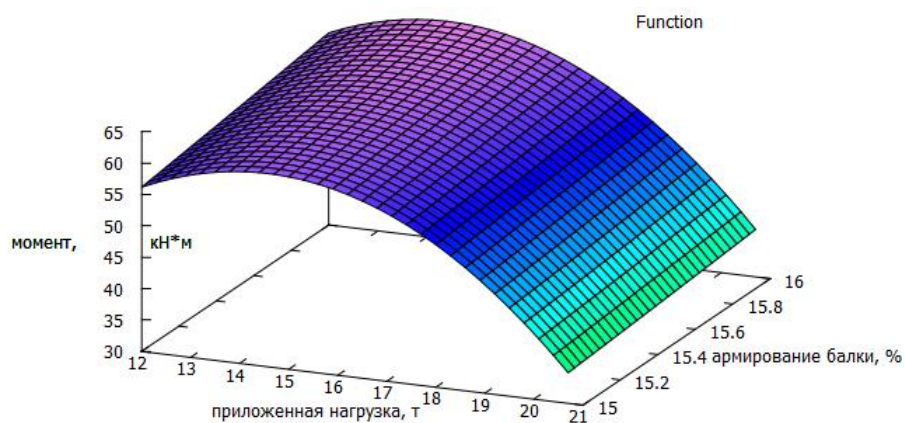


Рис. 7. – Визуализация поверхности функции отклика  $Z = f(x, y)$ , посредством цветового кодирования результатов для двутавра

Для оценки степени влияния принятых к исследованию факторов на моменты в балках покрытия, усиленных каркасом из швеллера или двутавра, построены линии равных уровней по функции отклика  $Z = f(x, y)$ , а далее и сечения по ним [12].

Результатом данных расчетов явились нижеследующие линии равных уровней, представленные на рис. 8.

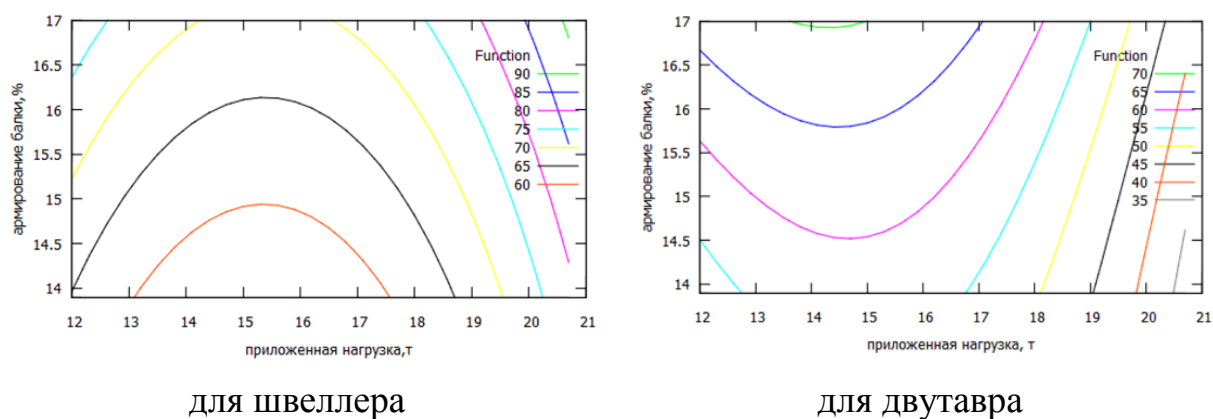


Рис. 8. – Линии равных уровней по функции отклика  $Z = f(x, y)$

Анализ линий равных уровней позволяет констатировать, что экстремальные значения моментов в балках покрытия, усиленных каркасом, находятся в пределах значений аргументов, принятых к исследованию [13, 14]. При этом, при усилении балки швеллером, значения функции изменяются от 60 до 90 кН·м, а экстремумы находятся на максимуме. При усилении балки двутавром, значения функции изменяются от 35 до 70 кН·м, а экстремумы находятся на минимуме.

