

УДК 51-74

ЧИСЛЕННАЯ ОЦЕНКА ПЛОТНОСТИ ГРУНТА МЕТОДОМ КОНЕЧНО-РАЗНОСТНЫХ СЕТОК ПРИ МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ УПЛОТНЕНИЯ ПРОСАДОЧНЫХ ГРУНТОВ ГЛУБИННЫМИ ВЗРЫВАМИ

Тарасенко Елена Олеговна,
galail@mail.ru

Северо-Кавказский федеральный университет,
Россия, 355009, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1, корп. 2.

Актуальность. С целью обеспечения длительной эксплуатации и прочности зданий и сооружений на этапах их проектирования и строительства на просадочных лёссах необходимо проводить численную оценку плотностных характеристик грунтов. Просадочные лёссы широко распространены в мире. Их можно наблюдать в России, Китае, странах Средней Азии и т. д. На территории России их залегание отмечается более чем на 17 % от всей территории страны. Практически повсеместное распространение лёссовых грунтов встречается на территории Северо-Кавказского региона (80–85 % площади). Отмечается большая их мощность (до 50 м). Настоящая работа посвящена численному моделированию оценки плотностных характеристик просадочных грунтов методом конечно-разностных сеток в рамках математической модели уплотнения лёссов глубинными взрывами. Применение аппарата вычислительной математики позволило решить задачу оценки плотности уплотняемого просадочного грунта в зависимости от глубины заложения заряда взрывчатого вещества.

Цель: провести численную оценку плотности грунта в рамках математического моделирования уплотнения методом глубинных взрывов просадочных лёссовых грунтов.

Методы: применение аппарата вычислительной математики, дифференциальных уравнений в частных производных, методов и результатов физики твёрдого тела, инженерной геологии, механики грунтов.

Методика эксперимента. Проведено численное моделирование оценки плотности уплотняемого грунта глубинными взрывами на основе метода сеток.

Результаты. На основе метода сеток по явной конечно-разностной схеме построены дискретные линейные динамические системы для численного расчёта плотности уплотняемого просадочного грунта глубинными взрывами. Описано послойное приближение к решению дифференциального уравнения в частных производных с заданными начальным и граничными условиями, математически описывающего технологический процесс уплотнения просадочного грунта для случаев реализации поверхностного выброса и камуфлетного уплотнения. Указано условие устойчивости полученных конечно-разностных схем. Проведён вычислительный эксперимент, который продемонстрировал адекватность предложенного метода оценки плотности уплотняемого грунта экспериментальным данным.

Выводы. Построенные численные решения задач в рамках математического моделирования уплотнения просадочных грунтов глубинными взрывами указывают на возможности их практического применения в качестве расчётных методик для снижения затрат на проведение производственных работ по уплотнению лёссов. Предложенные в работе методики определения плотности грунтов могут найти реализацию в ряде направлений прикладных исследований механики грунтов.

Ключевые слова:

просадочный грунт, плотность грунта, уплотнение глубинными взрывами, математическое моделирование, численное моделирование, конечно-разностная схема, метод сеток.

Введение

Просадочные грунты широко представлены на территории России (более 17 %), Китая, Средней Азии и т. д. Концентрация (более 80 %) просадочных грунтов России фиксируется на юге страны и других территориях [1–3].

Исключение свойства просадочности грунтов является актуальной инженерно-геологической задачей при возведении зданий и сооружений гражданского строительства. Применяются различные методы и способы уплотнения просадочных грунтов [4–6]. На территории Северного Кавказа широкое распространение получил метод глубинных взрывов [7]. Математическое описание технологического процесса уплотнения грунтов этим методом представлено в работах [8–10]. Аналитические выражения для расчёта плотности грунта после взрыва строятся на основе решения дифференциального уравнения в частных производных с заданными начальным и граничными условиями. Предложенные авторами в [8] решения позволяют находить плотность грунта после его

уплотнения вблизи расположения сосредоточенного заряда. Приводятся решения отдельных обратных прикладных задач [9, 10]. Однако решения таких задач по всей области распространения взрывной волны являются актуальными. Динамические свойства грунтов изучаются в работах [11–13]. Авторами рассматриваются вопросы формирования дренажных систем в результате глубинных взрывов. В [14–16] приведён анализ зависимостей отдельных характеристик грунта от пористости в различных исследуемых системах.

