

NUMERICAL MODELING AND DIGITAL MATHEMATICAL ANALYSIS IN THE STUDY OF COMPLEX SYSTEMS

V. G. Degtyarev, G. V. Degtyarev, O. G. Degtyareva

*Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin
Krasnodar, Russian Federation*

Corresponding author E-mail: cst2007@mail.ru

Received 02.08.2023

Submitted 23.08.2023

Abstract

Introduction. Implementation of the import substitution system requires an increase in agricultural land. Farming on rainfed land has not proven to be feasible and efficient. Guaranteed stable yield is possible with obligatory irrigation according to the technological map. It is necessary to create automated systems of water distribution and irrigation and rational use of water resources during implementation of irrigation itself. **Object.** The object of research is a complex system "water conduit – ground base – vehicle load" and stress-strain state of the ground massif around the water conduit. **Materials and methods.** The investigations were carried out using the finite element method. Numerical modelling was carried out using Midas GTS NX software. The proven wxMaxima software was used for the numerical mathematical analysis of the large volume of figures. These software programs allow verification of how accurately the computer model represents the underlying mathematical model when reproducing theoretical solutions. In the next step, the model is subjected to validation, when it is determined how faithfully the computer model represents the real object. **Results and conclusions.** At research of work of the complex system "water conduit – ground base – load from a car" and definition of a stress-strain state of a ground massif it is established that value of a response function is determined to a considerable degree by force on a water conduit from a car, the function weakly reacts on height of clay soil above a water conduit; with increase of load the degree of influence on a response function remains constant; with increasing load, the degree of influence on the response function remains constant; at a force of 40 tonnes, the vertical stress reaches its minimum extremum, which is 350.38 kN/m² at a ground height above the conduit of 0.82 m; at a force of 20.25 tonnes, the stress function also tends to the minimum extremum; as the forces from the vehicle above the conduit decrease, the stress increments increase; at 40 tonnes the function increment is 1.39 kN/m², at 20.5 tonnes it is 6.43 kN/m², and at 5 tonnes it is 10.06 kN/m²; the relationship between the change in vertical stresses TOTAL S-YY in the soil mass of the waterway and the forces on the ground from the vehicle is linear; at the lowest force of 5.0 tonnes from the car on the water line, the vertical stress reaches the lowest value at the lowest ground height above the structure of 0.5 m, which is 288.14 kN/m². With a force of 40 tonnes on the conduit, the vertical stress reaches its highest value at the highest ground height above the structure of 1.2 m, which is 352.55 kN/m². The proposed algorithm can be used in the development of design documentation for the construction of culvert systems.

Key words: *multifactor systems, numerical modelling, stress-strain state, mathematical analysis, culverts.*

Citation. Degtyarev V. G., Degtyarev G. V., Degtyareva O. G. Numerical modeling and digital mathematical analysis in the study of complex systems. *Proc. of the Lower Volga Agro-University Comp.* 2023. 3(71). 540-553 (in Russian). DOI: 10.32786/2071-9485-2023-03-53.

Author's contribution. All authors of this research paper have directly participated in the planning, execution, or analysis of this study. All authors of this paper have read and approved the final version submitted.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

УДК 626.3

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЦИФРОВОЙ МАТЕМАТИЧЕСКИЙ
АНАЛИЗ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ****В. Г. Дегтярев**, кандидат технических наук, доцент**Г. В. Дегтярев**, доктор технических наук, профессор**О. Г. Дегтярева**, доктор технических наук, доцент*ФГБОУ ВО Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина
г. Краснодар, Российская Федерация*

Актуальность. Внедрение системы импортозамещения требует увеличения сельскохозяйственных угодий. Осуществление сельскохозяйственной деятельности на богаре не зарекомендовало себя как целесообразное и эффективное. Гарантированное получение стабильного урожая возможно при обязательном орошении согласно технологической карте. Необходимо создание автоматизированных систем водораспределения и полива и рационального использования водных ресурсов при реализации самого орошения. **Объект.** Объектом исследований является сложная система «водовод – грунтовое основание – нагрузка от автомобиля» и напряженно-деформированное состояние грунтового массива вокруг водовода. **Материалы и методы.** Исследования проводились с использованием метода конечных элементов. Численное моделирование осуществлялось с применением программного обеспечения Midas GTS NX. Для цифрового математического анализа большого объема цифр использовалось зарекомендовавшее себя программное обеспечение wxMaxima. Данные программного обеспечения позволяют верифицировать, насколько точно компьютерная модель представляет лежащую в ее основе математическую модель при воспроизводстве теоретических решений. На следующем этапе модель подвергается валидации, когда определяется, насколько достоверно компьютерная модель представляет реальный объект. **Результаты и выводы.** При исследовании работы сложной системы «водовод – грунтовое основание – нагрузка от автомобиля» и определении напряженно-деформированного состояния грунтового массива установлено, что значение функции отклика определяется в значительной степени усилием на водовод от автомобиля, функция слабо реагирует на высоту глинистого грунта над водоводом; с увеличением нагрузки степень воздействия на функцию отклика остается постоянной; при усилии в 40 т вертикальное напряжение достигает экстремума по минимуму которое составляет 350,38 кН/м² при высоте грунта над водоводом 0,82 м; при усилии в 20,25 т функция напряжений также стремится к экстремуму по минимуму; с уменьшением усилий от автомобиля находящегося над водоводом приращения по напряжениям возрастают; при усилии в 40 т приращение по функции составляет 1,39 кН/м², при усилии в 20,5 т – 6,43 кН/м², а при усилии в 5 т – 10,06 кН/м²; взаимосвязь изменения вертикальных напряжений TOTAL S-YY в грунтовой массе водовода от усилий на грунт от автомобиля линейна; при наименьшем усилии от автомобиля на водовод в 5,0 т вертикальное напряжение достигает наименьшего значения при наименьшей высоте грунта над сооружением в 0,5 м, что составляет 288,14 кН/м². При усилии на водовод в 40 т вертикальное напряжение достигает наибольшего значения при наибольшей высоте грунта над сооружением в 1,2 м, что составляет 352,55 кН/м². Предложенный алгоритм может быть использован при разработке проектной документации при устройстве водопропускных систем.