Для определения степени влияния приложенной нагрузки на моменты в балках, усиленных каркасом из швеллера и двутавра, в математических моделях соответствующих процессов взяты постоянными проценты армирования, что позволило преобразовать уравнения до следующего вида:

$$\text{для швеллера при } F(x, 13) = 0,7828 \cdot x^2 - 23,9631 \cdot x + 236,3963; \quad (2)$$

$$\text{при } F(x, 15) = 0,7828 \cdot x^2 - 24,0405 \cdot x + 244,8243; \quad (3)$$

$$\text{при } F(x, 17) = 0,7828 \cdot x^2 - 24,1179 \cdot x + 254,7067; \quad (4)$$

для двутавра при  $F(x, 15) = -0,6921 \cdot x^2 + 20,2211 \cdot x - 86,7115$ ;  
(5)

при  $F(x, 15,5) = -0,6931 \cdot x^2 + 20,11845 \cdot x - 83,3022$ ; (6)

при  $F(x, 16) = -0,6931 \cdot x^2 + 20,0158 \cdot x - 79,802$ .  
(7)

На рис. 9 представлены визуализированные сечения по линиям равных уровней при постоянном проценте армирования системы для швеллера и для двутавра, в соответствии с выше представленными уравнениями.

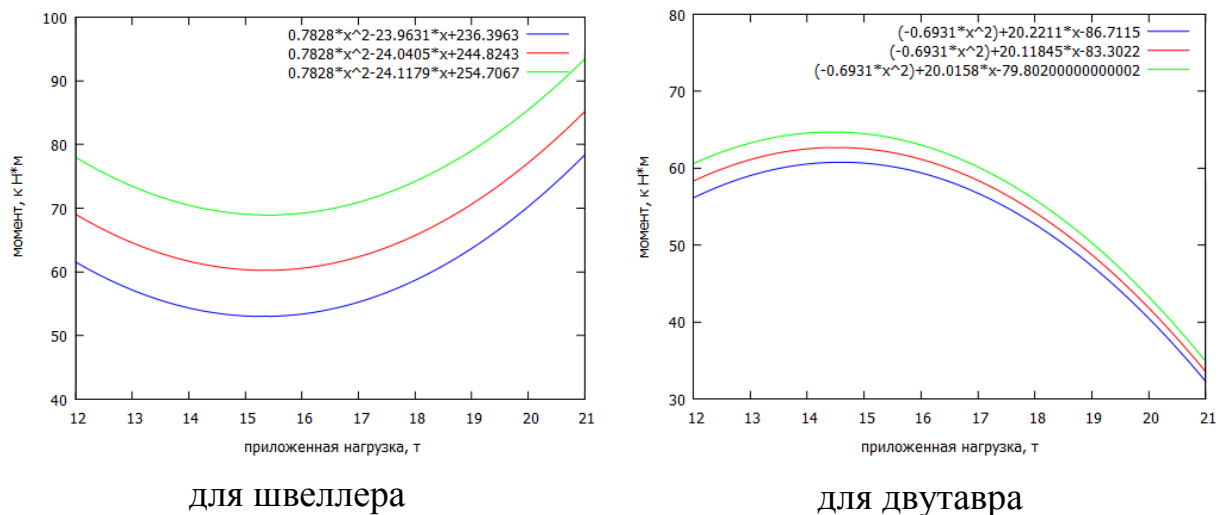


Рис. 9. – Сечения по линиям равных уровней при постоянном проценте армирования

Для швеллера минимальное значение момента в балке покрытия, равное 53,01 кН · м будет при наименьшем проценте армирования в 13 %, при армировании в 15 %, момент равен 60,28 кН · м, а при армировании в 17 % – 68,85 кН · м. Таким образом явно прослеживается тенденция, что с увеличением процента армирования увеличивается момент в балке, при этом экстремальные значения функции будут при приложенной нагрузке – порядка 15 т.