В данной работе построим решение начально-краевой задачи, описывающей технологический процесс уплотнения грунтов глубинными взрывами, средствами вычислительной математики, методом конечно-разностных сеток, для оценки плотности уплотняемого грунта.

Математическая постановка задачи уплотнения просадочных грунтов

Опишем математическую постановку задачи уплотнения просадочных грунтов методом глубинных взрывов в виде [8]:

$$\frac{\partial q}{\partial t} + U \frac{\partial q}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} K_x \frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} K_y \frac{\partial q}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} K_z \frac{\partial q}{\partial z} + f, \quad t \in [t_0, T], \quad (1)$$

$$q(t_0, x, y, z) = Q \cdot \delta(x - x_0) \delta(y - y_0) \delta(z - z_0), \quad (2)$$

$$q(t, x, y, z)|_{z=z_0} = 0, \quad t > t_0, \quad (3)$$

$$K_{zz} \frac{\partial q}{\partial z} \Big|_{z=z_0} = 0, \quad t > t_0, \quad (4)$$

$$f(t, x, y, z) = QR(t, x, y, z) = Q\delta(t - t_0) \delta(x - x_0) \delta(y - y_0) \delta(z - H).$$

Здесь $q(t, x, y, z)$ – плотность скелета уплотнённого грунта в единицу времени t в точке с координатами (x, y, z) ; $q(t_0, x, y, z)$ – плотность скелета грунта до его уплотнения; U – вектор горизонтального сноса газа вдоль оси Ox ; x, y, z – пространственные координаты; f – функция источника газа; Q – мощность взрывчатого вещества (источника); δ – единичная импульсная функция Дирака; K_{ij} – диффузионные коэффициенты.

Задача (1)–(3) описывает реализацию полного поглощения атомов газа окружающим его грунтом в скважине (происходит уплотнение просадочного грунта). Задача (1), (2), (4) представляет полное отражение атомов газа от окружающего его грунта (реализуется выброс грунта на поверхность).

Численное моделирование плотности уплотняемого грунта

Воспользуемся аппаратом вычислительной математики. Применение отдельных алгоритмов метода сеток и их модификаций в решении практических задач осуществляется в [17–19]. Решение начально-граничных задач проведём методом конечно-разностных сеток по явной схеме.

Реализуем переход от непрерывной к дискретной модели. В пространстве состояний построим линейную динамическую систему. Предположим, что рассматриваемая геологическая система изотропна. Зададим конечно-разностную схему

$$(z_m, t_k), m = 0, 1, \dots, M, \quad k = 0, 1, \dots, K,$$

где

$$z_m = a + m\Delta z; \quad t_k = k\Delta t; \quad \Delta z = \frac{b-a}{M-1}; \quad \Delta t = \frac{T}{K-1}.$$

К решению задачи будем приближаться по слоям. Каждый слой задаётся совокупностью всех сеточных узлов с одной и той же временной координатой. Таким образом, k -й слой системы пространственных состояний содержит множество узлов

$$(z_0, t_k), (z_1, t_k), (z_2, t_k), \dots, (z_M, t_k), \quad k = 0, 1, \dots, K.$$

Введём обозначения

$$q_m^k = q(z_m, t_k);$$

$$q_m^0(z_m, 0) = Q \cdot \delta(x - x_0) \delta(y - y_0) \delta(z - z_0); \quad (2')$$

$$q^k = q(x, y, z, t_k), \quad (3')$$

$$K_{zz}^k = K_{zz} \frac{\partial q(x, y, z, t_k)}{\partial z}. \quad (4')$$

Осуществим переход от частных производных к их конечно-разностным аппроксимациям по явной двухслойной схеме. Заменим производные в (1) разностными отношениями:

$$\frac{\partial q}{\partial t} \Big|_{(z_m, t_k)} \approx \frac{q_m^{k+1} - q_m^k}{\Delta t}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial q}{\partial z} \Big|_{(z_m, t_k)} \approx \frac{q_{m+1}^k - q_m^k}{\Delta z}, \quad (6)$$

$$\frac{\partial^2 q}{\partial z^2} \Big|_{(z_m, t_k)} \approx \frac{q_{m+1}^k - 2q_m^k + q_{m-1}^k}{\Delta z^2}. \quad (7)$$

