

**Е.О. Тарасенко***Северо-Кавказский федеральный университет,
г. Ставрополь, Российская Федерация***Г.В. Тарасенко***Северо-Кавказский федеральный университет,
г. Ставрополь, Российская Федерация*

Численное моделирование мощности заряда в математической модели уплотнения гидровзрывом просадочных грунтов

Аннотация. Просадочные грунты имеют значительное территориальное распространение в мире. Они зафиксированы в России, Китае, странах Средней Азии и др. Обладают большой мощностью залегания, которая может достигать 50 м, в отдельных территориях и до 100 м. Устранение просадочности грунтов является актуальным исследованием теории и практики. Позволяет увеличить длительность эксплуатации и прочность зданий, сооружений. Реализуется на этапе их проектировании и возведении. Актуальность работы обусловлена необходимостью предварительного математического исследования уплотнения просадочных грунтов глубинными гидровзрывами для снижения временных и экономических затрат. В рамках математического моделирования уплотнения грунтов возникает обратная задача — оценка мощности заряда взрывчатого вещества. Мощность заряда зависит от физических и плотностных свойств грунтов. Одним из которых является коэффициент диффузии атомов газа, образуемого при гидровзрыве, в грунте. Определить его значение не представляется возможным в полевых условиях. Цель работы: методом аппроксимационных полиномов численно оценить мощность заряда взрывчатого вещества, зависящую от физических и плотностных свойств грунта, при уплотнении гидровзрывом просадочных геологических систем. Для достижения цели использованы методы математического и численного моделирования. Математическая модель глубинного уплотнения гидровзрывом геологической системы описывается начально-граничной задачей с дифференциальным пространственным параболическим уравнением в частных производных. Построение решения модели реализовано на основе применения аппарата аппроксимационных полиномов, описывающих коэффициенты диффузии. В рамках математического моделирования инженерно-геологического процесса уплотнения гидровзрывом решена обратная задача оценки мощности заряда взрывчатого вещества методом аппроксимации пространственных координат. Решение учитывает физические и плотностные свойства геологической системы. Реализовано численное моделирование мощности заряда взрывчатого вещества при различных значениях плотности уплотнённого грунта. Проведён вычислительный эксперимент численной оценки мощности заряда, который показал адекватность экспериментальным данным.

Ключевые слова. Просадочный грунт, уплотнение, глубинный гидровзрыв, мощность заряда, аппроксимация, численное моделирование.

Информация о статье. Дата поступления: 1 марта 2026; дата принятия к публикации: 15 мая 2026 г.; дата онлайн-размещения: 29 июня 2026 г.

Original article

E.O. Tarasenko*North Caucasus Federal University,
Stavropol, Russian Federation***G.V. Tarasenko***North Caucasus Federal University,
Stavropol, Russian Federation*

Numerical Modeling of Charge Power in a Mathematical Model of Compaction of Subsidence Soils by Hydraulic Blasting

Abstract. Subsidence soils are widely distributed throughout the world. They have been recorded in Russia, China, Central Asian countries, and elsewhere. They have a significant depth, reaching 50 meters, and in some areas, up to 100 meters. Eliminating soil subsidence is a topical research topic in both theory and practice. It helps increase the service life and durability of buildings and structures, and is implemented during their design and construction stages. The relevance of this work stems from the need for a preliminary mathematical study of compaction of subsidence soils using deep hydraulic blasts to reduce time and cost. Mathematical modeling of soil compaction raises the inverse problem of estimating the explosive charge strength. The charge strength depends on the physical and density properties of the soil, one of which is the diffusion coefficient of gas atoms generated during hydraulic blasting in the soil. Determining this value in the field is not possible. The objective of this study is to numerically estimate the explosive charge power, dependent on the physical and density properties of the soil, during hydraulic compaction of subsidence geological systems using the approximation polynomial method. Mathematical and numerical modeling methods were employed to achieve this goal. The mathematical model of deep compaction of a geological system by hydraulic blasting is described by an initial-boundary value problem with a spatial parabolic partial differential equation. The solution to the model is constructed using approximation polynomials describing the diffusion coefficients. As part of the mathematical modeling of the engineering-geological process of hydraulic compaction, the inverse problem of estimating the explosive charge power is solved using the spatial coordinate approximation method. The solution takes into account the physical and density properties of the geological system. Numerical modeling of the explosive charge power is implemented for various values of compacted soil density. A computational experiment for the numerical estimate of the charge power has been conducted, which has demonstrated its adequacy to the experimental data.

