

## Исследование цифровыми технологиями поперечной силы в железобетонной балке покрытия, усиленной швеллером

*Г. В. Дегтярев, Аль Хаджаль Ахмад Сами*

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

**Аннотация:** В работе предложено конструктивно-технологическое решение обустройства каркаса из швеллера вокруг балки покрытия. При этом элементы каркаса с помощью специально установленных тяговых кронштейнов могут подвергаться управляемому воздействию в виде перенапряжения в них. Исследование проведено с использованием технологий на основе численного моделирования. В предложенной расчетной модели произведено изменение площади армирования балки за счет устройства каркаса усиления. При помощи программного комплекса Etabs, используя метод конечных элементов, производился расчет поперечных сил и моментов во вновь образованной системе – балка плюс каркас из швеллера. Также рассмотрен вопрос влияния каркаса на поперечную силу в балке. С использованием математического моделирования, получена модель процесса усиления балки каркасом из швеллера и сделан последовательный анализ математической модели, позволивший определить конструктивные размеры устройства и его технологические параметры.

**Ключевые слова:** железобетонная балка, усиление, швеллер, армирование, поперечная сила, нагрузка, численный метод, математическое моделирование, численное моделирование, математическая модель, программный комплекс Etabs.

Восстановление приопорных частей железобетонных балок покрытия является актуальной задачей в поиске экономически эффективного способа возвращения им их несущей способности. Проведенный анализ потери несущей способности рассматриваемых балок позволил констатировать, что для Сирийской Арабской Республики она вызвана механическими повреждениями, во многих случаях связанными с боевыми действиями. Анализ существующих конструктивно-технологических решений показал наличие таких недостатков, как многостадийность при решении вопроса, конструктивная избыточность, сложность при реализации и ряд других, что и предопределило необходимость разработки нового конструктивного и технологического решения.

Решение задач, связанных с определением напряженно-деформированного состояния сложных конструкций, наиболее рационально с

---

точки зрения как трудозатрат, так и материально-денежных ресурсов, выполнять численными методами, предполагающими создание математических моделей исследуемых процессов, полученных в результате численного эксперимента [1, 2].

Построение математической модели базируется на абстрагировании от конкретной природы явлений или изучаемого объекта-оригинала и состоит из двух этапов – создание качественной, а затем и количественной модели [3, 4].

Сам процесс математического моделирования заключается в проведении серии вычислительных экспериментов на компьютере, целью которых является анализ, интерпретация и сопоставление результатов моделирования с реальным поведением изучаемого объекта или с предварительной информацией, имеющейся в открытом доступе по данному вопросу, а также собственных исследований [5].

С целью анализа влияния на напряженно-деформированное состояние усиления швеллером оппорной части железобетонной балки покрытия было осуществлено моделирование в программном комплексе *wxMaxima* [6]. Моделирование выполнено на специально разработанном устройстве, где с двух сторон балки устанавливаются разгружающие кронштейны в виде пары стержневых элементов, образующих острый угол, как показано на рис. 1. Каждый конец стержневых элементов, расположенных горизонтально, соединяется с нижней частью балки, а каждый конец стержневых элементов, расположенных под острым углом, с верхней частью балки. Противоположные концы стержневых элементов объединены опорными пластинами, расположенными с обеих сторон балки и соединены планками. Между стержневыми элементами зеркально с обеих сторон установлены соединенные с ними дополнительные натяжные приспособления, выполненные в виде анкеров: жестко – с верхним элементом и гибко – через

---

резьбовое соединение с нижним элементом, причем стержневые элементы жестко соединены с верхней и нижней частями железобетонной балки.