Учитывая граничные условия (3), получим дискретную линейную динамическую систему вида

$$\begin{bmatrix} q_1^k \\ q_2^k \\ q_3^k \\ \vdots \\ q_{m-2}^k \\ q_{m-1}^k \\ q_m^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_2 & \alpha_3 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_1 & \alpha_2 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & \alpha_2 & \alpha_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & \alpha_1 & \alpha_2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} q_1^{k-1} \\ q_2^{k-1} \\ q_3^{k-1} \\ \vdots \\ q_{m-2}^{k-1} \\ q_{m-1}^{k-1} \\ q_m^{k-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \alpha_1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \alpha_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} K_{zz}^{k-1} \\ q^{k-1} \end{bmatrix} \quad (8)$$

или в более компактной форме

$$q^k = A_1^{k-1} \cdot q^{k-1} + B_1^{k-1} \cdot C_1^{k-1}, \quad k = 1, 2, \dots, K.$$

В случае граничного условия (4) получим систему вида

$$\begin{bmatrix} q_1^k \\ q_2^k \\ q_3^k \\ \vdots \\ q_{m-2}^k \\ q_{m-1}^k \\ q_m^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_2 & \alpha_3 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_1 & \alpha_2 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & \alpha_2 & \alpha_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & \alpha_4 \alpha_1 & \alpha_4 \alpha_2 & \alpha_4 \alpha_3 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} q_1^{k-1} \\ q_2^{k-1} \\ q_3^{k-1} \\ \vdots \\ q_{m-2}^{k-1} \\ q_{m-1}^{k-1} \\ q_m^{k-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \alpha_1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \alpha_5 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} K_{zz}^{k-1} \\ q^k \end{bmatrix} \quad (9)$$

или в более компактной форме

$$q^k = A_2^{k-1} \cdot q^{k-1} + B_2^{k-1} \cdot C_2^{k-1}, \quad k = 1, 2, \dots, K.$$

Системы уравнений (8) и (9) являются дискретными линейными динамическими системами, в которых число уравнений совпадает с числом неизвестных. Поиск решения подобных систем реализуется по слоям. Координаты двумерного вектора входных воздействий U, Q образуют граничные условия. Начальное условие (2') определяет решение системы на нулевом слое. Находим решение $q_m^k, m=0, 1, \dots, M$ на k -м слое. Зная его, можно найти решение q_m^{k+1} на следующем $(k+1)$ -м слое по явной разностной схеме, с применением формул (5)–(7).

Коэффициенты основных матриц систем (8) и (9) определяются из соотношений

$$\alpha_1 = \gamma_1 + \gamma_2; \quad \alpha_2 = 1 - 2\gamma_2; \quad \alpha_3 = \gamma_2 - \gamma_1; \\ \alpha_4 = \frac{1}{1 + \Delta z}; \quad \alpha_5 = \frac{\Delta z}{1 + \Delta z}; \quad \gamma_1 = \frac{U \Delta t}{2 \Delta z}; \quad \gamma_2 = \frac{K_{\infty} \Delta t}{\Delta z^2}.$$

Основные матрицы алгебраических систем (8) и (9) являются постоянными

$$A_{1,2}^k = A \in R^{m \times m}, \quad B_{1,2}^k = B \in R^{m \times 2}.$$

В системе (8) $m=M-1$ – вектор плотности скелета уплотняемого грунта q^k – состоит из всех внутренних узлов конечно-разностной сетки. В системе (9) $m=M$ – вектор плотности скелета уплотняемого грунта q^k – состоит из всех внутренних узлов конечно-разностной сетки, а также правой её границы.

Устойчивость явной разностной схемы, задаваемой системами алгебраических уравнений (8) и (9), с учётом начального и граничных условий (2')–(4'), определяется в следующей теореме.

