

МЕЛИОРАЦИЯ

УДК 628.147.1

АНАЛИЗ ЭЛЕМЕНТОВ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ВОДОВОДА ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ ПРИ РАБОТЕ В РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ

В. Г. Дегтярев, кандидат технических наук

О. Г. Дегтярева, доктор технических наук

Н. В. Коженко, кандидат технических наук

*Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина,
г. Краснодар, Россия*

Аннотация

На внутрихозяйственной оросительной сети геометрические размеры и поперечный профиль водовода зачастую диктуются физической потребностью его пропускной способности на данном участке. Вопрос о рациональном поперечном профиле водовода напрямую связан с его напряженно-деформированным состоянием при работе. Производственный и эксплуатационный опыт показывает, что устройство водоводов осуществляют без должного анализа тотальных напряжений в грунте и самих конструкциях. Объект исследования – водовод прямоугольного поперечного сечения при воздействии на него статических, динамических нагрузок и их сочетаний.

Ключевые слова: водоводы, поперечные сечения, напряженно-деформированное состояние, полные напряжения, численное моделирование, математический анализ.

Abstract

V. G. Degtyarev, O. G. Degtyareva, N. V. Kozhenko

ANALYSIS OF THE STRESS-STRAIN STATE ELEMENTS OF A RECTANGULAR SECTION WATER LINE WHEN WORKING UNDER VARIOUS CONDITIONS

On an on-farm irrigation network, often the geometric dimensions and cross-sectional profile of the water conduit are dictated by the physical need for its throughput in a given area. The question about the rational transverse profile of the conduit directly related to its stress-strain state during operation. Production and operational experience shows that the installation of water conduits is carried out without a proper analysis of the total stresses in the soil and in the structures themselves. The object of study is a water conduit with a rectangular cross section under the influence of various loads on it: static, dynamic, and their combinations.

Keywords: conduits, cross sections, stress-strain state, total stresses, numerical modeling, mathematical analysis.

Введение

Доступные ресурсы — это одна из основ развития любого региона страны. Нехватка пресной воды сдерживает развитие ряда территорий России, и эта негативная тенденция год от года только усугубляется [1].

Для расширения площадей орошения и экономии водных ресурсов необходимо совершенствовать энергосберегающие технологии и технические средства, участвующие в водораспределении [2, 3]. При использовании программного продукта Midas GTX NX получены массивы цифровых данных по водоводу

прямоугольного сечения [4]. Они обработаны в программе wxMaxima, результаты подверглись в дальнейшем последовательному, всестороннему анализу, который позволил оценить рациональность использования данного поперечного профиля водовода с учетом его напряженно-деформированного состояния (далее – НДС) в условиях работы.

Один из вариантов водовода прямоугольного поперечного сечения представлен на рис. 1, а на рис. 2 – геометрические характеристики водовода в плане.

За ответственные водопроводящие сооружения на внутрихозяйственной оросительной сети принимаются те, над которыми проходят дороги. При этом выбор конструктивно-технологического решения как по водоводу, так и по дороге зависит от функционального значения водопроводящей сети и реальных связей проходящей дороги с дорогами более высокого порядка [5].

Как можно видеть на рис. 1–2, основные несущие элементы водопропускного сооружения – это монолитные бетонные блоки, конструктивно представляющие опоры и железобетонные плиты, формирующие пролет. Стоимость подобного вида сооружений непосредственно зависит от НДС, прямо пропорционально коррелирующего с шириной железобетонных конструктивных элементов и со степенью их армирования [6].



Рис. 1. Общий вид водовода прямоугольного сечения (фото авторов, 2021 г.)