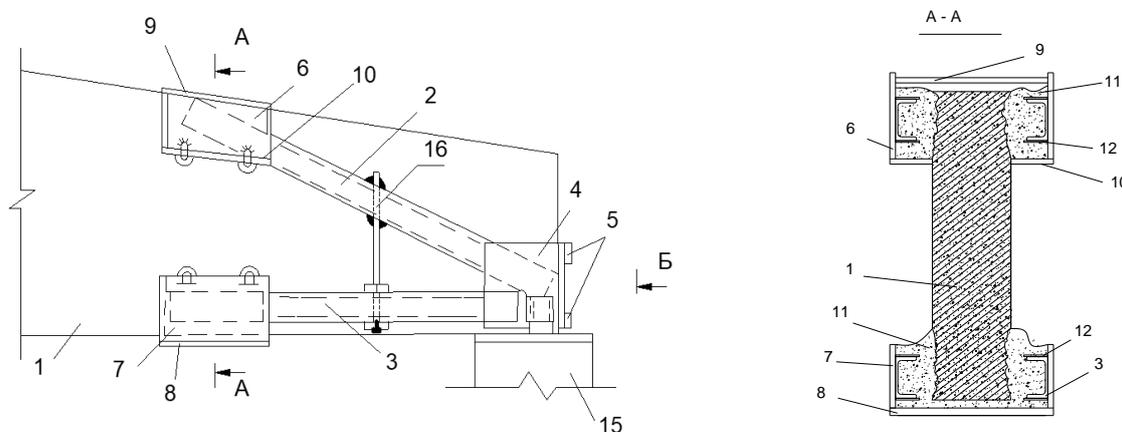


Рис. 1. – Виды схем усиления приопорной части железобетонной балки покрытия швеллером (1 – железобетонная балка; 2 и 3 – стержневые элементы; 4 – опорные пластины; 5 – планки; 15 – колонна; 16 – натяжные приспособления)

С целью анализа влияния разгружающих кронштейнов в виде пар стержневых элементов из стальных швеллеров, установленных на балку с параллельными поясами квадратного сечения, на работу ее приопорных частей, было вначале осуществлено численное моделирование в программном комплексе *Etabs* 2019 [7]. На рис. 2 представлены сечения принятой к расчету железобетонной балки длиной  $L = 6$  м.

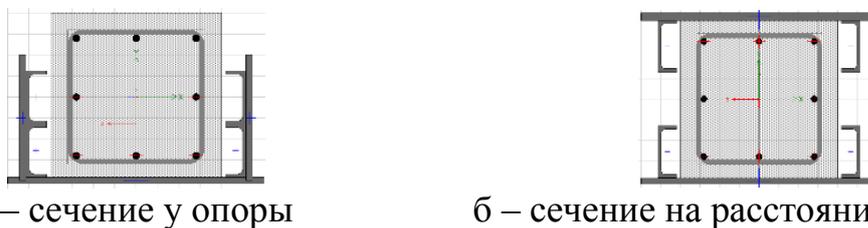


Рис. 2. – Сечения по принятой в расчет железобетонной балки

В результате численного моделирования, реализованного при скачкообразном увеличении сосредоточенных нагрузок  $F1$  и  $F2$ , действующих на расстоянии четверти пролета от каждой опоры были получены значения поперечных сил, представленные на рис. 3 [8, 9].

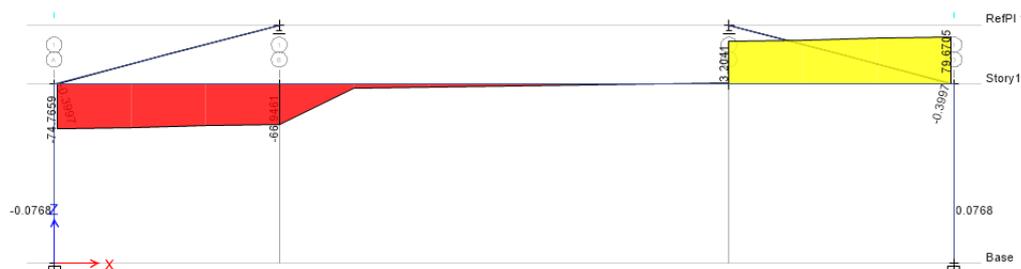


Рис. 3. – Эпюры поперечных сил в балке ( $kN$ ), усиленной швеллером, при разных сосредоточенных усилиях

Поперечная сила в балке ( $kN$ ), усиленной швеллером, в эксперименте была взята за функцию отклика  $Z = f \times (x, y)$ , где  $x$  – приложенные нагрузки, (Т), а  $y$  – процент армирования фермы с учетом усиливающего каркаса (%).