Ключевые слова: многофакторные системы, численное моделирование, напряженно-деформированное состояние, математический анализ, водопропускные устройства.

Цитирование. 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). 540-553. DOI: 10.32786/2071-9485-2023-03-53.

Авторский вклад. Все авторы настоящего исследования принимали непосредственное участие в планировании, выполнении или анализе данного исследования. Все авторы настоящей статьи ознакомились с представленным окончательным вариантом и одобрили его.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение. Исследование любого, тем более сложного объекта, предполагает в большинстве своем моделирование [15, 17]. Моделирование получило всплеск активности и результативности с всесторонним применением компьютеров [7, 9]. Принято различать аналитическое, численное и имитационное моделирование [10]. Интересующее нас численное моделирование предусматривает получение математической модели объекта, на котором можно зафиксировать и набрать статистику по данным, характеризующим конкретную ситуацию или технологический процесс [1, 11]. В последние десятилетия развитие численного моделирования в сложных системах основывается на учете реальных ситуаций и включает в себя пространственную дискретизацию, например, разделение грунта и проектируемого сооружения расчетной сеткой на ячейки, так называемые конечные элементы [5, 13].

Материалы и методы. Именно метод конечных элементов (МКЭ) в настоящее время превалирует в анализе напряженно-деформированных состояний конструктивных элементов в сложных системах при учете несущей способности их грунтовых оснований. Данному факту способствует доступность программного обеспечения и практически повсеместная компьютеризация проектно-конструкторской деятельности [16].

Вместе с тем широкое распространение МКЭ породило в ряде случаев систематически некорректно получаемые результаты, что имеет под собой основу не учета основных факторов, характеризующих процессы, при формировании математических моделей, а также сложность объектов, в том числе обусловленную нелинейностью поведения ряда факторов.

Ведущие ученые в международных ассоциациях, определяющие техническую политику в области использования МКЭ при расчетах и исследованиях сложных систем, вынуждены констатировать, что одной из наиболее сложных ситуаций можно считать ситуацию при использовании МКЭ в геотехнике, где грунт моделируется с помощью комплексной геомеханической модели для выявления взаимосвязи «напряжение-деформация» [2]. В свою очередь, рассматриваемая модель формируется в рамках сложной среды, таким образом, становится очевидным, сколь важен правильный выбор комплексной геомеханической модели, где на сегодня наибольшее распространение получили нижеследующие: для глинистых и песчаных грунтов Soft Soil, Soft Soil Crup, Hardening Soil и Hardening Soil Small.

Вместе с тем любая численная модель формируется на базе нескольких компонентов, которые сами по себе и в сочетании друг с другом являются источником допущения, а возможно, и ошибок. Именно с таких позиций рассматривают работу численных моделей их разработчики. Что же касается пользователей, то на сегодня, исходя из рекомендаций разработчиков, любая модель должна подвергаться процедуре верификации, где определяется, как точно компьютерная модель представляет лежащую в ее основе математическую модель при воспроизводстве теоретических решений, и это во-первых. Во-вторых, модель должна быть подвергнута валидации, когда определяется, насколько достоверно компьютерная модель представляет реальный объект. Таким образом, в аспекте указанной постановки вопросов процесс верификации компьютерных моделей – это прерогатива разработчиков программ, тогда как валидация остается за пользователями и на сегодня она решается путем обзора, оценки и анализа априорной информации, а также процедурами оценки значимости коэффициентов в математических моделях и адекватности моделей в целом.

Результаты и обсуждения. Рассмотрим на конкретном примере проанализированное с теоретической точки зрения решение сложной системы, посредством применения численного моделирования и цифрового математического анализа, например, водопропускного сооружения круглого поперечного сечения расположенного на гли-

нистом основании [6, 12]. Целью исследования в этом случае должно быть напряженно-деформированное состояние грунтового массива вокруг и под водоводом, так как к анализу выбираем вертикальные напряжения TOTAL S-YY (кН/м²). Состояние грунта рассматриваем при переменной высоте грунта над водоводом, принятой в пределах от 0,5 до 1,2 м, а также нагрузки от переезжающего водовод автомобиля, которая может изменяться от 5 до 40 т.

На рисунке 1 приведена реальная расчетная ситуация сложной системы, за которую принят водовод круглого поперечного сечения, находящийся в грунтовом массиве с учетом его реологических свойств.



Рисунок 1 – Расчетная реальная ситуация водовода круглого поперечного сечения как сложной многофакторной системы

Figure 1 – The calculated real situation of a circular cross-section conduit as a complex of multifactor system

В соответствии с представленным алгоритмом исследования сложной системы вначале осуществляют посредством численного моделирования с применением программного обеспечения (ПО) Midas GTS NX, где учет реологических свойств грунта реализован в виде совмещенного стадийного моделирования в рамках расчетного случая, учитывающего изменчивость напряженно-деформированного состояние грунтового массива и фильтрации [4, 14].

На рисунке 2 представлена численная расчетная модель при реализации МКЭ для водовода круглого поперечного сечения, разработанная в ПО Midas GTS NX.

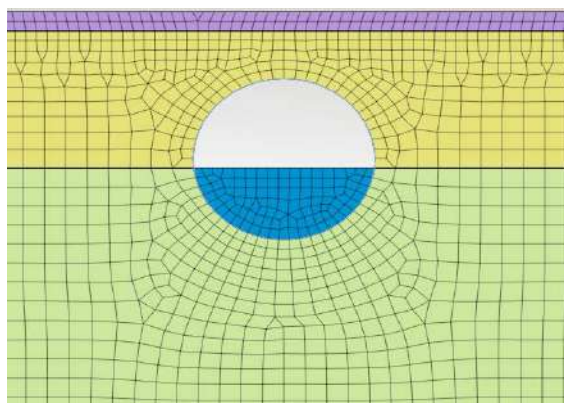


Рисунок 2 – Расчетная модель при реализации МКЭ для водовода круглого поперечного сечения, разработанная в ПО Midas GTS NX

Figure 2 – The calculation model for the implementation of the finite element method for a circular cross-section conduit, developed in the Midas GTS NX software

Результаты численного моделирования различных ситуаций при изменении факторов влияния на функцию отклика сведены в таблицу 1. При этом результаты расчета вертикальных напряжений TOTAL S-YY приведены в таблице 1 в сокращенном варианте, только для высоты грунта над водоводом 0,8 м. Тогда как в дальнейшей обработке и анализе результатов принимал участие весь массив цифр, полученный путем перебора всех возможных сочетаний и ситуаций по аргументам.