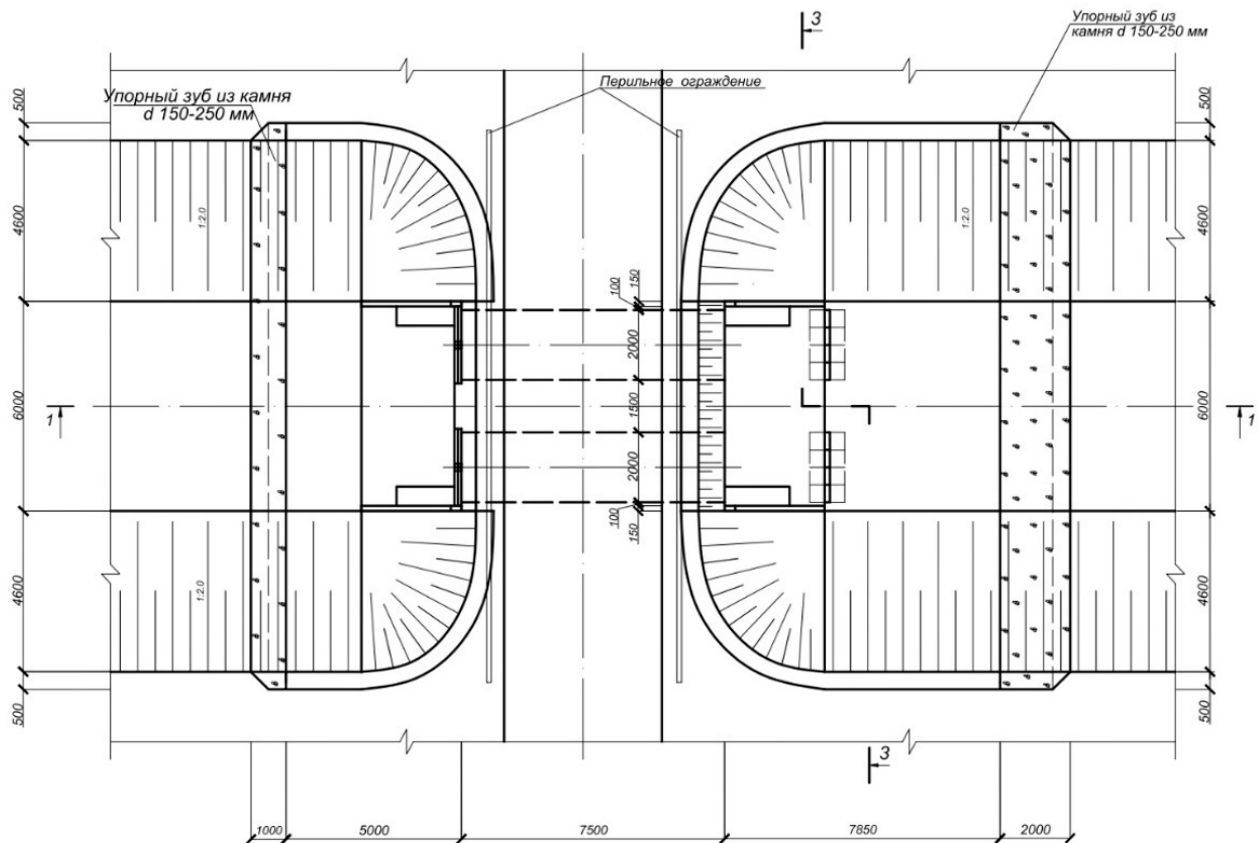


Рис. 2. Геометрические размеры водовода в плане

Основные результаты исследований и их обсуждение

Рассмотрим напряженно-деформированное состояние водовода прямоугольного поперечного сечения, размещенного в однородном грунте обратной засыпки.

При этом за факторы, наиболее влияющие на функцию отклика, принимаем высоту грун-

та над верхней частью водовода и нагрузки от оси автомобиля, проходящего по образованному мостовому переезду. Работа водовода рассматривалась посредством численного моделирования; использовался метод конечных элементов [7].

Расчеты осуществлялись с применением программного комплекса Midas GTX NX, что обосновывается, во-первых, трудоемкой задачей аналитического решения ввиду наличия в грунте нелинейных свойств, консолидационных процессов, во-вторых, возможностью динамического разжижения грунта засыпки и упрочнения во временной области. Достоверность получаемой информации по решению задач подтверждается сертификатом соответствия государственным стандартам

Российской Федерации (касающимся информационных технологий, оценки качества программных средств, программной продукции, мелиоративных систем и сооружений методов лабораторного определения физических характеристик грунтов, лабораторного определения параметров их переуплотнения, др.) и Еврокоду, а также верификационным тестированием разработчика и авторов статьи.

На рис. 3 представлена расчетная модель водовода прямоугольного поперечного сечения.