В расчетном комплексе *wxMaxima* была получена математическая модель процесса, взятая из численного эксперимента [10]. Аппроксимационное уравнение представлено в виде полинома, полученного при реализации файла *s:lsquares\_estimates M, [x, y, z]*. Модель, параметры которой оцениваются, имеет вид:

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

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

Окончательно математическая модель процесса имеет вид:

$$Z(x, y) = -380,2507 + 50,9176 \times x + 3,0911 \times y - 0,1918 \times x \times y - 0,0651 \times x^2 - 0,0193 \times y^2. \quad (2)$$

Адекватная математическая модель дает возможность построения поверхности отклика вида  $3d$ , для чего в программе *wxMaxima* воспользовались файлом *wxplot3d*. Визуализация поверхности функции отклика  $Z = f \times (x, y)$  представлена на рис. 4.

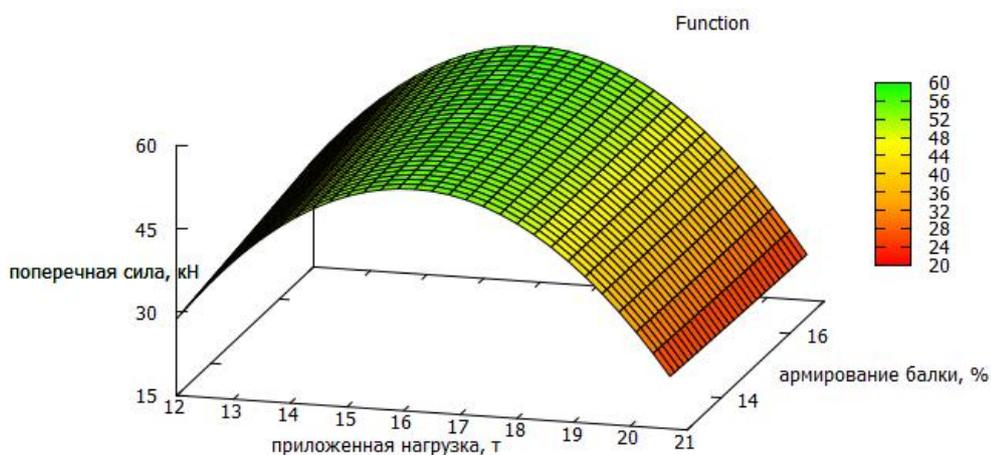


Рис. 4. – Визуализация поверхности функции отклика  $Z = f \times (x, y)$

Анализ поверхности функции отклика  $Z = f \times (x, y)$  позволяет видеть, что принятые к исследованию факторы, такие, как приложенные нагрузки  $X$  (т) на расстоянии  $L/4$  (м), а также процент армирования усиливающего каркаса, значимо влияют на функцию отклика – поперечную силу ( $max$ ) в балке ( $kN$ ). Вид поверхности и цвета однозначно указывают на наличие экстремальных величин функции отклика  $Z = f \times (x, y)$  при определенном силовом воздействии на балку покрытия, в отличие от влияния процента армирования. Однако детально и в реальных цифрах изменения диапазона по аргументам, развитие процесса влияния на работу устройства усиления швеллером приопорной части железобетонной балки покрытия можно будет видеть при построении линий уровня по функции отклика  $Z = f \times (x, y)$  и сечений по ним.