Теорема [9]. Пусть $\Delta t = \frac{\Delta z^2}{2}$. Тогда разностные схемы (8) и (9) устойчивы в сеточной норме пространства

$$C: \|q\| = \|q\|_C = \max_{\substack{z \in [z_0, z_m] \\ t \in [t_0, t_k]}} |q(z, t)|.$$

Погрешность аппроксимации явной разностной схемы имеет второй порядок по z и первый порядок по t : $O(z^2 + t)$.

Вычислительный эксперимент

Для представленных выше конечно-разностных схем (8) и (9), являющихся решением дифференциального уравнения (1) с заданными начальными и граничными условиями (2')–(4'), описывающих математическую модель уплотнения просадочных грунтов методом глубинных взрывов сосредоточенного заряда, построим численную реализацию на натурном строительном объекте. Отдельные экспериментальные данные представлены в [7, 20].

Пример. В [7] изложены материалы проведения гидровзрывного уплотнения на объекте «Общежитие на 203 места Прикумского завода пластмасс в 7-м микрорайоне». Мощность просадочной толщи составляет

20 м. Средняя плотность сухого грунта на площадке до его уплотнения составила $q(t_0, x, y, z) = 1,42$ г/см³. Геологическая система является анизотропной согласно геологическому строению толщи на площадке. Заряды взрывчатого вещества массой по 5 кг закладывались в скважины диаметром 200 мм на глубину $H=6$ м по сетке 4×5 м. В течение 10 дней напуском воды (7400 м³) в котлован осуществлялось замачивание грунтов. Сразу после взрывов грунт находится в мягкопластичном и текучем состоянии и монолиты было невозможно отобрать. Отбор монолитов был реализован через 4 месяца после сброса воды. Пробурили три скважины с отбором монолитов до глубины 10 м. Выполняется граничное условие (3) – полное поглощение атомов газа, образующегося в результате взрыва заряда, окружающим его грунтом.

Для численного расчёта плотности грунта в результате его уплотнения методом глубинного взрыва воспользуемся линейной динамической алгебраической системой уравнений (8), построенной на основе конечно-разностной явной сетки. В таблице представлены расчётные значения по предложенной вычислительной схеме и показатели плотности, взятые из экспериментальных данных [7].

Наблюдается отклонение полученных расчётных значений плотности скелета грунта от экспериментальных. Абсолютная погрешность вычислений изменяется в интервале от 0,01 до 0,1. Допустимая вычислительная погрешность метода сеток равна $\approx 0,01$.

Геометрическая интерпретация полученных численных результатов вычислительного эксперимента приведена на рисунке. Построена зависимость плотности скелета грунта от изменений координат по оси Oz .

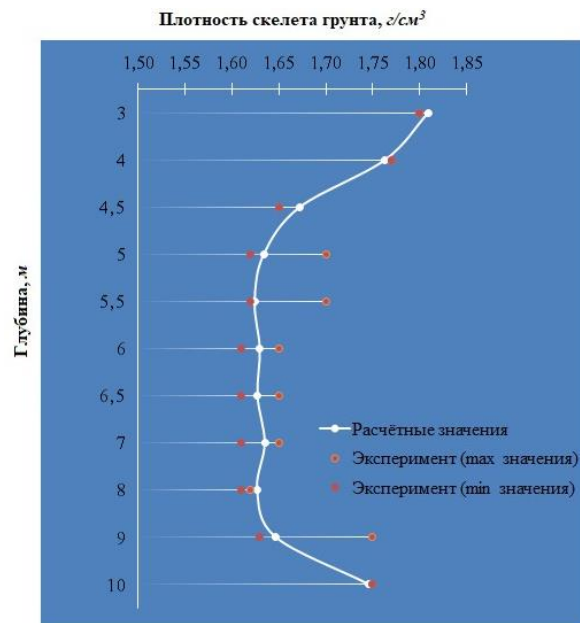


Рисунок. Графическое представление решения начально-граничной задачи (1)–(3) по явной конечно-разностной схеме

Figure. Graphical representation of the solution of the initial-boundary problem (1)–(3) according to the explicit finite-difference scheme