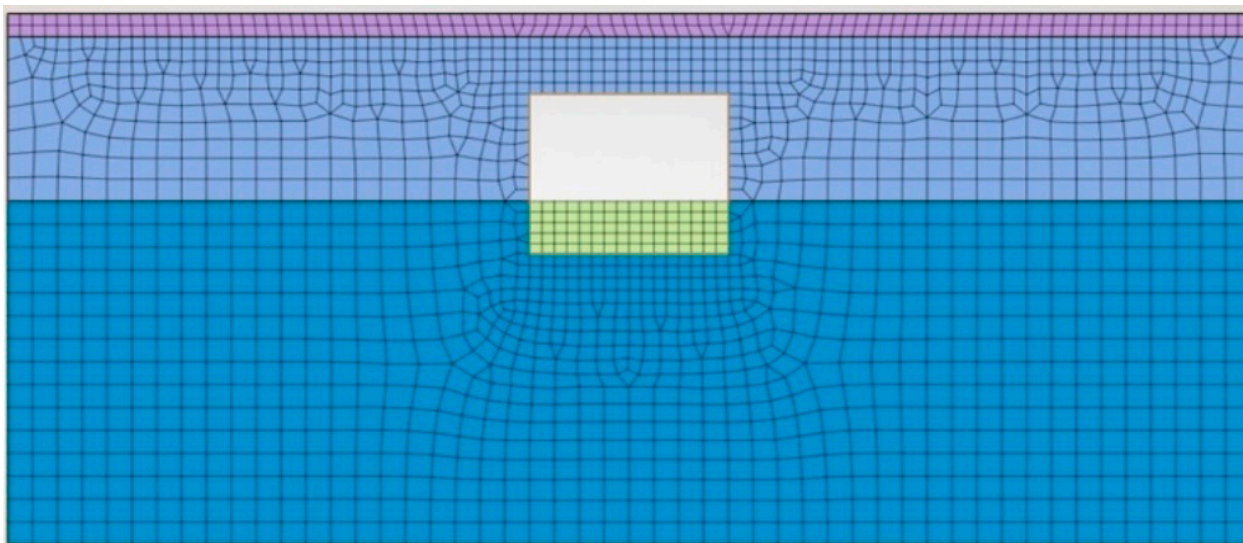


Рис. 3. Расчетная модель водовода прямоугольного поперечного сечения

При формировании расчетной модели данного водовода учтены следующие ограничения:

- закрепление контура модели, обеспечивающее невозможность вертикального и горизонтального перемещения;
- этапное формирование модели с учетом вышепредставленных ограничений (последовательное формирование ограничений);
- ограничение, обеспечивающее отсутствие возможности больших перемещений для ускорения расчета.

Для разработки математической модели, основанной на большом массиве цифр, полученных в результате численного моделирования процесса работы водовода в описанных условиях, а также ее исследования, использован комплекс wxMaxima [8, 9]. Данное математическое программное обеспечение выбрано в силу наличия в нем широкого функционала, включая обширную библиотеку приложений. Также оно работает с другим программным

обеспечением и может использоваться в качестве интерфейса для числовых библиотек.

Исследования выполнены с целью оценки зависимостей полных напряжений от высоты насыпи, что позволяет оптимизировать параметры прямоугольных водоводов.

В свою очередь, из анализа производственных ситуаций принят фактор высоты грунта над водоводом (h) и назначен к изменению от 0,5 и до 1,2 м, а фактор нагрузки от оси автомобиля (f) принят к изменению от 5 и до 40 т. Геометрические размеры водовода в поперечном сечении, представляющем прямоугольник, составляют 1,5 x 2,0 м.

В ходе использования программного комплекса Midas GTX NX осуществлены расчеты напряженно-деформированного состояния водовода прямоугольного поперечного профиля, в частности TOTAL S-YU и S-XX (кН/м²); они приведены для постоянной высоты грунта над верхом водовода в 0,9 м и при его расположении на однородном грунте обратной засыпки (табл. 1).

Таблица 1. Полные напряжения в водоводе на насыпном основании в зависимости от высоты грунта над ним и нагрузки от оси автомобиля

Номер опыта	Высота грунта, h (м)	Нагрузка от оси авто, f (т)	Полные напряжения	
			TOTAL S-YY, кН/м ²	TOTAL S-XX, кН/м ²
1	0,9	5	-220,66	-104,54
2	0,9	10	-226,83	-107,70
3	0,9	15	-232,99	-110,86
4	0,9	20	-239,27	-114,08
5	0,9	25	-246,88	-117,77
6	0,9	30	-251,81	-120,51
7	0,9	35	-259,07	-124,24
8	0,9	40	-264,41	-126,98

Расчетные данные табл. 1 – один из фрагментов расчетов. Далее они выполняются при сочетании всех указанных факторов влияния, в результате чего появляется большой массив цифр, описывающих рассматриваемый процесс.

Полученный в итоге большой массив цифр, характеризующий процесс изменения полных напряжений при расположении водовода на насыпном основании, представлен в виде матрицы. Ее фрагмент, как результат численного моделирования, имеет следующий вид:

M:matrix ([0.5,5,-229.95], [0.5,10,-236.04], [0.5,15,-243.13], [2.5,20,-249.76], [0.5,25,-257.23], [0.5,30,-264.06], [0.5,35,-270.89], [0.5,40,-276.77], [0.6,5,-220.67], [0.6,10,-227.94], [0.6,15,-231.53], [0.6,20,-238.12], [0.6,25,-244.76]).