Таблица 1 – Расчет вертикальных напряжений TOTAL S-YY в водоводе как сложной системе, выполненный в ПО Midas GTS NX

Table 1 – Calculation of TOTAL S-YY vertical stresses in a conduit as a complex system, performed in Midas GTS NX software

Номер опыта	Нагрузка от оси автомобиля, т	Вертикальные напряжения TOTAL S-YY, кН/м ²
1	5	-290,92
2	10	-299,27
3	15	-307,68
4	20	-316,15
5	25	-324,64
6	30	-333,16
7	35	-341,72
8	40	-350,31

Визуализация расчета вертикальных напряжений TOTAL S-YY в грунтовом массиве водовода посредством цветового кодирования результатов приведена на рисунке 3 при высоте грунта над водоводом 0,8 м и усилии от автомобиля в 20 т.

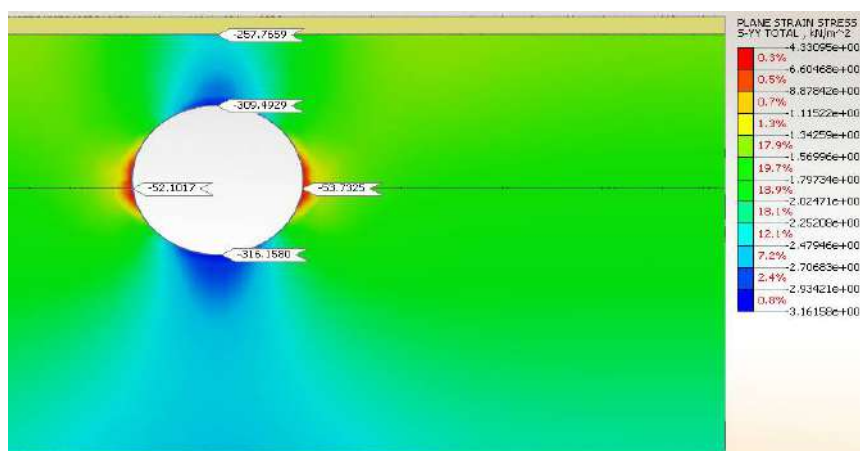


Рисунок 3 – Визуализация расчета вертикальных напряжений TOTAL S-YY в грунтовом массиве водовода посредством цветового кодирования

Figure 3 – Visualization of the calculation of TOTAL S-YY vertical stresses in the ground mass of the conduit by means of color coding

Большой объем цифровых данных, полученный при реализации численного метода исследований и даже визуализация расчетов вертикальных напряжений TOTAL S-YY в грунтовом массиве водовода посредством цветового кодирования не позволяют однозначно выявить степень влияния аргументов на изучаемую функцию. В этом случае в соответствии с представленным алгоритмом действий необходимо реализовать цифровой математический анализ полученного большого объема цифр. Для этого будем использовать хорошо зарекомендовавшее себя ПО wxMaxima [3, 8]. Именно опираясь на широкое применение данной программы при решении подобных задач считаем, что при ее использовании необходимость в процессе верификации отсутствует.

В свою очередь, работа с массивом цифр в программе wxMaxima для получения математической модели процесса, происходящего в сложной системе, должна начинаться с представления всех цифр в матричном виде. В сокращенном виде матрица процесса представляет нижеследующее:

M:matrix ([0.5, 5, -288.03], [0.5, 10, -296.52], [0.5, 15, -305.94], [0.5, 20, -314.95], [0.5, 25, -324.01], [0.5, 30, -333.12], [0.5, 35, -342.24], [0.5, 40, -351.42], [0.6, 5, -288.54], [0.6, 10, -297.27], [0.6, 15, -306.04], [0.6, 20, -314.87], [0.6, 25, -324.01], [0.6, 30, -332.60], [0.6, 35, -341.53], [0.6, 40, -350.51], [0.7, 5, -289.55], [0.7, 10, -298.07], [0.7, 15, -306.68], [0.7, 20, -315.3], [0.7, 25, -323.94], [0.7, 30, -332.65], [0.7, 35, -341.38], [0.7, 40, -350.15], [0.8, 5, -290.92], [0.8, 10, -299.27], [0.8, 15, -307.68], [0.8, 20, -316.15], [0.8, 25, -324.64], [0.8, 30, -333.16].

Учитывая работы, выполненные в данном направлении другими авторами [3, 8], выбираем представление математической модели процесса в виде полинома второй степени. В программе wxMaxima данная операция выполняется файлом s:lsquares_estimates (M, [x, y, z], $Z = a + b \cdot x + c \cdot y + d \cdot x \cdot y + e \cdot x^2 + f \cdot y^2$), где a, b, c, d, e, f являются коэффициентами в математической модели расчета вертикальных напряжений TOTAL S-YY в грунтовом массиве водовода.

Реализация файла позволила получить следующие коэффициенты для уравнения модели:

$$a = -\frac{6225517}{22400}, b = \frac{2971}{840}, c = -\frac{218133}{112000}, d = \frac{97}{280}, e = -\frac{3847}{336}, f = -\frac{1201}{1680000}.$$

В математической модели коэффициенты представляют в десятичных дробях, что в программе преобразуется файлом float (%). При этом независимо от вида представления коэффициентов все они прошли процедуру проверки на значимость, а сама модель была проверена на адекватность, что позволило считать выполненной процедуру валидации с учетом реально получаемых по модели результатов.

В конечном итоге математическая модель имеет следующий вид:

$$Z(x, y) = -277,92487 + 3,53690 \cdot x - 1,94762 \cdot y + 0,34643 \cdot x \cdot y - 11,44940 \cdot x^2 - 7,14881 \cdot 10^{-4} \cdot y^{-2}.$$

Адекватная математическая модель предполагает возможность ее визуализации, что в wxMaxima реализуется посредством файла plot 3d, а результат представлен на рисунке 4.