Keywords. Subsidence soil, compaction, deep hydraulic blasting, charge power, approximation, numerical modeling.

Article info. Received 10 March, 2026; Accepted 15 May, 2026; Available online 29 June, 2026.

Введение

Исследование геологических систем показало значительное распространение на поверхности земной коры структурно-неустойчивых грунтов¹ [1; 2]. Они охватывают не менее 17 % территории России. Преобладают на юге страны в Южном и Северо-Кавказском федеральных округах, Крыме и других регионах [1;

¹ Geological World Atlas. Scale: 1:10 000 000 / G. Choubert, A. Faure-Muret (general coordinators). Paris: CGMW, UNESCO. 1981.

3]. Структурно-неустойчивые грунты являются пылевато-глинистыми. Обладают свойством просадочности². Их мощность в среднем достигает 50 метров (на отдельных территориях до 100 м). Просадочные грунты имеют макропоры, позволяющие воде проникать в их структуру, что приводит к размоканию и неравномерным деформациям в виде просадок. Величина расчётной просадки от собственного веса достигает 2,5 м [4; 5].

Возведение безопасных зданий и сооружений на просадочных грунтах не выполнимо [6]. Указанные геологические системы требуют предварительного устранения их просадочности, уплотнения. Решение описанной инженерно-геологической задачи уплотнения грунтов реализуемо различными методами и способами [7]. Одним из которых является метод глубинного уплотнения грунтов гидровзрывом [3; 8–11]. При его реализации происходит диффузионное взаимодействие газа, образуемого в результате взрыва взрывчатого вещества в скважине, и окружающего его грунта.

Моделирование диффузионного взаимодействия соприкасающихся сред, имеет широкое применение в различных инженерно-технологических процессах геологических систем: формирование вертикальных песчаных дренажей [10]; давление грунта на вертикальные гибкие подземные конструкции [12]; многофункциональные геотехнические системы [13] и т.д.

Практическая реализация уплотнения просадочных грунтов взрывом производится эмпирически, основываясь на предыдущих опытах [3; 6]. Предварительное (на этапе проектирования зданий и сооружений на просадочных грунтах) математическое моделирование процесса уплотнения просадочной геологической системы является актуальной инженерно-технологической задачей. Математическая модель грунта может быть задана пространственным параболическим уравнением с заданными начальными и граничными условиями [14]. Математическое описание инженерно-геологического процесса на основе аппарата дифференциальных уравнений в частных производных предложено в работе [15], в которой указаны особенности построения математической модели уплотняемых гидровзрывом грунтов. Исследование плотностных и прочностных свойств грунтов позволяет прогнозировать поведение уплотняемой геологической системы в зависимости от физических характеристик грунтов [15–17]. Такие модели порождают обратные задачи в рамках исследуемой геологической системы.

Обратные задачи, возникающие в контексте указанной математической модели, имеют значительное прикладное практическое значение. Решена задача численного моделирования глубины заложения заряда взрывчатого вещества при уплотнении проса-

² ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация. М.: Изд-во стандартов, 2020. 42 с.

дочных грунтов гидровзрывом [18]. Исследованы дисперсионные изменения атомов газа в грунтах [19].

В рамках математического моделирования уплотнения грунтов гидровзрывом возникает обратная прикладная задача оценки мощности заряда взрывчатого вещества. Для её решения необходимо определить значения коэффициента вертикальной диффузии газа в грунте, которые полевыми методами измерить не представляется возможным. Газ после взрыва взаимодействует с грунтом, разрушает его структуру и сгорает, реализуя уплотнение грунта. Осуществим решение обратной задачи (оценка мощности заряда) на основе применения аппарата аппроксимационных полиномов для коэффициента диффузии в математической модели уплотнения гидровзрывом просадочных грунтов.

Объект исследования

Устранение просадочности грунтов глубинным гидровзрывом математически опишем дифференциальным пространственным параболическим уравнением в частных производных [15]

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \sum_{i=1}^3 u_i \frac{\partial q}{\partial x_i} = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} \left(K_{ij} \frac{\partial q}{\partial x_j} \right), \quad t \in [t_0, T], \quad (1)$$

где $q = q(t, x_1, x_2, x_3)$ г/см³ — плотность уплотняемого гидровзрывом грунта, в единицу времени $t \in [t_0, T]$ с в точке с пространственными координатами (x_1, x_2, x_3) ; (u_1, u_2, u_3) — координаты вектора сноса; K_{ij} — коэффициенты диффузионного взаимодействия элементов системы.