Численное моделирование – это один из эффективных методов изучения сложных систем. Компьютерные модели проще и удобнее исследовать, так как на них возможно проводить числовые эксперименты, абстрагируясь от природы, поэтому воспользуемся для анализа данным методом.

Для углубленного изучения полных напряжений, возникающих в водоводе прямоугольного сечения, расположенном на насыпном основании, необходимо получить математические модели процессов полных напряжений S-YY и S-XX (кН/м²). Затем последователь-

но осуществляется работа над матрицей для нелинейного анализа критериев моделей с применением метода наименьших квадратов.

Математическая модель процесса представляется в виде полинома:

$(M, [x, y, z], z = a + b \times x + c \times y + d \times x \times y + e \times x^2 + f \times y^2)$. При этом $[a, b, c, d, e, f]$ –

список параметров, отвечающий за названия критериев, для которых отыскиваются оценки.

Опуская весь промежуточный объем расчетов, представим конечный результат для водоводов прямоугольного сечения, расположенных на насыпном основании, в виде полученных математических моделей полных напряжений:

полные напряжения TOTAL S-YY:

$Z(x, y) = -256.027 + 100.183x - 1.403y + 0.222xy - 59.029x^2 - 7.425 \times 10^{-4} \times y^2$;

полные напряжения TOTAL S-XX:

$Z(x, y) = -122.585 + 51.608x - 0.723y + 0.114xy - 30.507x^2 - 2.904 \times 10^{-4} \times y^2$.

На рис. 4 представлена визуализация расчета полных напряжений TOTAL S-YY в водоводе, расположенном на насыпном основании при высоте грунта над водоводом 0,9 м и усилии от оси автомобиля в 10 т. На рис. 5 – при тех же факторах визуализация расчетов полных напряжений TOTAL S-XX. Формирование результатов выполнено благодаря техническим возможностям программных продуктов, в связи с чем шкалы изменения результатов показаны на фоне диалогового окна программы.