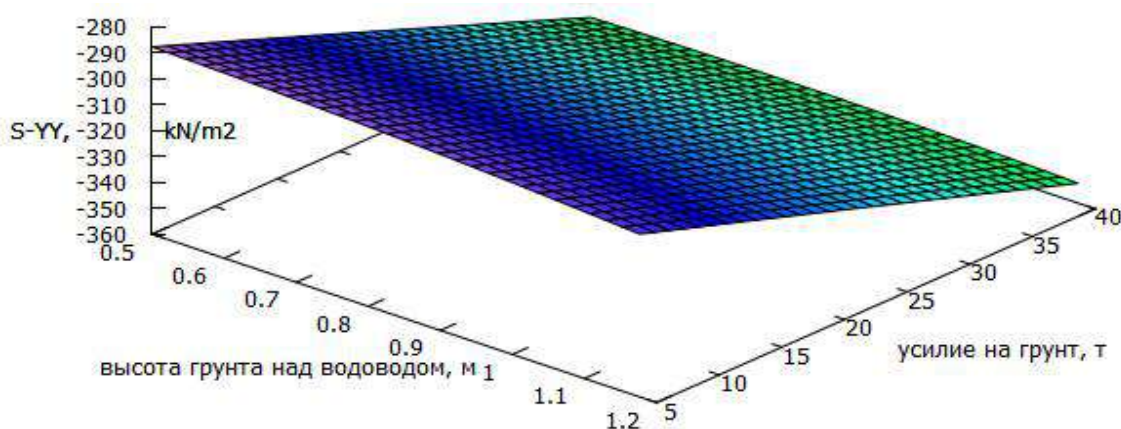


Рисунок 4 – Визуализированная математическая модель вертикальных напряжений TOTAL S-YY в грунтовом массиве водовода

Figure 4 – Visualized mathematical model of vertical stresses TOTAL S-YY in the ground mass of the water conduit

Вид визуализированной функции отклика вертикальных напряжений TOTAL S-YY в грунтовом массиве водовода позволяет отметить, что при изменении высоты грунта над водоводом от 0,5 до 1,2 м, а также усилия на грунт от автомобиля от 5 до 40 т значения вертикальных напряжений могут изменяться от 280 до 360 кН/м².

Дальнейшее исследование изменения вертикальных напряжений по представленному алгоритму предполагает построение линий равных уровней по полученной поверхности отклика. Данная задача в программе wxMaxima реализуется посредством файла contour_plot, а результат представлен на рисунке 5.

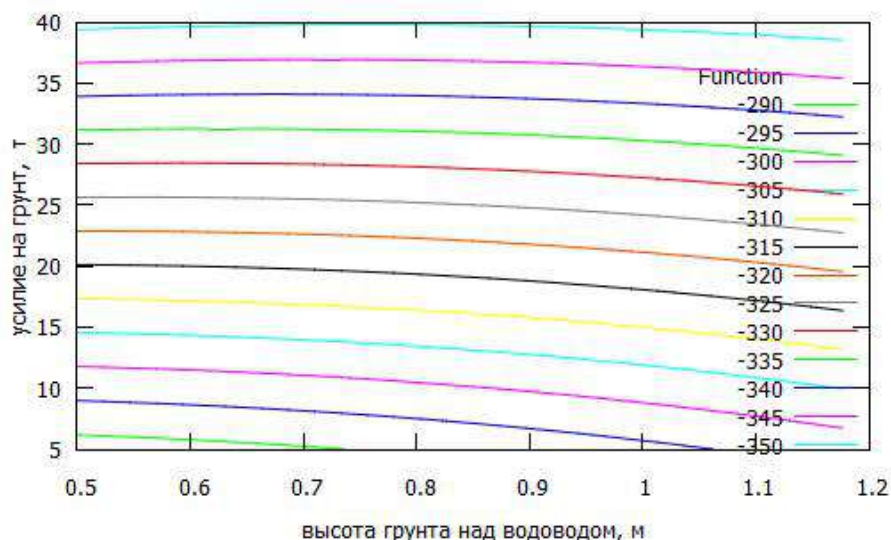


Рисунок 5 – Линии равных уровней по визуализированной математической модели вертикальных напряжений TOTAL S-YY в грунтовом массиве водовода

Figure 5 – Lines of equal levels according to the visualized mathematical model of vertical stresses TOTAL S-YY in the ground mass of the conduit

Анализ графиков линий равных уровней по изменению вертикальных напряжений TOTAL S-YY в грунтовом массиве водовода позволяет отметить, что значение функции отклика однозначно определяется в значительной степени усилием на водовод от автомобиля и практически функция весьма слабо реагирует на высоту глинистого грунта над водоводом. При этом с увеличением нагрузки степень воздействия на функцию отклика практически остается постоянной.

Дальнейшие исследования математической модели по принятому алгоритму выполняются построением сечений по линиям равных уровней при последовательной постановке каждого из аргументов на постоянные уровни. Отмеченное выполнено в программе wxMaxima при использовании файла plot 2d.

В связи с необходимостью выдвигания одного из аргументов на постоянные уровни рассмотрим постановку в математической модели влияния усилия от автомобиля, находящегося над водоводом, на следующие уровни $F_1 (5,0; y)$; $F_2 (20,25; y)$; $F_3 (40,0; y)$, что решает вопрос преобразования модели к видам:

$$F_1(x) = -11,4494 \cdot x^2 + 5,2689 \cdot x - 287,680772;$$

$$F_2(x) = -11,4494 \cdot x^2 + 10,5515 \cdot x - 317,65694548;$$

$$F_3(x) = -11,4494 \cdot x^2 + 17,3929 \cdot x - 356,972708.$$

Графические и аналитические интерпретации данных уравнений имеют вид, представленный на рисунке 6.