Уравнение (1) описывает диффузионные изменения анизотропной геологической системы. Предположим, что коэффициент взаимодействия атомов газа, образуемого в результате гидровзрыва, с частицами грунта $\alpha(t) = 0$ (не взаимодействуют) и атомы газа не разлагаются.

Пусть вектор $U(u_1, u_2, u_3)$ принимает постоянные значения $U = \text{const}$. Коэффициенты диффузионного взаимодействия

$$K_{11} = K_{22} = K_0 U = \text{const}, \quad (2)$$

а K_{33} дважды непрерывно дифференцируемая функция одного аргумента x_3 : $K_{33} = K(x_3)$.

Математическая модель анизотропной геологической системы включает параболическое уравнение в частных производных (1) и совокупность начально-граничных условий.

Зададим начальное условие выражением:

$$q(0, x_1, x_2, x_3) = Q \delta(x_1) \delta(x_2) \delta(x_3 - H), \quad Q = \text{const} \quad (3)$$

где Q — мощность заряда взрывчатого вещества, z ; H — глубина его заложения, см; δ — дельта-функция Дирака, которая позволяет записать точечное воздействие, а также пространственную плотность.

Граничное условие на бесконечности определим в виде:

$$q(t, x_1, x_2, x_3) \rightarrow 0, \text{ при } x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 \rightarrow \infty, x_3 \geq 0. \quad (4)$$

Начально-граничная задача (1), (3), (4) является математической моделью [15], описывающей геологическую систему при уплотнении просадочных грунтов гидровзрывом по методу И.М. Литвинова [6; 3]. Построим решение задачи (1), (3), (4) методом аппроксимационных полиномов.

Метод аппроксимационных полиномов

Компоненты решения начально-граничной задачи (1), (3), (4) обозначим через $q_1(t, x_1)$, $q_2(t, x_2)$, $q_3(t, x_3)$. Исследуем по координатно анизотропную геологическую систему. Решение задачи (1), (3), (4) представим агрегированием компонент в виде:

$$q(t, x_1, x_2, x_3) = q_1(t, x_1) \cdot q_2(t, x_2) \cdot q_3(t, x_3). \quad (5)$$

Компоненты $q_1(t, x_1)$ и $q_2(t, x_2)$ согласно решению параболических уравнений в частных производных имеют вид [14]:

$$q_1(t, x_1) = \frac{Q}{2\sqrt{\pi K_{11}(t-t_0)}} \cdot \exp \left\{ -\frac{(x_1 - U(t-t_0))^2}{4K_{11}(t-t_0)} \right\}, \quad (6)$$

$$q_2(t, x_2) = \frac{1}{2\sqrt{\pi K_{22}(t-t_0)}} \cdot \exp \left\{ -\frac{x_2^2}{4K_{22}(t-t_0)} \right\}. \quad (7)$$

Учитывая, что K_{33} дважды непрерывно дифференцируемая функция одного аргумента x_3 , сделаем предположение, что она удовлетворяет условию

$$K''(x_3) = 0. \quad (8)$$

Произведём замену этой функции аппроксимационным полиномом [20]

$$K(x_3) = c_1 x_3 + c_2, \quad (9)$$

где c_1 , c_2 — произвольные константы, $c_1 \geq 0$. Если выполняется условие (9), то компонента $q_3(t, x_3)$ решения начально-граничной задачи (1), (3), (4) сводится к представлению

$$q_3(t, x_3) = \frac{1}{2\sqrt{\pi t}} \cdot \exp \left\{ -\frac{(\sqrt{2c_1 x_3 + 2c_2} - \sqrt{2c_1 H + 2c_2})^2}{2c_1^2 t} \right\}. \quad (10)$$

Таким образом, подставляя (6), (7), (10) в (5), найдём решение $q(t, x_1, x_2, x_3)$ задачи (1), (3), (4) (с учётом предположения о выполнении условия (8)).

Факт, что c_1, c_2 произвольные константы, благоприятствует практической реализации аппроксимации $K(x_3)$ (приведение $K(x_3)$ к виду (9)) [20].