Для двутавра максимальное значение момента в балке покрытия, равное 64,63 кН · м будет при наибольшем проценте армирования в 16 %, при

армировании 15,5 % момент равен 62,61 кН · м, а при армировании в 15 % – 60,75 кН · м. Таким образом, явно прослеживается тенденция, что с уменьшением процента армирования, уменьшаются моменты в балке. При этом экстремальные значения функция имеет при приложенной нагрузке порядка 14,5 т, а с увеличением приложенной нагрузки нивелируется разность в значениях моментов при различной степени армирования балки.

Для определения степени влияния армирования на моменты в балках, усиленных каркасом из швеллера и двутавра, в математических моделях соответствующих процессов взяты постоянными приложенные нагрузки, что позволило преобразовать уравнения до следующего вида:

$$\text{для швеллера при } F(12, y) = 0,182 \cdot y^2 - 1,341 \cdot y + 48,268; \quad (8)$$

$$\text{при } F(16, y) = 0,182 \cdot y^2 - 1,496 \cdot y + 42,102; \quad (9)$$

$$\text{при } F(21, y) = 0,182 \cdot y^2 - 1,689 \cdot y + 69,620; \quad (10)$$

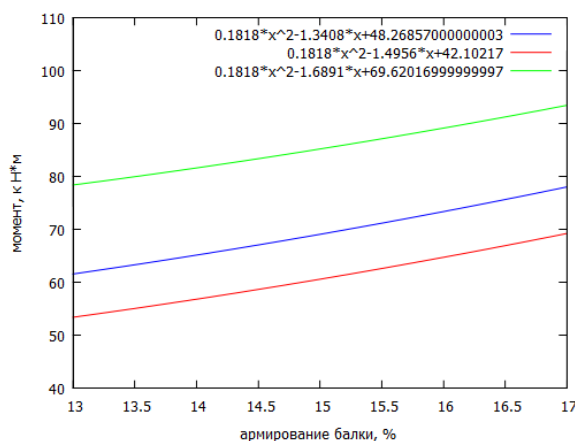
$$\text{для двутавра при } F(12, y) = 0,182 \cdot y^2 - 1,186 \cdot y + 33,098; \quad (11)$$

$$\text{при } F(16, y) = 0,182 \cdot y^2 - 2,006 \cdot y + 48,686; \quad (12)$$

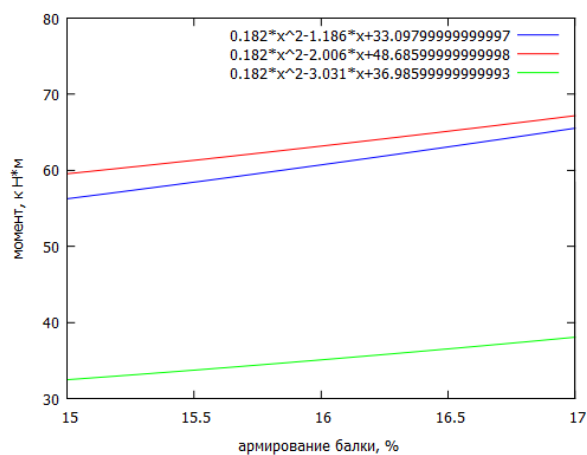
$$\text{при } F(21, y) = 0,182 \cdot y^2 - 3,031 \cdot y + 36,986. \quad (13)$$

На рис. 10 представлены визуализированные сечения по линиям равных уровней при постоянных приложенных нагрузках на систему для швеллера и для двутавра, в соответствии с выше представленными уравнениями.





для швеллера



для двутавра

Рис. 10. – Сечения по линиям равных уровней  
при постоянных приложенных нагрузках

Для швеллера зависимость момента в балке от ее армирования линейна. Наименьший момент в балке 53,26 кН·м имеется при среднем значении приложенной нагрузки в 16 т и наименьшем проценте армирования балки равном 13 %. При этой же нагрузке наибольший момент будет при армировании в 17 %, и он составит 69,35 кН·м. При наименьшей постоянной нагрузке на балку в 12 т и наименьшем проценте ее армирования, равном 13 %, момент будет равен 61,52 кН·м, тогда как при армировании в 17 % момент составит 78,05 кН·м. При наибольшей постоянной нагрузке на балку в 21 т при наименьшем проценте ее армирования, равном 13 %, момент будет равен 78,48 кН·м, тогда как при армировании в 17 % момент составит 93,49 кН·м.