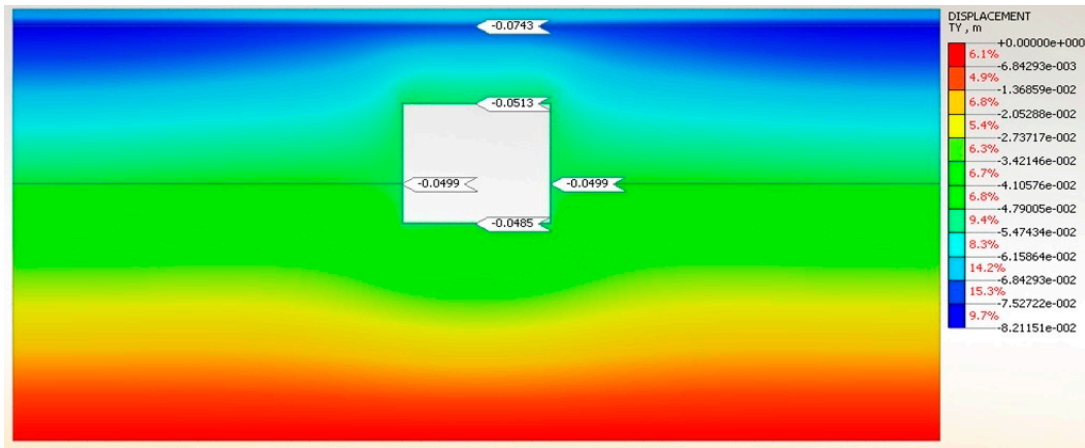


Рис. 4. Полные напряжения TOTAL S-YY, кН/м²

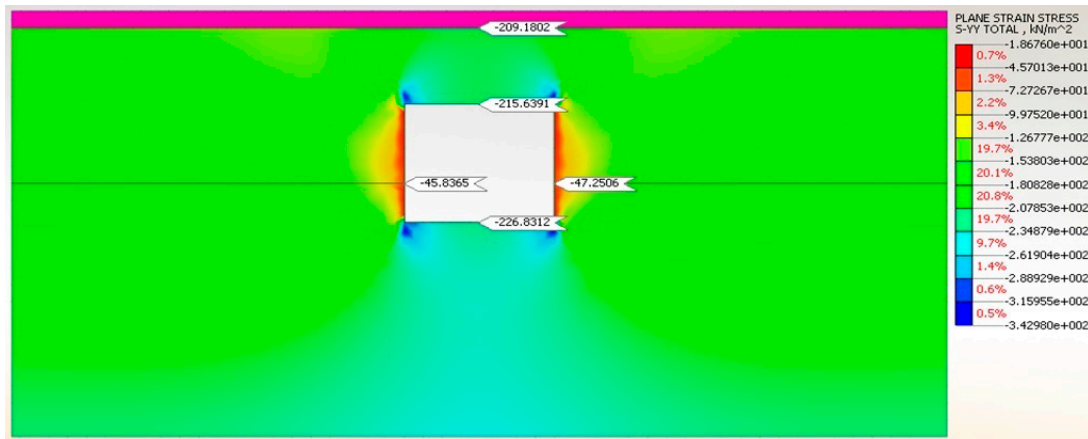


Рис. 5. Полные напряжения TOTAL S-XX, кН/м²

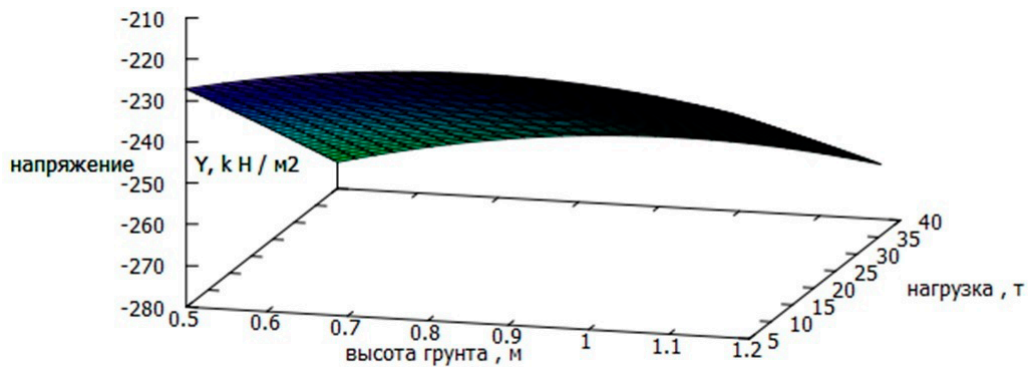


Рис. 6. Поверхность функции отклика TOTAL S-YY

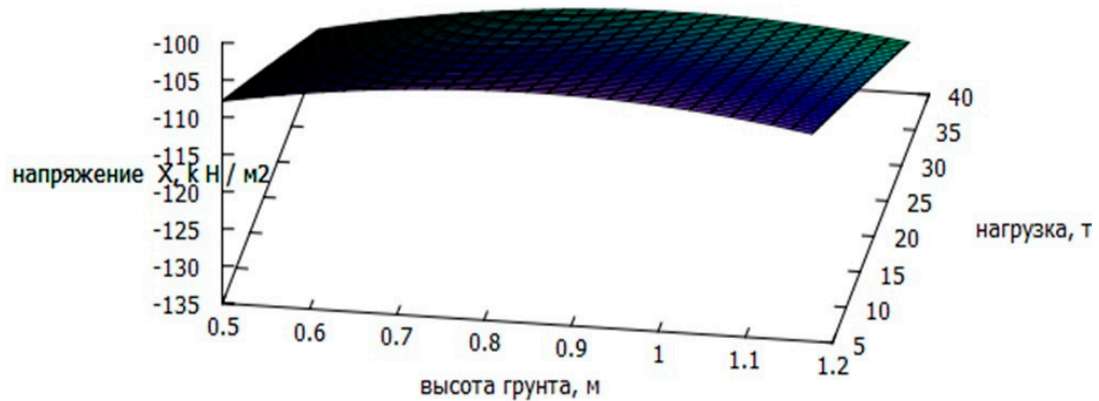


Рис. 7. Поверхность функции отклика TOTAL S-XX

С помощью вышепредставленных математических моделей осуществлено построение 3D-моделей поверхностей функций отклика: $Z = f(x, y)$ для TOTAL S-YY и S-XX (рис. 6 и 7). Также осуществлен последовательный анализ полученных поверхностей функций отклика путем построения линий равных уровней (рис. 8 и 9).

Дальнейшее исследование математических моделей и анализ геометрических графиков предполагают задание параметров исследуемых факторов на постоянных уровнях и по моделям, преобразованным таким образом, а также выявление степени влияния переменных факторов на функцию отклика.

При определении на постоянных уровнях высоты грунта над водоводом в параметрах 0,5; 0,85; 1,2 м из основной математической модели процесса полных напряжений S-XX получены соответствующе преобразованные уравнения:

$$\begin{aligned} \text{при } 0,5 \text{ м } Z &= -2,904 \times 10^4 \times y^2 - 0,666y - 104,408; \\ 0,85 \text{ м } Z &= -2,904 \times 10^4 \times y^2 - 0,626y - 100,760; \\ 1,2 \text{ м } Z &= -2,904 \times 10^4 \times y^2 - 0,586y - 104,586. \end{aligned}$$

Графическая интерпретация данных уравнений представлена на рис. 10 (напряжения при постоянных высотах грунта над водоводом 0,5; 0,85 и 1,2 м).