Тогда агрегированное решение (5) задачи (1), (3), (4) примет вид:

$$\begin{aligned} q(t, x_1, x_2, x_3) &= q_1(t, x_1) \cdot q_2(t, x_2) \cdot q_3(t, x_3) = \\ &= \left(\frac{Q}{2\sqrt{\pi K_{11}(t-t_0)}} \cdot \exp \left\{ -\frac{(x_1 - U(t-t_0))^2}{4K_{11}(t-t_0)} \right\} \right) \times \\ &\times \left(\frac{1}{2\sqrt{\pi K_{22}(t-t_0)}} \cdot \exp \left\{ -\frac{x_2^2}{4K_{22}(t-t_0)} \right\} \right) \times \\ &\times \left(\frac{1}{2\sqrt{\pi t}} \cdot \exp \left\{ -\frac{(\sqrt{2c_1 x_3 + 2c_2} - \sqrt{2c_1 H + 2c_2})^2}{2c_1^2 t} \right\} \right). \end{aligned} \quad (11)$$

Полученное решение (11) начально-граничной задачи с пространственным параболическим уравнением в частных производных позволяет оценить плотность грунта $q = q(t, x_1, x_2, x_3)$ в результате его уплотнения гидровзрывом. А также может быть использовано для решения некоторых обратных задач в рамках математического моделирования уплотнения геологических систем.

Решение задачи оценки мощности заряда

Опишем обратную задачу, возникающую при математическом моделировании уплотнения анизотропных геологических систем, построение решения которой допускает применение метода аппроксимационных полиномов.

Вычислим мощность заряда взрывчатого вещества Q . Физические параметры геологической системы известны: плотность грунта q , коэффициенты диффузионного взаимодействия K_{11}, K_{22} . Коэффициенты аппроксимационного полинома c_1, c_2 определяются из условия минимизации отклонения значений приближающего многочлена от значений физических показателей геологической системы.

Оценку мощности заряда Q методом аппроксимаций реализуем исходя из решения уравнения, построенного на основе вышеприведённых математических выкладок. Плотностное уравнение, составленное из агрегированного представления (11), запишем в виде

$$q - \left(\frac{Q}{2\sqrt{\pi K_{11}(t-t_0)}} \cdot \exp \left\{ -\frac{(x_1 - U(t-t_0))^2}{4K_{11}(t-t_0)} \right\} \right) \times \\ \times \left(\frac{1}{2\sqrt{\pi K_{22}(t-t_0)}} \cdot \exp \left\{ -\frac{x_2^2}{4K_{22}(t-t_0)} \right\} \right) \times \\ \times \left(\frac{1}{2\sqrt{\pi t}} \cdot \exp \left\{ -\frac{(\sqrt{2c_1 x_3 + 2c_2} - \sqrt{2c_1 H + 2c_2})^2}{2c_1^2 t} \right\} \right) = 0.$$

Решение задачи оценки мощности заряда взрывчатого вещества при уплотнении просадочных грунтов глубинными взрывами определяется соотношением:

$$Q = 8\pi q \sqrt{\pi t K_{11}(t-t_0) K_{22}(t-t_0)} \times \\ \times \exp \left(\frac{(x_1 - U(t-t_0))^2}{4K_{11}(t-t_0)} + \frac{x_2^2}{4K_{22}(t-t_0)} \right) \times \\ \times \exp \left(\frac{(\sqrt{2c_1 x_3 + 2c_2} - \sqrt{2c_1 H + 2c_2})^2}{2c_1^2 t} \right). \quad (12)$$

Мощность заряда взрывчатого вещества Q зависит от плотности грунта $q = q(t, x_1, x_2, x_3)$ в единицу времени $t \in [t_0, T]$ в точке с пространственными координатами (x_1, x_2, x_3) , коэффициентов горизонтальной диффузии K_{11} и K_{22} , вектор сноса U , констант c_1, c_2 , глубины заложения взрывчатого вещества в скважину H . При значениях констант $c_1 = 1$ и $c_2 = 0,5$ происходит уплотнение грунтов взрывом без выброса на поверхность.

Вычислительный эксперимент

Реализуем оценку мощности заряда на примере практической реализации глубинного уплотнения просадочных грунтов взрывом на объекте гражданского строительства.