Для двутавра зависимость момента от армирования линейна. Наименьший момент в балке 32,48 кН·м имеется при наименьшем проценте армирования балки, равном 15 % и наибольшей приложенной нагрузке в 21 т. При этой же нагрузке наибольший момент будет при армировании в 17 %, и он составит 38,08 кН·м. Момент в балке при наименьшей приложенной нагрузке в 12 т больше, чем момент при более высокой нагрузке, составляющей 16 т, и соответственно если процент армирования 15 %, то в

первом случае момент равен 56,25 кН · м, а во втором случае – 59,51 кН · м, тогда как при армировании в 17 % моменты, соответственно, будут равны 65,56 кН · м и 67,12 кН · м.

Представленные уравнения и графики позволяют констатировать, что выполнение каркаса усиления балки из швеллера и двутавра обеспечивают разные моменты в балке и процессы их изменения.

Для каркаса из швеллера при любом проценте армирования балки в исследуемом диапазоне от 13 % и до 17 % имеются минимальные значения моментов при приложенной нагрузке в 15 т. Таким образом, любое изменение нагрузки, как в сторону уменьшения, так и в сторону ее увеличения от значения в 15 т будет обеспечивать увеличение моментов в балке при любом проценте ее армирования.

Для каркаса из двутавра при тех же значениях армирования балки имеются максимальные значения моментов при приложенной нагрузке в районе 14,5 т. Таким образом, любое изменение приложенной нагрузки, как в сторону уменьшения, так и в сторону ее увеличения от значения в 14,5 т, будет обеспечивать уменьшение моментов в балке при любом проценте ее армирования.

### Литература

1. Абдразаков Ф. К., Орлова С. С., Панкова Т. А., Миркина Е. Н., Федюнина Т. В. Мониторинг состояния гидротехнических сооружений // Журнал перспективных исследований в области динамических и управляющих систем. 2018. Т. 10. № 13. С. 1952-1958.
2. Волосухин В. А., Бандурин М. А., Винокуров А. А. Обоснование рациональных параметров покрытия зданий и сооружений: монография. Ростов-на-Дону: Южный федеральный университет, 2021. 272 с.

3. Сайда С. К., Дегтярев В. Г. Аспекты теории сопротивления бетона, усиленного композитной арматурой // Труды Кубанского государственного аграрного университета. 2014. № 48. С. 183-188.
  4. Бандурин М. А. Особенности технической диагностики длительно эксплуатируемых водопроводящих сооружений // Инженерный вестник Дона. 2012, № 2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2012/861](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2012/861).
  5. Дегтярев Г. В., Дегтярев В. Г., Дегтярева О. Г., Коженко Н. В., Дацьо Д. А. Моделирование и расчет железобетонных конструкций здания в программном комплексе STARK ES: учебник. Краснодар: КубГАУ, 2018. 188 с.
  6. Любарский Н. Н., Лейер Д. В., Серый Д. Г. Оценка влияния моделей грунта на результаты расчетов удерживающих сооружений на оползневом участке автомобильной дороги г. Сочи // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. 2022. № 2 (57). С. 45-53.
  7. Khashirova T. Yu., Ksenofontov A. S., Edgulova E. K., Lamerdonov Z. G., Nartokov H.S. Information Technologies at the Choice of an Optimum Bank Protection Structures for Highways in Emergency Situations / Proceedings of the 2018 International Conference «Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies»). – 2018. – P. 656-658.
  8. Degtyareva O. G., Vasiliev S. M. The base soil local sagging zones' influence assessment on the water retaining structure's operability // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Т. 913. №. 2. P. 022055.
  9. Khashirova T. Y., Olgarenko I. V., Kozhenko N. V. The influence analysis of the structures and applied software systems' soil foundations design models //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Т. 913. №. 2. P. 022050.
-

10. Эдгулова Е. К., Хаширова Т. Ю., Ламердонов З. Г., Денисенко В. А., Москаленко Л. А. Распараллеливание алгоритма классификации сложных систем // Качество. Инновации. Образование. 2018. № 6 (157). С. 147-151.