Следующий этап исследования математической модели процесса изменения полных напряжений S-XX – выведение на постоянные параметры фактора нагрузки от оси автомобиля на значения 5,0; 20,25; 40,0 т соответственно.

Данное действие позволило получить следующие соответствующие уравнения:

$$\begin{aligned} \text{при } 5,0 \text{ т } Z &= -30,507 x^2 + 52,179 x - 126,212; \\ 20,25 \text{ т } Z &= -30,507 x^2 + 53,920 x - 137,362; \\ 40,0 \text{ т } Z &= -30,507 x^2 + 56,176 x - 152,002. \end{aligned}$$

Данные уравнения графически проинтерпретированы на рис. 11 (напряжения при постоянных нагрузках на грунт от оси автомобиля в 5; 20,25; 40 т).

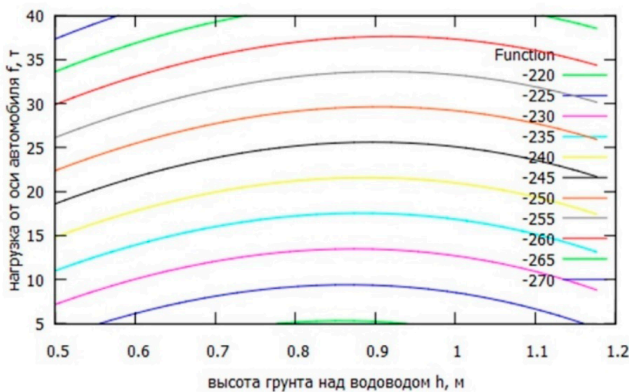


Рис. 8. Линии равных уровней по поверхности функции отклика TOTAL S-YY

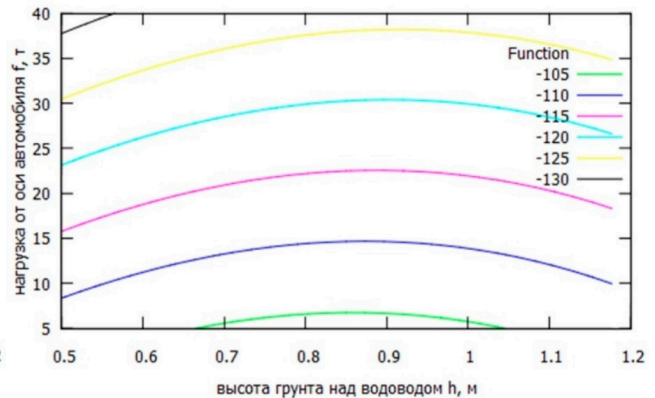


Рис. 9. Линии равных уровней по поверхности функции отклика TOTAL S-XX

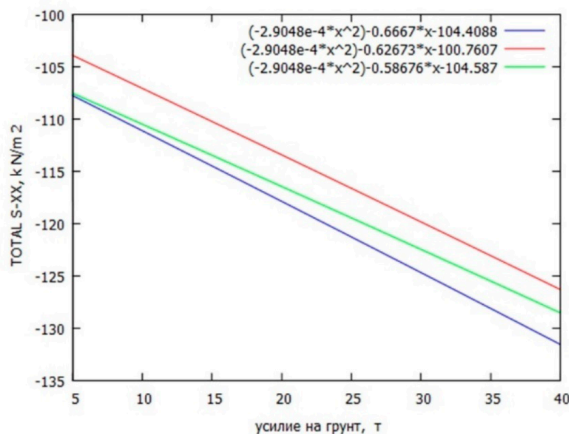


Рис. 10. Полные напряжения S-XX (в зависимости от нагрузки оси автомобиля на грунт)

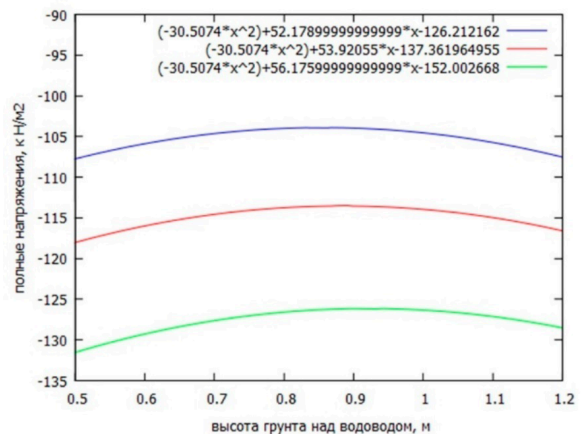


Рис. 11. Полные напряжения S-XX (в зависимости от высоты грунта над водоводом)