Осуществим расчёты на основе экспериментальных значений, представленных в работе Б.Ф. Галая [3]. На строительном объекте «Прикумский завод пластмасс» (7-й микрорайон г. Будённовска Ставропольского края) проведено гидровзрывное уплотнение просадочной толщи. Коэффициенты диффузионного взаимодействия $K_{11} = K_{22} = 0,664$, определяются представлением (2), учитывающим характеристики геологической системы. Параметр горизонтального распространения газа, вектор сноса $U = \text{const}$ принимает постоянные значения и зависит от сетки расположения буровзрывных скважин. На строительной площадке скважины располагались по сетке 500x500 см. Уплотнение взрывом происходит в условиях полного поглощения газа окружающим его грунтом. Экспериментальная глубина заложения взрывчатого вещества $H = 600$ см. Мощность заряда составляла $Q = 5000$ г. Через 4 месяца (после естественного осушения котлована) пробурили 3 скважины глубиной до 1200 см, с отбором монолитов. В табл. 1 приведены значения показателей плотности и влажности уплотнённого грунта.

Таблица 1

Физические характеристики уплотнённого грунта [3]

Глубина, см	Влажность, %	Плотность скелета грунта, г/см ³
300	13,4	1,80
400	14,2	1,77
450	18,1	1,65
500	13,8...14,2	1,62...1,70
600	12,1...14,1	1,61...1,65
700	14,8...15,0	1,61...1,65
800	17,3...17,4	1,61...1,62
900	15,7...17,0	1,63...1,75
1000	17,4	1,75
1100	15,3...16,5	1,61...1,68
1200	15,7	1,64

Оценим мощность Q сосредоточенного заряда взрывчатого вещества по формуле (12) с помощью программы, разработанной на языке программирования Python [21]. Константы $c_1 = 1$ и $c_2 = 0,5$ — уплотнение грунта без выброса на поверхность.

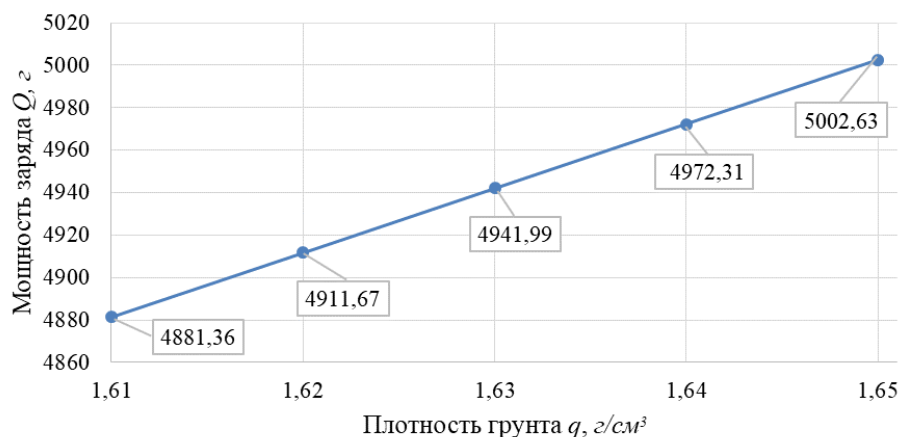
В табл. 2 приведены результаты вычислительного эксперимента расчёта мощности заряда взрывчатого вещества при различных значениях плотности уплотнённого грунта и глубины его заложения $H = 600$ см.

На рис. 1 приведено графическое представление реализации вычислительного эксперимента, по численной оценке, значений мощности заряда Q при различных показателях плотности грунта.

Таблица 2

**Мощности заряда взрывчатого вещества
при различных значениях плотности уплотнённого грунта**

Плотность скелета грунта, г/см ³	Мощность заряда, г
1,61	4881,36
1,62	4911,67
1,63	4941,99
1,64	4972,31
1,65	5002,63



***Расчётные значения мощности заряда Q
при различных значениях плотности грунта q***

Проанализируем результат вычислительного эксперимента показанный на рисунке 1. Получена оценка мощности заряда взрывчатого вещества $Q = 5002,63$ г, необходимая для достижения указанной в таблице 1 плотности грунта $q = 1,65$ г/см³. При уплотнении грунтов взрывом полученные значения Q соответствуют случаю полного поглощения газа, окружающим его грунтом, без выброса грунта на поверхность.

Отклонение расчётных и экспериментальных значений возникает в результате погрешности метода аппроксимации. Проведённые вычисления подтверждают адекватность численных расчётов экспериментальным данным.