Получение линий уровня по поверхности функции отклика  $Z = f \times (x, y)$  в ПО *wxMaxima* реализуется посредством файла *contour\_plot*, результатом чего явились нижеследующие графики, представленные на рис. 5.

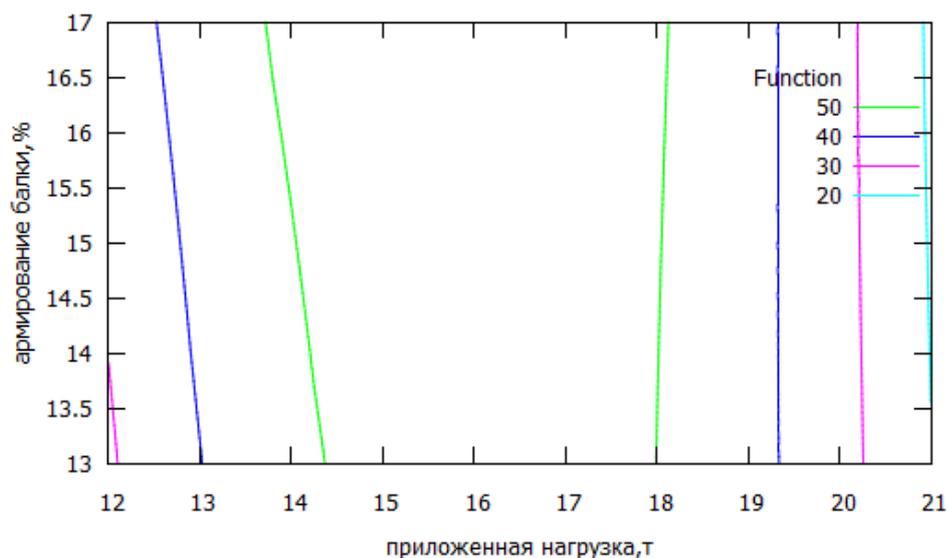


Рис. 5. – Линии уровня по поверхности функции отклика  $Z = f \times (x, y)$

Анализ линий уровня по функции поверхности отклика  $Z = f \times (x, y)$  позволяет констатировать, что на графике визуализированы значения функции от 20 до 50 кН. При этом в диапазоне изменения аргумента  $F$  (т) приложенной нагрузки от 12 до 21 тонны значение функции отклика  $Z$  проходит экстремальное значение при постоянных значениях процента армирования балки:  $F(x, 13)$ ;  $F(x, 15)$ ;  $F(x, 17)$ , тогда как при постоянных значениях приложенной нагрузки  $F(12, y)$ ;  $F(16, y)$ ;  $F(21, y)$  во всем диапазоне изменения аргумента процента армирования балки его влияние линейно.

Для исследования влияния на функцию отклика принятых аргументов необходимо рассмотреть сечения по представленным линиям уровня по функции отклика, при постановке вначале одних аргументов на постоянный уровень, а затем других.

Рассмотрим сечение линий уровня по функции отклика при постоянных приложенных нагрузках  $F(12, y)$ ;  $F(16, y)$ ;  $F(21, y)$ , позволивших получить нижеследующие уравнения:

$$F_1(x) = 0,0193 \times x^2 + 0,7895 \times x + 15,2933; \quad (3)$$

$$F_2(x) = 0,0193 \times x^2 + 0,0223 \times x + 51,3781; \quad (4)$$

$$F_3(x) = 0,0193 \times x^2 - 0,9367 \times x + 29,1506. \quad (5)$$

По полученным уравнениям построены графики сечений по линиям уровня, при постоянных приложенных нагрузках, представленные на рис. 6, где был использован файл *plot2d*.