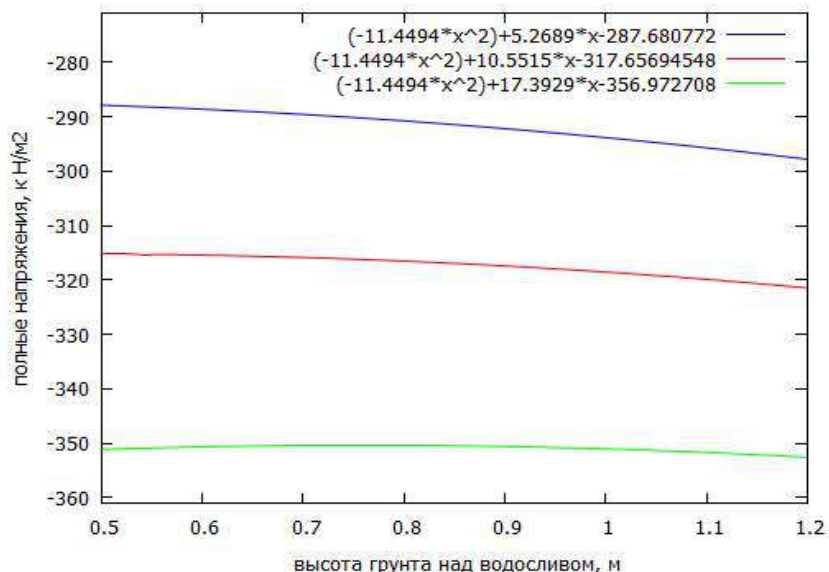


Рисунок 6 – Графики сечений по поверхности отклика при постоянных усилиях от автомобиля находящегося над водоводом

Figure 6 – Graphs of cross sections on the response surface with constant efforts from a car located above the water pipe

Аналитическая зависимость взаимосвязи изменения вертикальных напряжений TOTAL S-YY в грунтовом массиве водовода от высоты грунта над ним близка к линейной с явным доминированием усилия от автомобиля на функцию отклика. При усилии в 40 т вертикальное напряжение достигает экстремума по минимуму которое составляет $350,38 \text{ кН/м}^2$ при высоте грунта над водоводом 0,82 м. При усилии в 20,25 т функция напряжений также стремится к экстремуму по минимуму, но не достигает его в пределах изменений аргумента (высоты грунта над водоводом) от 0,5 до 1,2 м.

Однако анализ графиков по функциям напряжений, приведенный в таблице 2, позволяет видеть, что с уменьшением усилий от автомобиля, находящегося над водоводом, приращения по напряжениям возрастают. Так, при усилии в 40 т приращение по функции составило $1,39 \text{ кН/м}^2$, при усилии в 20,5 т приращение составило $6,43 \text{ кН/м}^2$, а усилии в 5 т приращение по функции составило $10,06 \text{ кН/м}^2$.

Таблица 2 – Изменение значений вертикальных напряжений в контексте изменения высоты грунта над водоводом

Table 2 – Changes in the values of vertical stresses in the context of changes in the height of the soil above the conduit

Высота грунта над водоводом, м	Усилия от автомобиля на водовод, т		
	5,0	20,5	40,0
	Вертикальные напряжения, кН/м^2		
0,5	287,76	315,15	351,22
0,85	291,66	317,26	350,56
1,2	297,82	321,58	352,61

Рассмотрим постановку в математической модели высоты грунта над водоводом на следующие постоянные уровни: $F_1(0,5; y)$; $F_2(0,85; y)$; $F_3(1,2; y)$, что решает вопрос преобразования модели к видам:

$$F_1(x) = -7,1488 \cdot 10^{-4} \cdot x^2 - 1,7744 \cdot x - 279,0188;$$

$$F_2(x) = -7,1488 \cdot 10^{-4} \cdot x^2 - 1,65316 \cdot x - 283,1907;$$

$$F_3(x) = -7,1488 \cdot 10^{-4} \cdot x^2 - 1,53192 \cdot x - 290,16776.$$

Графические и аналитические интерпретации данных уравнений имеют вид, представленный на рисунке 7.

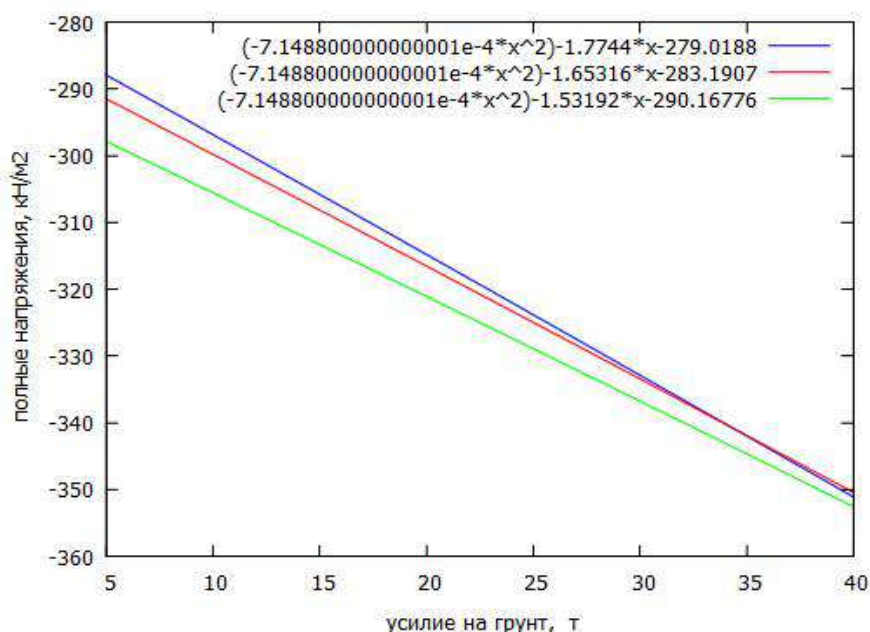


Рисунок 7 – Графики сечений по поверхности отклика при постоянных высотах грунта над водоводом

Figure 7 – Graphs of cross sections over the response surface at constant ground heights above the ground

Анализ графиков и уравнений взаимосвязи изменения вертикальных напряжений TOTAL S-YU в грунтовом массиве водовода от усилий на грунт от автомобиля показывает, что связь практически линейна. При этом при наименьшем усилии от автомобиля на водовод в 5,0 т вертикальное напряжение достигает наименьшего значения при наименьшей высоте грунта над сооружением в 0,5 м, что составляет 288,14 кН/м². При усилии на водовод в 40 т вертикальное напряжение достигает наибольшего значения при наибольшей высоте грунта над сооружением в 1,2 м, что составляет 352,55 кН/м². Более подробный анализ значений взаимосвязи изменения вертикальных напряжений TOTAL S-YU в грунтовом массиве водовода от усилий на грунт от автомобиля и высоты грунта над сооружением сведен в таблицу 3.