Предложенный подход аппроксимации в математической модели уплотнения взрывом геологических систем может быть использован на этапе проектирования зданий и сооружений на просадочных грунтах. Математический расчёт мощности заряда позволит избежать пробных натурных взрывов (на отдельной экспериментальной части площадки) с целью подбора мощности зарядов взрывчатого вещества для достижения требуемой плотности

грунта, тем самым значительно сократить время проведения инженерно-технологического процесса уплотнения грунтов на всей строительной площадке и снизить финансовые затраты на буровые, взрывные работы, замачивание площадки.

Выводы

Проведено математическое моделирование инженерно-геологической системы при реализации глубинного уплотнения просадочных грунтов гидровзрывом. Указаны особенности конструирования и построено решение обратной задачи оценки мощности заряда взрывчатого вещества, методом аппроксимационных полиномов. Мощность заряда зависит от физических свойств грунта. Для определения коэффициентов диффузии производится их замена аппроксимационными полиномами. Проведён вычислительный эксперимент по численной оценке мощности заряда взрывчатого вещества, который продемонстрировал адекватность предложенного математического подхода экспериментальным данным. Результаты исследования могут быть применены при проектировании зданий и сооружений на просадочных грунтах. Предварительный математический расчёт мощности заряда сокращает время и финансовые затраты при реализации уплотнения геологических систем гидровзрывом.

Список использованной литературы

1. Трофимов В.Т. Опорные инженерно-геологические разрезы лессовых пород Северной Евразии / В.Т. Трофимов, С.Д. Балыкова, Т.В. Андреева. — Москва : КДУ, 2008. — 607 с. — EDN QKGVKL.
2. Li Y. A Review of Shear and Tensile Strengths of the Malan Loess in China / Y. Li. — DOI 10.1016/j.enggeo.2017.02.023 // Engineering Geology. — 2018. — Vol. 236. — P. 4–10.
3. Галай Б.Ф. Уплотнение просадочных грунтов глубинными взрывами / Б.Ф. Галай. — Ставрополь : Сервисшкола, 2015. — 240 с.
4. Braja M. Das. Advanced Soil Mechanics / Braja M. Das. — New York : Taylor & Francis Group, 2019. — 734 p.
5. Галай О.Б. Буденновск: геология и город / О.Б. Галай. — Ставрополь : Сервисшкола, 2022. — 318 с.
6. Литвинов И.М. Укрепление и уплотнение просадочных грунтов в жилищном и промышленном строительстве / И.М. Литвинов. — Киев : Будивельник. 1977. — 288 с.
7. Пантюшина Е.В. Лёссовые грунты и инженерные методы устранения их просадочных свойств / Е.В. Пантюшина. — EDN MSAYPU // Ползуновский вестник. — 2011. — № 1. — С. 127–130.
8. Ivanov P.L. Compaction of Cohesion Loess Soils by Explosives / P.L. Ivanov // Proceedings of the VI International Conference “Soil Mechanics and Foundation Engineering”. — Monreal, 1966. — Vol. 3. — P. 352–354.
9. Liman A.K. Compaction of Cohesion Less Foundation Soils by Explosives / A.K. Liman // Civil Engineering. — 1940. — Vol. 10, iss. 4. — P. 9–15.