Таблица. Расчётные и экспериментальные значения плотности скелета грунта

Table. Calculated and experimental values of the dry soil density

Глубина, м Depth, m	Расчётная плотность скелета грунта, г/см ³ Dry soil estimated density, g/cm ³	Экспериментальная плотность скелета грунта [7], г/см ³ Dry soil experimental density [7], g/cm ³
3,0	1,81	1,80
4,0	1,76	1,77
4,5	1,67	1,65
5,0	1,63	1,62...1,70
5,5	1,62	—
6,0	1,63	1,61...1,65
6,5	1,63	—
7,0	1,64	1,61...1,65
8,0	1,63	1,61...1,62
9,0	1,65	1,63...1,75
10,0	1,74	1,75

Согласно данным эксперимента заряд взрывчатого вещества расположен в точке с координатами (0, 0, 6). Полученные вычислительные результаты показывают, что в зоне нахождения заряда плотность скелета уплотнённого грунта принимает значения $q \approx 1,61\text{--}1,65$ г/см³. В зоне распространения газа взрывчатого вещества от

центра взрыва наблюдается более существенное проникновение атомов газа в грунт и увеличение плотности скелета грунта. Под воздействием высоких давлений происходит разрушение скелета грунта, а газ сгорает. Тем самым реализуется уплотнение грунтовых толщ. После проведения глубинных взрывов верхние слои строительной площадки доуплотняются поверхностными методами уплотнения грунтов, согласно [7].

Заключение

Полученные конечно-разностные явные схемы (8) и (9) позволяют численно моделировать решение дифференциального уравнения с заданными начальными и граничными условиями, описывающего инженерно-геологическую систему уплотнения просадочных грунтов методом глубинных взрывов. Проведённый вычислительный эксперимент по разработанной линейной динамической схеме (8) продемонстрировал адекватность предложенной математической модели экспериментальным данным. Полученные теоретические результаты (конечно-разностные схемы) могут быть использованы на практике при проектировании зданий и сооружений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лёссовые породы СССР. Т. 1. Инженерно-геологические особенности и проблемы рационального использования / под ред. Е.М. Сергеева, А.К. Ларионова, Н.Н. Комиссаровой. – М.: Изд-во «Наука», 1986. – 273 с.
2. Лёссовые породы СССР. Т. 2. Региональные особенности / под ред. Е.М. Сергеева, В.С. Быковой, Н.Н. Комиссаровой. – М.: Изд-во «Наука», 1986. – 276 с.
3. ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация. – М.: Изд-во стандартов, 2020. – 41 с.
4. Пантюшина Е.В. Лёссовые грунты и инженерные методы устранения их просадочных свойств // Ползуновский вестник. – 2011. – № 1. – С. 127–130.
5. Ivanov P.L. Compaction of cohesion less soils by explosives // Proceedings of the VI International conference on soil mechanics and foundation engineering. – Monreal, 1966. – V. 3. – P. 352–354.
6. Liman A.K. Compaction of cohesion less foundation soils by explosives // Civil Engineering. – 1940. – V. 10. – Iss. 4. – P. 9–15.
7. Галай Б.Ф. Уплотнение просадочных грунтов глубинными взрывами. – Ставрополь: Изд-во «Сервисшкола»; СКФУ, 2015. – 240 с.
8. Тарасенко Е.О., Тарасенко В.С., Гладков А.В. Математическое моделирование уплотнения просадочных лёссовых грунтов Северного Кавказа глубинными взрывами // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 11. – С. 94–101.
9. Тарасенко Е.О., Гладков А.В. Численное решение обратных задач при математическом моделировании геологических систем // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 1. – С. 105–112.
10. Tarasenko E.O., Gladkov A.V., Gladkova N.A. Solution for inverse boundary value problems on the power of a concentrated charge in a mathematical model of subsidence soils compaction // Mathematics and its applications in new computer systems. MANCS 2021. Lecture notes in networks and systems. – Cham: Springer, 2022. – V. 424. – P. 537–545.
11. 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 9 International Harbor Congress. – Antwerp, 1988. – P. 5.165–5.170.
12. Dynamic consolidation of organic subsoil's by use of hidden underground explosions / E. Dembicki, N. Kisielowa, R. Bona, R. Imiolek, A. Michowski, I. Semrau // Proc. of the II Baltic conference S. M. F. E. – Tallinn, 1988. – P. 273–277.
13. Dynamic response of a geotechnical rigid model container with absorbing boundaries / D. Lombardi, S. Bhattacharya, F. Scarpa, M. Bianchi // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. – 2015. – V. 69. – P. 46–56.
14. Свидерских А.В., Носков И.В. Анализ изменения характеристик лёссовых грунтов в зависимости от пористости // Вестник Евразийской науки. – 2019. – Т. 11. – № 2. URL: <https://esj.today/PDF/76SAVN219.pdf> (дата обращения 25.12.2022).
15. Tsukamoto Y., Ishihara K. Analysis on settlement of soil deposits following liquefaction during earthquakes // Soils and Foundation. – 2010. – № 50 (3). – P. 399–441.
16. Ishihara K. New challenges in Geotechnique for ground hazards due to intensely strong earthquake shaking // Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering. – 2009. – № 11. – P. 91–114.
17. Кувшинова А.Н., Цыганов Ю.В. Математическое моделирование процесса параметрической идентификации моделей конвективно-диффузионного переноса с применением SVD-фильтра Калмана // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия Физико-математические науки. – 2021. – Т. 25. – № 4. – С. 716–737.
18. Решение трехмерного нестационарного уравнения теплопроводности методом конечных элементов с учетом фазовых переходов / М.П. Галанин Н.Н. Прошунин, А.С. Родин, Д.Л. Сорокин // Препринты Института прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук. – 2016. – № 66. – 27 с.
19. Решение трехмерных уравнений теплопроводности с помощью разрывного метода Галеркина на неструктурированных сетках / Р.В. Жалнин, М.Е. Ладонкина, В.Ф. Масягин, В.Ф. Тишкин // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия Физико-математические науки. – 2015. – Т. 19. – № 3. – С. 523–533.
20. Experimental and theoretical study on the seepage mechanism characteristics coupling with confining pressure / J. Wang, H. Ma, J. Qian, P. Feng, X. Tan, L. Ma // Engineering Geology. – 2021. – V. 291. – P. 73–84.