Таблица 3 – Изменение значений вертикальных напряжений в контексте изменения усилия от автомобиля на водовод

Table 3 – Changing the values of vertical stresses in the context of changing the forces from the car to the conduit

Усилия от автомобиля на водовод, т	Высота грунта над водоводом, м		
	0,5	0,85	1,2
	Вертикальные напряжения, кН/м ²		
5,0	288,14	291,42	298,13
20,5	315,75	317,26	322,23
40,0	351,30	350,30	352,55

Как видно из представленных в таблицах 2 и 3 расчетов значений вертикальных напряжений, последние несколько отличаются друг от друга. В таблице 4 дан расчет отклонений в вертикальных напряжениях, выраженный в процентах, при выборе постоянными одного из аргументов.

Таблица 4 – Отклонения в значениях вертикальных напряжений при выборе постоянным одного из аргументов

Table 4 – Deviations in the values of vertical stresses when choosing one of the arguments as a constant

Высота грунта над водоводом, м	Усилия от автомобиля на водовод, т		
	5,0	20,5	40,0
	отклонения в вертикальных напряжениях, при выборе постоянными одного из аргументов, %		
0,5	0,13	0,19	0,022
0,85	0,08	0,0	0,074
1,2	0,10	0,20	0,017

Анализ таблицы 4 позволяет видеть, что независимо от выбранного пути оценки вертикальных напряжений посредством выбора постоянными одного из аргументов, отклонения значений вертикальных напряжений близки или равны нулю.

Заключение. Представленный алгоритм исследований, включающий рассмотрение конкретного физического процесса, где необходимо уточнить параметры и режимы его работы, в конкретном случае напряженно-деформированного состояния грунтового массива вокруг водовода в обязательном порядке должен предусматривать численное моделирование объекта в одном из программных продуктов с использованием МКЭ.

При этом выбранная программа или должна быть многократно использована другими исследователями при решении подобных задач или верифицирована самим исследователем. Однако последний путь сложный, трудозатратный и зачастую не совпадающий с целями исследователя.

В то же самое время уже доступно большое количество программ, использующих метод конечных элементов при рассмотрении разных физических процессов, на которых возможно получение больших массивов цифр и цветовых интерпретаций их описывающих, как это представлено и в рассмотренном материале. Однако анализ как цифрового (в табличной форме), так и в цветовой интерпретации материала весьма затруднителен: во-первых, из-за большого объема, а во-вторых, из-за отсутствия аппроксимаций, нацеленных на выявление влияния факторов на процесс.

При исследовании работы сложной системы «водовод – грунтовое основание – нагрузка от автомобиля» и определении напряженно-деформированного состояния грунтового массива с использованием численного моделирования и цифрового математического анализа было установлено, что:

- значение функции отклика однозначно определяется в значительной степени усилием на водовод от автомобиля, вместе с тем функция слабо реагирует на высоту глинистого грунта над водоводом;

- с увеличением нагрузки степень воздействия на функцию отклика практически остается постоянной;

- при усилии в 40 т вертикальное напряжение достигает экстремума по минимуму которое составляет $350,38 \text{ кН/м}^2$ при высоте грунта над водоводом 0,82 м;

- при усилии в 20,25 т функция напряжений также стремится к экстремуму по минимуму, но не достигает его в пределах изменений аргумента от 0,5 до 1,2 м;

- с уменьшением усилий от автомобиля находящегося над водоводом приращения по напряжениям возрастают;

- при усилии в 40 т приращение по функции составляет $1,39 \text{ кН/м}^2$, при усилии в 20,5 т – $6,43 \text{ кН/м}^2$, а при усилии в 5 т – $10,06 \text{ кН/м}^2$;

– взаимосвязь изменения вертикальных напряжений TOTAL S-YY в грунтовом массиве водовода от усилий на грунт от автомобиля линейна;

– при наименьшем усилии от автомобиля на водовод в 5,0 т вертикальное напряжение достигает наименьшего значения при наименьшей высоте грунта над сооружением в 0,5 м, что составляет 288,14 кН/м². При усилении на водовод в 40 т вертикальное напряжение достигает наибольшего значения при наибольшей высоте грунта над сооружением в 1,2 м, что составляет 352,55 кН/м².

Решение исследовательской задачи с использованием такого алгоритма посредством применения цифрового математического анализа, способствующего обработке больших массивов цифр, получению математической модели процесса от принятых к исследованию факторов, дало возможность оценить степень влияния каждого фактора на функцию отклика путем преобразований общей математической модели. Детализация исследований путем постановки каждого из факторов на постоянные уровни позволяет сравнить полученные результаты при реализации различных подходов к функции отклика. И уже на основании этого, когда отклонения по результатам стремятся к нулевым значениям, принять ПО прошедшим валидацию и пригодным к применению, в конкретной рассмотренной задаче оценки напряженно-деформированного состояния грунтового массива вокруг водовода.

Conclusions. The presented research algorithm, which includes consideration of a specific physical process where it is necessary to clarify the parameters and modes of its operation, in the specific case of the stress-strain state of the soil mass around the water conduit, must necessarily include numerical modeling of the object in one of the software products using the finite element method.

In this case, the selected program must either be reused by other researchers when solving similar problems or verified by the researcher himself. However, the latter path is complex, labor-intensive, and often does not coincide with the researcher's goals.

At the same time, a large number of programs are already available that use the finite element method when considering various physical processes, in which it is possible to obtain large arrays of numbers and color interpretations describing them, as is presented in the material considered. However, analysis of both digital (in tabular form) and color interpretation of the material is very difficult: firstly, due to the large volume, and secondly, due to the lack of approximations aimed at identifying the influence of factors on the process.