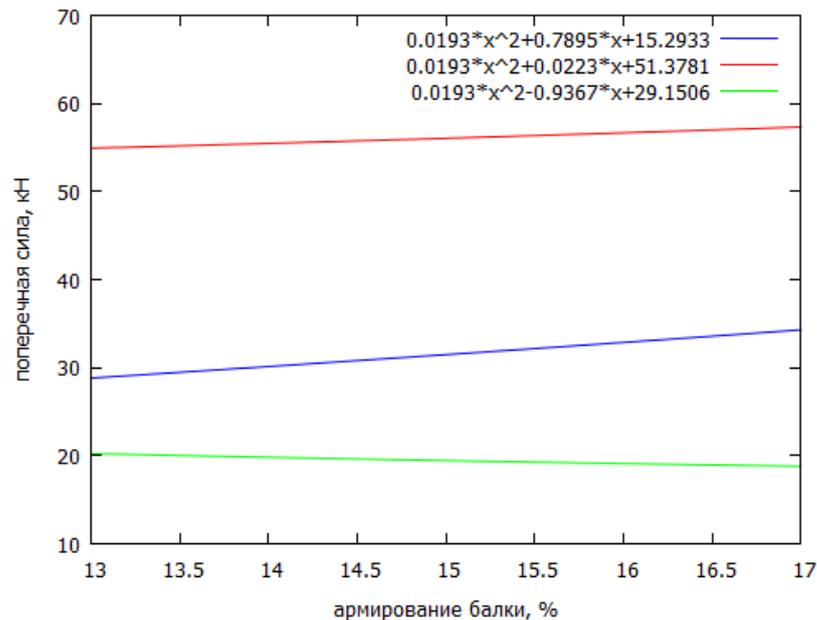


Рис. 6. – Графики сечений по линиям уровня при постоянных приложенных нагрузках 12, 16 и 21 т для каркаса из швеллера

Анализируя графики, констатируем, что при постоянных нагрузках в 12 и 16 т с увеличением процента армирования балки поперечная сила в ней увеличивается, тогда как при нагрузке в 21 т с увеличением процента армирования балки поперечная сила в ней уменьшается. В действительных цифрах результаты приведены в таблице № 1.

Анализ данных таблицы и рис. 6 позволяет заключить, что наибольшие значения поперечной силы в балке возникают при постоянной приложенной нагрузке в 16 т, тогда как и увеличение нагрузки до 21 т, и ее уменьшение до 12 т ведут к уменьшению поперечной силы.

Таблица № 1

Значения поперечной силы от приложенной нагрузки и процента армирования балки

Приложенная нагрузка, т	Армирование, %	Поперечная сила, кН
12	13	29,0
	17	34,4
16	13	54,9
	17	57,3
21	13	20,0
	17	18,8

Для исследования влияния приложенной нагрузки на балку покрытия с учетом каркаса усиления из швеллера при следующих постоянных процентах армирования:  $F(x, 13)$ ;  $F(x, 15)$ ;  $F(x, 17)$  были получены уравнения, которые имеют вид:

$$F_1(x) = -1,4963 \times x^2 + 48,4242 \times x - 336,8047; \quad (6)$$

$$F_2(x) = -1,4963 \times x^2 + 48,0406 \times x - 329,5417; \quad (7)$$

$$F_3(x) = -1,4963 \times x^2 + 47,657 \times x - 322,1243. \quad (8)$$

По полученным уравнениям построены графики сечений по линиям уровня, представленные на рис. 7, для чего воспользовались файлом *plot2d*.