10. Dembicki E. Consolidation of organic subsoil's by applying underground explosions for formations of vertical sands drains and generating dynamic overloading / E. Dembicki, N. Kisielowa, R. Bona, R. Imiolek, A. Michowski, I. Semrau // Proceedings 9th International. Harbor Congress. — Antwerp, 1988. — P. 5165–5170.
11. Dynamic Consolidation of Organic Subsoil's by use of Hidden Underground Explosions / E. Dembicki, N. Kisielowa, R. Bona [et al.] // Proceedings of the II Baltic Conference S. M. F. E. — Tallinn, 1988. — P. 273–277.
12. Keykhosropour L. Experimental Studies of Seismic Soil Pressures on Vertical Flexible, Underground Structures and Analytical Comparisons / L. Keykhosropour, A. Lemnitzer. — DOI 10.1016/j.soildyn.2018.12.012 // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. — 2019. — Vol. 118. — P. 166–178.
13. Dynamic response of a geotechnical rigid model container with absorbing boundaries / D. Lombardi, S. Bhattacharya, F. Scarpa, M. Bianchi. — DOI 10.1016/j.soildyn.2014.09.008 // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. — 2015. — Vol. 69. — P. 46–56.
14. Фридман А. Уравнения с частными производными параболического типа / А. Фридман. — Москва : Мир, 1968. — 428 с.
15. Тарасенко Е.О. Оценка плотностных свойств уплотняемой гидровзрывом геологической системы средствами численного моделирования / Е.О. Тарасенко. — EDN HEEFQJ // International Journal of Open Information Technologies. — 2025. — Т. 13, № 9. — С. 75–81.
16. Интерпретация прочностных характеристик грунта для численных исследований / А.А. Петраков, А.Ю. Прокопов, Н.А. Петракова, М.Д. Панасюк. — EDN FPBBPK // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. — 2021. — № 1. — С. 225–236.
17. Tarasenko E.O. Mathematical Modeling of the Strength Properties of Lesses by the Method of Correlation-Regression Analysis / E.O. Tarasenko. — DOI 10.22337/2587-9618-2024-20-1-171-181. — EDN UWBHLT // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. — 2024. — Vol. 20, iss. 1. — P. 171–181.
18. Тарасенко Е.О. Численное решение обратных задач при математическом моделировании геологических систем / Е.О. Тарасенко, А.В. Гладков. — DOI 10.18799/24131830/2022/1/3208. — EDN XFHDMD // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2022. — Т. 333, № 1. — С. 105–112.
19. Tarasenko E.O. Numerical Simulation of Gas Atom Coordinate Dispersion in a Mathematical Model of Deep Blast Compaction for Subsidence Soils / E.O. Tarasenko. — DOI 10.22337/2587-9618-2023-19-1-147-154. — EDN VEWCBW // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. — 2023. — Vol. 19, iss. 1. — P. 147–154.
20. Самарский А.А. Численные методы решения обратных задач математической физики / А.А. Самарский, П.Н. Вабищевич. — Изд. 3-е. — Москва : Изд-во ЛКИ, 2009. — 480 с.
21. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024617100 Российская федерация. Программа расчёта мощности заряда методом аппроксимации при уплотнении просадочных грунтов взрывом / Е.О. Тарасенко; заявитель и правообладатель Северо-Кавказский федеральный университет. № 2024615124; заявл. 14.03.2024; опубл. 28.03.2024.

References

1. Trofimov V.T., Balykova S.D., Andreeva T.V. *Reference engineering-geological sections of loess rocks of Northern Eurasia*. Moscow, University Book House Publ., 2008. 607 p. EDN: QKGVKL.

2. Li Y. A Review of Shear and Tensile Strengths of the Malan Loess in China. *Engineering Geology*, 2018, vol. 236, pp. 4–10. DOI: 10.1016/j.enggeo.2017.02.023.
3. Galai B.F. *Compaction of subsidence soils using deep blasts*. Stavropol', Servisshkola Publ., 2015. 240 p.
4. Braja M. Das. *Advanced Soil Mechanics*. New York, Taylor & Francis Group, 2019. 734 p.
5. Galai O.B. *Budennovsk: geology and town*. Stavropol', Servisshkola Publ., 2022. 318 p.
6. Litvinov I.M. *Strengthening and compaction of subsidence soils in residential and industrial construction*. Kiev, Budivel'nik Publ., 1977. 288 p.
7. Pantyushina E.V. Loess soils and engineering methods for eliminating their subsidence properties. *Polzunovskii vestnik = Polzunovskiy Vestnik*, 2011, no. 1, pp. 127–130. (In Russian). EDN: MSAYPU.
8. Ivanov P.L. Compaction of Cohesion Loess Soils by Explosives. *Proceedings of the VI International Conference "Soil Mechanics and Foundation Engineering"*. Monreal, 1966, vol. 3, pp. 352–354.
9. Liman A.K. Compaction of Cohesion Less Foundation Soils by Explosives. *Civil Engineering*, 1940, vol. 10, iss. 4, pp. 9–15.
10. Dembicki E., Kisielowa, Bona R., Imiolek R., Michowski A., Semrau I. Consolidation of organic subsoil's by applying underground explosions for formations of vertical sands drains and generating dynamic overloading / E. Dembicki, N. Kisielowa, R. Bona, R. Imiolek, A. Michowski, I. Semrau // *Proceedings 9th International Harbor Congress*. Antwerp, 1988, pp. 5165–5170.
11. Dembicki E., Kisielowa N., Bona R., Imiolek R., Michowski A., Semrau I. Dynamic Consolidation of Organic Subsoil's by use of Hidden Underground Explosions. *Proceedings of the II Baltic Conference S. M. F. E.* Tallinn, 1988, pp. 273–277.
12. Keykhosropour L. Lemnitzer A. Experimental Studies of Seismic Soil Pressures on Vertical Flexible, Underground Structures and Analytical Comparisons. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2019, vol. 118, pp. 166–178. DOI: 10.1016/j.soildyn.2018.12.012.
13. Lombardi D., Bhattacharya S., Scarpa F., Bianchi M. Dynamic Response of a Geotechnical Rigid Model Container With Absorbing Boundaries. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2015, vol. 69, pp. 46–56. DOI: 10.1016/j.soildyn.2014.09.008.
14. Fridman A. *Parabolic partial differential equations*. Moscow, Mir Publ., 1968. 428 p.
15. Tarasenko E.O. Evaluation of Density Properties of Geological System Compacted by Hydraulic Blasting Using Numerical Modeling. *International Journal of Open Information Technologies*, 2025, vol. 13, no. 9, pp. 75–81. (In Russian). EDN: HEEFQJ.
16. Petrakov A.A., Prokopov A.Yu., Petrakova N.A., Panasyuk M.D. Interpretation Strength Properties of Soil for Numerical Analyses. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle = Izvestiya Tula State University. Sciences of Earth*, 2021, no. 1, pp. 225–236. (In Russian). EDN: FPBBPK.
17. Tarasenko E.O. Mathematical Modeling of the Strength Properties of Lesses by the Method of Correlation-Regression Analysis. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 2024, vol. 20, iss. 1, pp. 171–181. EDN: UWBHLT. DOI: 10.22337/2587-9618-2024-20-1-171-181.
18. Tarasenko E.O., Gladkov A.V. Numerical Solution of Inverse Problems in Mathematical Modeling of Geological Systems. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2022, vol. 333, no. 1, pp. 105–112. (In Russian). EDN: XFHDMD. DOI: 10.18799/24131830/2022/1/3208.