11. Бандурин М. А. Проблемы оценки остаточного ресурса длительно эксплуатируемых водопроводящих сооружений // Инженерный вестник Дона. 2012, № 3 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2012/891.

12. Olgarenko V. I., Olgarenko I. V. Technical condition diagnostics of the water supply facilities in the irrigation systems //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Т. 698. №. 2. P. 022060.

13. Бандурин М. А., Ванжа В. В., Пасниченко П. Г., Долобешкин Е. В., Сульженко Е. Е. Регулируемая конструкция фермы. Патент на изобретение № 2770026. Бюл. № 11. Оpubл. 14.04.2022.

14. Degtyareva O. G., Degtyarev G. V., Lavrov N. P., Aliev D. U. Constructive-technological decisions in regulating the flow of atmospheric precipitation // Инженерно-строительный журнал. 2018. № 6(82). С. 32-48.

### References

1. Abdrazakov F. K., Orlova S. S., Pankova T. A., Mirkina E. N., Fedjunina T. V. Zhurnal perspektivnyh issledovaniy v oblasti dinamicheskikh i upravljajushhih sistem. 2018. Т. 10. № 13. pp. 1952-1958.

2. Volosuhin V. A., Bandurin M. A., Vinokurov A. A. Obosnovanie racional'nyh parametrov pokrytija zdaniy i sooruzhenij: monografija. [Justification of Rational Parameters of Covering Buildings and Structures: Monograph]. Rostov-na-Donu: Juzhnyj federal'nyj universitet, 2021. 272 p.

3. Sajda S. K., Degtyarev V. G. Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2014. № 48. pp. 183-188.

4. Bandurin M. A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2012, № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2012/861.

5. Degtyarev G. V., Degtyarev V. G., Degtyareva O. G., Kozhenko N. V., Dac'o D. A. Modelirovanie i raschet zhelezobetonnyh konstrukcij zdaniya v programmnom komplekse STARK ES [Modeling and calculation of reinforced concrete structures of a building in the STARK ES software package]: uchebnik. Krasnodar: KubGAU, 2018. 188 p.

6. Ljubarskij N. N., Lejer D. V., Seryj D. G. Prirodnye i tehnogennye riski. Bezopasnost' sooruzhenij. 2022. № 2 (57). pp. 45-53.

7. Khashirova T. Yu., Ksenofontov A. S., Edgulova E. K., Lamerdonov Z. G., Nartokov H. S. Proceedings of the 2018 International Conference «Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies». 2018. pp. 656-658.

8. Degtyareva O. G., Vasiliev S. M. The base soil local sagging zones' influence assessment on the water retaining structure's operability. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. T. 913. №. 2. P. 022055.

9. Khashirova T. Y., Olgarenko I. V., Kozhenko N. V. The influence analysis of the structures and applied software systems' soil foundations design models. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. T. 913. №. 2. P. 022050.

10. Jedgulova E. K., Hashirova T. Ju., Lamerdonov Z. G., Denisenko V. A., Moskalenko L. A. Kachestvo. Innovacii. Obrazovanie. 2018. № 6 (157). pp. 147-151.

11. Bandurin M. A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2012, № 3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2012/891](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2012/891).

12. Olgarenko V. I., Olgarenko I. V. Technical condition diagnostics of the water supply facilities in the irrigation systems. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. T. 698. №. 2. P. 022060.

---



13. Bandurin M. A., Vanzha V. V., Pasnichenko P. G., Dolobeshkin E. V., Sul'zhenko E. E. Reguliruemaja konstrukcija fermy. [Adjustable truss design]. Patent na izobretenie № 2770026. Bjul. № 11. Opubl. 14.04.2022.

14. Degtyareva O. G., Degtyarev G. V., Lavrov N. P., Aliev D. U. Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal. 2018. № 6(82). pp. 32-48.