Далее исследовались полные напряжения S-YU на водоводе прямоугольного сечения в однородном грунте при постоянных высотах грунта над водоводом 0,5; 0,85; 1,2 м (в зависимости от нагрузки на грунт от оси автомобиля). Преобразование математической модели процесса изменения полных напряжений S-YU по указанным условиям позволило получить следующие уравнения:

при 0,5 м $Z = -7,425 \times 10^{-4} \times x^2 - 1,292x - 220,692$;
 0,85 м $Z = -7,425 \times 10^{-4} \times x^2 - 1,214x - 213,519$;
 1,2 м $Z = -7,425 \times 10^{-4} \times x^2 - 1,136x - 220,809$.

Графическая интерпретация полученных уравнений показана на рис. 12 (напряжения при постоянных высотах грунта над ним 0,5; 0,85 и 1,2 м).

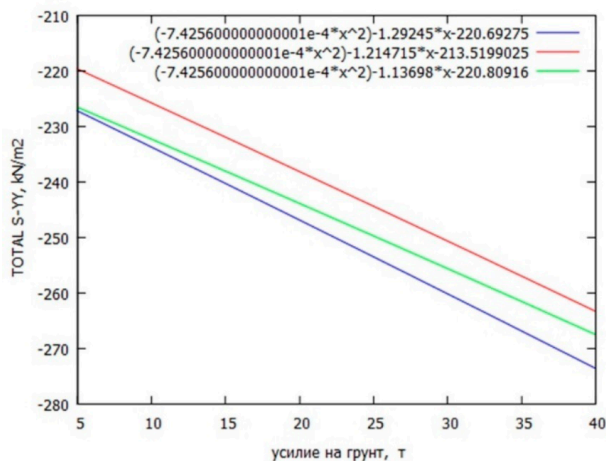


Рис. 12. Полные напряжения S-YU (в зависимости от нагрузки оси автомобиля на грунт)

Анализ полученных уравнений и графических зависимостей при исследовании полных напряжений S-YU и S-XX на водоводе прямоугольного сечения в однородном грунте при постоянных нагрузках на грунт от оси автомобиля в 5; 20, 25 и 40 т (в зависимости от высоты грунта над водоводом) позволяет прийти к выводу, что и горизонтальные, и вертикальные

Следующий этап исследования математической модели процесса изменения полных напряжений S-YU предполагал выведение на постоянные параметры фактора нагрузки от оси автомобиля, соответственно на значения 5,0; 20,25 и 40,0 т. Данное действие позволило получить следующие соответствующие уравнения:

при 5,0 т $Z = -59,029x^2 + 101,293x - 263,063$;
 20,25 т $Z = -59,029x^2 + 104,680x - 284,752$;
 40,0 т $Z = -59,029x^2 + 109,067x - 313,335$.

Графическая интерпретация полученных уравнений представлена на рис. 13 (напряжения при постоянных нагрузках на грунт от оси автомобиля в 5; 20,25 и 40 т).

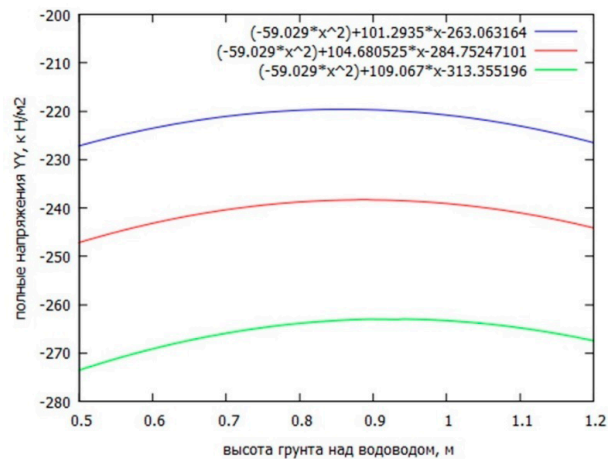


Рис. 13. Полные напряжения S-YU (в зависимости от высоты грунта над водоводом)

напряжения возрастают с увеличением нагрузки на грунт от автомобиля. В исследуемом диапазоне факторов функции отклика зафиксированы экстремумы по минимуму (табл. 2).

Итак, констатируем, что горизонтальные и вертикальные напряжения имеют незначительные изменения при существенном увеличении нагрузки на грунт от оси автомобиля.