19. Tarasenko E.O. Numerical Simulation of Gas Atom Coordinate Dispersion in a Mathematical Model of Deep Blast Compaction for Subsidence Soils. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 2023, vol. 19, iss. 1, pp. 147–154. EDN: VEWCBW. DOI: 10.22337/2587-9618-2023-19-1-147-154.

20. Samarskii A.A., Vabishchevich P.N. *Numerical methods for solving inverse problems of mathematical physics*. 3rd ed. Moscow, LKI Publ., 2009. 480 p.

21. Tarasenko E.O. *Certificate of state registration of computer program No. 2024617100 Russian Federation. Program for calculating the charge power using the approximation method for compacting subsidence soils by blasting*, no. 2024615124; zayav. 14.03.2024; publ. 28.03.2024.

Информация об авторах

Тарасенко Елена Олеговна — кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра вычислительной математики и кибернетики, Северо-Кавказский федеральный университет, 355017, Российская Федерация, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1, e-mail: galail@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-6227-6999>.

Тарасенко Галина Васильевна — студент, департамент цифровых, робототехнических систем и электроники, Северо-Кавказский федеральный университет, 355017, Российская Федерация, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1,  <https://orcid.org/0009-0005-3783-8290>.

Information about the Authors

Elena O. Tarasenko — PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Department of Computational Mathematics and Cybernetics, North Caucasus Federal University, 1 Pushkin Str., Stavropol, 355017, Russian Federation, e-mail: galail@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-6227-6999>.

Galina V. Tarasenko — Student, Department of Digital, Robotic Systems and Electronics, North Caucasus Federal University, 1 Pushkin Str., Stavropol, 355017, Russian Federation,  <https://orcid.org/0009-0005-3783-8290>.

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the Authors

The authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Для цитирования

Тарасенко Е.О. Численное моделирование мощности заряда в математической модели уплотнения гидровзрывом просадочных грунтов / Е.О. Тарасенко, Г.В. Тарасенко. — DOI 10.17150/2713-1734.2026.8(2).216-228. — EDN VYWVNJ // *System Analysis & Mathematical Modeling*. — 2026. — Т. 8, № 2. — С. 216–228.

For Citation

Tarasenko E.O., Tarasenko G.V. Numerical Modeling of Charge Power in a Mathematical Model of Compaction of Subsidence Soils by Hydraulic Blasting. *System Analysis & Mathematical Modeling*, 2026, vol. 8, no. 2, pp. 216–228. (In Russian). EDN: VYWVNJ. DOI: 10.17150/2713-1734.2026.8(2).216-228.