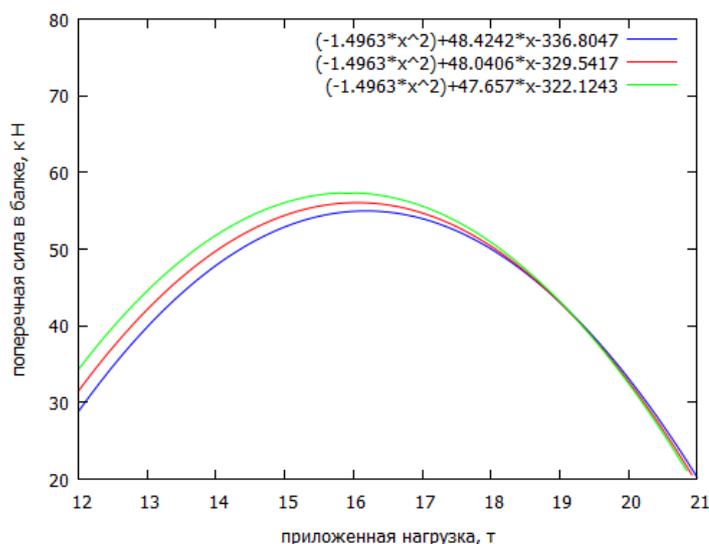


Рис. 7. – Графики сечений по линиям уровня при постоянных процентах армирования балки 13, 15 и 17 %

Анализ представленных графиков и уравнений позволяет констатировать:

- с увеличением процента армирования балки, усиленной каркасом из швеллера, поперечная сила в балке увеличивается в диапазоне увеличения приложенной нагрузки от 12 и до 18 %, далее влияние процента армирования балки не наблюдается;
- чем больше процент армирования балки, усиленной каркасом из швеллера, тем больше поперечная сила в ней;
- максимумы поперечной силы: при армировании балки в 13 % – 54,8 кН; при армировании балки в 15 % – 56,0 кН; при армировании балки в 17 % – 57,3 кН;
- при приложенной нагрузке к балке, начиная с 18,5 и до 21 тонны, процент ее армирования практически не оказывает никакого влияния на поперечную силу в ней.

Анализируя графики и уравнения, представленные выше, отмечаем, что при постоянных приложенных нагрузках к балке, армированной каркасом из швеллера, величина поперечной силы линейно зависит от ее армирования, тогда как при постоянном проценте армирования балки поперечные силы имеют максимумы от приложенных нагрузок, хотя с некоторых значений и при дальнейшем увеличении нагрузок это влияние нивелируется.

Представленный метод математического анализа состояния поперечных сил в железобетонной балке покрытия, армированной каркасом из швеллера, показал достоверность результатов общефизическим принципам и позволил, исходя из полученных результатов, рекомендовать данное техническое средство в качестве устройства для реконструируемых конструктивных элементов производственных и сельскохозяйственных зданий.

---

## 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. 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.
3. 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. V. 698. №. 2. P. 022060.
4. 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.
5. 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. V. 913. №. 2. P. 022055.
6. 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.
7. Сайда С.К. Прочность изгибаемых железобетонных сечений без предварительного напряжения // Международный журнал экспериментального образования. 2012. № 11. С. 37-38.

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

9. Бандурин М.А. Особенности технической диагностики длительно эксплуатируемых водопроводящих сооружений // Инженерный вестник Дона. 2012, № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2012/861.

10. 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. V. 913. №. 2. P. 022050.

### References

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

2. 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. pp. 656-658.

3. Olgarenko V. I., Olgarenko I. V. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. V. 698. №. 2. P. 022060.

4. Degtyarev G.V., Degtyarev V.G., Degtyareva O.G., Kozhenko N.V., Dac'o D.A. Modelirovanie i raschet zhelezobetonyh 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.



5. Degtyareva O. G., Vasiliev S. M. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. V. 913. №. 2. P. 022055.
6. Degtyareva O.G., Degtyarev G.V., Lavrov N.P., Aliev D.U. Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal. 2018. № 6(82). pp. 32-48.
7. Sajda S.K. Mezhdunarodnyj zhurnal jeksperimental'nogo obrazovaniya. 2012. № 11. Pp.. 37-38.
8. Bandurin M.A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2012, № 3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2012/891](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2012/891).
9. Bandurin M.A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2012, № 2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2012/861](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2012/861).
10. Khashirova T. Y., Olgarenko I. V., Kozhenko N. V. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. V. 913. №. 2. P. 022050.