When studying the operation of a complex system “water pipeline - soil foundation - vehicle load” and determining the stress-strain state of the soil mass using numerical modeling and digital mathematical analysis, it was found that:

– the value of the response function is uniquely determined to a large extent by the force on the water conduit from the car, however, the function weakly responds to the height of the clay soil above the water conduit;

– with increasing load, the degree of influence on the response function remains practically constant;

– with a force of 40 tons, the vertical stress reaches an extreme minimum, which is 350.38 кН/м² with a soil height above the water conduit of 0.82 m;

– with a force of 20.25 tons, the stress function also tends to an extremum at a minimum, but does not reach it within the range of argument changes from 0.5 to 1.2 m.

– with a decrease in the forces from the car located above the conduit, the stress increases increase;

– with a force of 40 t, the increment in function is 1.39 кН/м², with a force of 20.5 t – 6.43 кН/м², and with a force of 5 t – 10.06 кН/м²;

– the relationship between the change in vertical stresses TOTAL S-YY in the soil mass of the water conduit and the forces on the ground from the car is linear;

– with the least force from the car on the water pipeline of 5.0 t, the vertical stress reaches its lowest value at the lowest height of the soil above the structure of 0.5 m, which is 288.14 кН/м². With a force on the conduit of 40 tons, the vertical stress reaches its greatest value at the highest height of the soil above the structure of 1.2 m, which is 352.55 кН/м².

Solving a research problem using such an algorithm through the use of digital mathematical analysis, which facilitates the processing of large arrays of numbers, obtaining a mathematical model of the process from the factors accepted for research. It made it possible to assess the degree of influence of each factor on the response function by transforming the general mathematical model. Detailing the research by setting each of the factors to constant levels makes it possible to compare the results obtained when implementing different approaches to the response function and, based on this, when deviations in the results tend to zero values, accept the software as validated and suitable for use, in specific considered problem of assessing the stress-strain state of the soil mass around the water conduit.

Библиографический список

1. Абдразаков Ф. К., Дегтярев В. Г., Коженко Н. В. Анализ основания мелиоративной плотины при работе в напорно-переменном режиме // Аграрный научный журнал. 2021. № 8. С. 82-86.
2. Абдразаков Ф. К., Панкова Т. А., Щербаков В. А. Факторы, влияющие на эксплуатационное состояние гидротехнических сооружений // Аграрный научный журнал. 2016. № 10. С. 56-61.
3. Абдразаков Ф. К., Дегтярев В. Г., Дегтярев Г. В. Цифровое моделирование и анализ перемещения основания гидромелиоративной плотины в перспективной технологии формирования ресурсов воды // Аграрный научный журнал. 2022. № 6. С. 82-87.
4. Бандурин М. А. Совершенствование методов проведения эксплуатационного мониторинга и определения остаточного ресурса водопроводящих сооружений // Мелиорация и гидротехника. 2013. № 1 (09). С. 68-79.
5. Безопасность сооружений инженерной защиты долины реки Псекупс с учетом изменившихся во времени нагрузок и воздействий / В. А. Волосухин [и др.] // Природообустройство. 2022. № 5. С. 52-59.
6. Васильев С. М. Водосберегающие технологии орошения и рациональное использование водных ресурсов в АПК России // Современные проблемы развития мелиорации и пути их решения (Костяковские чтения). 2020. С. 6-11.
7. Дегтярев Г. В., Свистунов Ю. А. Низконапорные гидроциклоны-осветлители вод поверхностного стока. 2005.
8. Дегтярева О. Г., Васильев С. М. Численное моделирование и исследование напряженно-деформированного состояния основания плотины сезонного регулирования // Мелиорация и гидротехника. 2021. Т. 11. № 2. С. 92-110.
9. Информационные технологии и математическое моделирование при проектировании берегозащитных сооружений / Т. Ю. Хаширова [и др.] // Экология и промышленность России. 2019. Т. 23. № 9. С. 13-17.
10. Моделирование и расчет железобетонных конструкций здания в программном комплексе STARK ES / Г. В. Дегтярев [и др.]. 2018.
11. Моделирование напряженно-деформированного состояния водопроводящих сооружений на примере гидроузла Сальского водохранилища / М. А. Бандурин [и др.] // Современные наукоемкие технологии. 2016. № 8-1. С. 22-26.
12. Моторная Л. В., Хаджиди А. Е. Рациональное водопользование и экологическая безопасность оросительных систем // Международный сельскохозяйственный журнал. 2022. № 2 (386). С. 161-164.
13. Применение численного моделирования для расчета ветрового волнения на Крюковском водохранилище / И. А. Приходько [и др.] // Мелиорация и гидротехника. 2023. Т. 13. № 2. С. 353-378.
14. Экспериментальное исследование механических свойств низового клина низконапорной дамбы в условиях повышения уровня паводковых вод / М. А. Бандурин, В. А. Волосухин, И. А. Приходько, А. Ю. Вербицкий // Construction and Geotechnics. 2023. Т. 14, № 1. С. 111-122.
15. 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. IOP Publishing, 2020. V. 913. № 2. P. 022050.

16. Olgarenko V. I., Khashirova T. Y., Kozhenko N. V. Assessment of the damage impact to particular water structures on their performance // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2020. Vol. 913. № 2. P. 022054.

17. Resource-saving technologies and some proposals for the creation of automated reclamation systems / Z. G. Lamerdonov [et al.] // Ecology and Industry of Russia. The link is disabled. 2021. Vol. 25. № 7. P. 8-12.

References

1. Abdrazakov F. K., Degtyarev V. G., Kozhenko N. V. Analysis of the foundation of a reclamation dam when operating in a pressure-variable mode // Agrarian Scientific Journal. 2021. No. 8. pp. 82-87.

2. Abdrazakov F. K., Pankova T. A., Shcherbakov V. A. Factors influencing the operational condition of hydraulic structures // Agrarian Scientific Journal. 2016. No. 10. pp. 56-61.

3. Abdrazakov F. K., Degtyarev V. G., Degtyarev G. V. Digital modeling and analysis of the movement of the foundation of a hydro-reclamation dam in a promising technology for the formation of water resources // Agrarian Scientific Journal. 2022. No. 6. pp. 82-87.