Таблица 2. Экстремальные значения полных напряжений в водоводе прямоугольного сечения на однородном грунте

Нагрузки на грунт от оси автомобиля (т)	Высота грунта над водоводом (м)	Полные напряжения (кН/м ²)	
		S-YU	S-XX
5,0	0,86	-219,82	-103,97
20,25	0,89	-238,25	-113,62
40,0	0,93	-263,1	-126,33

Заключение

Комплексный анализ математических моделей полных напряжений S-YY и S-XX на водоводе прямоугольного сечения на однородном грунте позволяет констатировать, что влияние выбранных к исследованию факторов на указанные напряжения существенно различается. Так, функция отклика S-YY изменяется от 220 и до 270 (кН/м²), то есть в пределе 50 кН/м², тогда как функция отклика S-XX изменяется от 105 и до 130 (кН/м²), то есть в пределе 25 кН/м², что в 2 раза меньше. Данный факт был геометрически проинтерпретирован посредством интенсивности линий сечений (рис. 8 и 9).

Анализ полученных уравнений и графических зависимостей при исследовании полных напряжений S-YY и S-XX на водоводе в одно-

родном грунте, при постоянных высотах грунта над водоводом 0,5 м, 0,85 и 1,2 м, а также в зависимости от нагрузки оси автомобиля на грунт, позволяет видеть сходную картину влияния факторов на функцию отклика. При этом воздействие линейное, а при наименьшей высоте грунта над водоводом имеется наиболее полное напряжение – как по функции S-YY, так и по функции S-XX.

Дальнейшее увеличение высоты грунта над водоводом до средних значений, принятых в исследовании, приводит к минимальным значениям функции отклика. Но при последующем увеличении высоты насыпи значение полных напряжений по обеим функциям опять увеличивается.

Библиографический список

1. Degtyarev, G. Designing an additional freshwater source infrastructure to ensure the environmental sustainability of coastal areas / G. Degtyarev, O. Takhumova // IOP Conf. ser.: Earth and environmental science. – 2019. – Vol. 395. – № 1. – P. 012001.
2. Дегтярев, Г. В. Исследование расходных характеристик регулирующего органа ленточного регулятора расхода воды методом планирования эксперимента / Г. В. Дегтярев, Н. В. Коженко // Тр. Кубан. гос. аграр. ун-та. – 2014. – № 1 (46). – С. 212–218.
3. Дегтярев, В. Г. Ленточный регулятор расхода с адаптивными характеристиками для рисовых чеков / В. Г. Дегтярев, Г. В. Дегтярев // Тр. Кубан. гос. аграр. ун-та. – 2012. – № 36. – С. 337–341.
4. Numerical modeling of condition of the bridge structure based on the results of national surveys / G. V. Degtyarev, G. S. Molotkov, A. N. Sekisov, D. A. Datsjo // Internat. journ. of engineering and technology. – 2018. – Vol. 7. – № 2.13, Spec. is. 13. – P. 226–230. DOI: 10.14419/ijet.v7i2.13.11866
5. Algorithm parallelizing for classifying the complex systems / E. K. Edgulova, Z. G. Lamerdonov, T. Yu. Khashirova, L. A. Moskalenko, V. A. Denisenko // Internat. conf. «Quality management, transport and information security, information technologies», St. Petersburg, 24–28 Sept. 2018 / St. Petersburg, 2018. – P. 620–622. DOI: 10.1109/ITMQIS.2018.8524982
6. Degtyarev, G. V. The seasonal regulation basin dam basis deformation forecast / G. V. Degtyarev, D. A. Dats'о // IOP Conf. ser.: materials science and engineering. – 2019. – Vol. 698. – № 2. – P. 022013. DOI:10.1088/1757-899X/698/2/022013
7. The monitoring of condition of hydraulic structures / F. K. Abdrazakov, S. S. Orlova, T. A. Pankova, E. N. Mirkina, T. V. Fedyunina // Journ. of advanced research in dynamical and control systems. – 2018. – Vol. 10. – № 13, Spec. is. – P. 1952–1958.
8. Information technologies at the choice of an optimum bank protection structures for highways in emergency situations / T. Yu. Khashirova, A. S. Ksenofontov, E. K. Edgulova, Z. G. Lamerdonov, H. S. Nartokov // Internat. conf. «Quality management, transport and information security, information technologies, St. Petersburg, 24–28 Sept. 2018 / St. Petersburg, 2018. – P. 656–658. DOI: 10.1109/ITMQIS.2018.8524978
9. Olgarenko, V. I. Technical condition diagnostics of the water supply facilities in the irrigation systems / V. I. Olgarenko, I. V. Olgarenko, V. I. Olgarenko // IOP Conf. ser.: materials science and engineering. – 2019. – Vol. 698, is. 2. – № 2. – P. 022060. DOI: 10.1088/1757-899X/698/2/022060

Поступила 22 августа 2022 г.