4. Bandurin M. A. Improvement of methods of operational monitoring and determination of the residual resource of water supply facilities // Melioration and hydraulic engineering. 2013. No. 1 (09). pp. 68-79.

5. Safety of engineering protection structures of the Psekups River valley taking into account loads and impacts that have changed over time / V. A. Volosukhin [et al.] // Nature management. 2022. No. 5. pp. 52-59.

6. Vasiliev S. M. Water-saving irrigation technologies and rational use of water resources in the agro-industrial complex of Russia // Modern problems of melioration development and ways to solve them (Kostyakovsky readings). 2020. pp. 6-11.

7. Degtyarev G. V., Svistunov Yu. A. Low-pressure hydrocyclones-clarifiers of surface runoff waters. 2005.

8. Degtyareva O. G., Vasiliev S. M. Numerical modeling and investigation of the stress-strain state of the foundation of the dam of seasonal regulation // Land reclamation and hydraulic engineering. 2021. Vol. 11. No. 2. pp. 92-110.

9. Information technologies and mathematical modeling in the design of coastal protection structures / T. Y. Hashirova [et al.] // Ecology and industry of Russia. 2019. Vol. 23. No. 9. pp. 13-17.

10. Modulating and calculating baton concrete equipment in the STARK ES software package / G. V. Degtyarev [et al.]. 2018.

11. Modeling of the stress-strain state of water supply structures on the example of the Salsky reservoir hydroelectric unit / M. A. Bandurin [et al.] // Modern high-tech technologies. 2016. No. 8-1. pp. 22-26.

12. Motornaya L. V., Hadjidi A. E. Rational water use and ecological safety of irrigation systems // International Agricultural Journal. 2022. No. 2 (386). pp. 161-164.

13. Application of numerical modeling for calculating wind waves at the Kryukovsky reservoir / I. A. Prikhodko [et al.] // Melioration and hydraulic engineering. 2023. Vol. 13. No. 2. pp. 353-378.

14. Experimental study of the mechanical properties of the bottom wedge of a low-pressure dam in conditions of rising flood water levels / M. A. Bandurin, V. A. Volosukhin, I. A. Prikhodko, A. Yu. Verbitsky // construction and geotechnics. 2023. Vol. 14, No. 1. pp. 111-122.

15. Hashirova T. Yu., Olgarenko I. V., Kozhenko N. V. Analysis of the influence of structures and models for designing soil foundations of applied software complexes // IOP Conference series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing House, 2020. Vol. 913. No. 2. p. 022050.

16. Olgarenko V. I., Hashirova T. Yu., Kozhenko N. V. Assessment of the impact of damage to specific hydraulic structures on their operational characteristics // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing House, 2020. Vol. 913. No. 2. p. 022054.

17. Resource-saving technologies and some proposals for the creation of automated reclamation systems / Z. G. Lamerdonov [et al.] // Ecology and Industry of Russia. The link is disabled. 2021. Vol. 25. No. 7. pp. 8-12.

Информация об авторах

Дегтярев Владимир Георгиевич, кандидат технических наук, доцент кафедры Гидравлики и сельскохозяйственного водоснабжения факультета гидромелиорации, ФГБОУ ВО Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина (РФ, 350044, Краснодарский край, г. Краснодар, ул. им. Калинина, д. 13), тел.: +78612215860, e-mail: cst2007@mail.ru

Дегтярев Георгий Владимирович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Строительного производства Архитектурно-строительного факультета, ФГБОУ ВО Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина (РФ, 350044, Краснодарский край, г. Краснодар, ул. им. Калинина, д. 13), тел.: +78612215915, e-mail: degtyarev.g.v@mail.ru

Дегтярева Ольга Георгиевна, доктор технических наук, доцент кафедры Строительного производства Архитектурно-строительного факультета, ФГБОУ ВО Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина (РФ, 350044, Краснодарский край, г. Краснодар, ул. им. Калинина, д. 13), тел.: +78612215915, e-mail: marxotgeo@mail.ru

Authors Information

Degtyarev Vladimir Georgievich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Hydraulics and Agricultural Water Supply faculty of hydro-reclamation, Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin (Russian Federation, 350044, Krasnodar Krai, Krasnodar, Kalinin str., 13), tel.: +78612215860, e-mail: cst2007@mail.ru

Degtyarev Georgy Vladimirovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Construction Production Faculty of Architecture and Civil Engineering Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin (Russian Federation, 350044, Krasnodar Krai, Krasnodar, Kalinin str., 13), tel.: +78612215915, e-mail: degtyarev.g.v@mail.ru

Degtyareva Olga Georgievna, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction Production Faculty of Architecture and Civil Engineering Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin (Russian Federation, 350044, Krasnodar Krai, Krasnodar, Kalinin str., 13), tel.: +78612215915, e-mail: marxotgeo@mail.ru

DOI: 10.32786/2071-9485-2023-03-54

CORRECTION OF WATER ACIDITY AND CONCENTRATION OF OXYGEN DISSOLVED IN WATER IN CLOSED WATER SUPPLY INSTALLATIONS

A. P. Evdokimov, V. I. Komarova, A. A. Cherniaev

*Volgograd State Agrarian University
Volgograd, Russian Federation*

Received 23.05.2023

Submitted 04.07.2023

Corresponding author E-mail: apevdokimov@yandex.ru

The research was carried out within the framework of the postgraduate training program in the department "Electrical equipment and electrical equipment of agricultural enterprises" of the Volgograd State Agrarian University on a budgetary basis

Summary

The article presents the results of a research of the rate of change in the pH level and the maximum pH values when soda is added to distilled water and water from fish production. The dependences of the change in the concentration of dissolved oxygen in water on the change in the volume of supplied air are obtained.

Abstract

Introduction. The most important chemical parameters of water in recirculating water supply installations are the level of water acidity and the concentration of oxygen dissolved in water. They have a significant impact on the growth and development of fish and require special attention. During stable operation, the system can independently maintain the pH level, but if emergency situations occur, the water can change the pH in an acidic direction to values dangerous for fish. Baking soda can restore the optimal PH level during acidification. It not only makes it possible to raise the pH to the alkaline