Поступила: 11.01.2023 г.

Дата рецензирования: 15.01.2023 г.

Информация об авторах

Тарасенко Е.О., кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры вычислительной математики и кибернетики Факультета математики и компьютерных наук имени профессора Н.И. Червякова Северо-Кавказского федерального университета.

UDC 51-74

NUMERICAL ESTIMATION OF SOIL DENSITY BY THE METHOD OF FINITE DIFFERENCE GRIDS IN MATHEMATICAL MODELING OF COMPACTION OF SUBSIBLE SOILS BY DEEP EXPLOSIONS

Elena O. Tarasenko,
galail@mail.ru

North-Caucasian Federal university,
1, bld. 2, Pushkin street, Stavropol, 355009, Russia.

Relevance. In order to ensure the duration of operation and strength of buildings and their expected design and construction on subsiding loess, it is necessary to carry out a numerical grade of the density characteristics of soils. Subsiding loesses are widespread in the world. They can be observed in Russia, China, the countries of Central Asia, etc. On the territory of Russia, their occurrence is noted at least at 17 % of the entire territory of the country. Almost ubiquitous distribution of loess soils occurs on the territory of the North Caucasus region (80–85 % of area). There is a large capacity of them (up to 50 m). This work is devoted to numerical modeling of the grade of density characteristics of subsiding soils using the finite difference grid method in the framework of a mathematical model of loess compaction by deep explosions. The use of the instrument of computational mathematics made it possible to solve the problem of estimating the compacted subsidence soil density depending on the depth of the explosive charge.

The main aim of the research is to conduct a numerical assessment of soil density within the framework of mathematical modeling of compaction by the method of deep explosions of subsiding loess soils.

Methods: application of the instrument of computational mathematics, differential equations, methods and results of solid state physics, engineering geology, soil mechanics.

Experimental technique. Numerical modeling of the assessment of the increase in the compacted soil by deep explosions based on the grid method was carried out.

Results. Based on the grid method using an explicit finite-difference scheme, discrete linear dynamic systems were constructed for numerical calculation of compacted subsidence soil density by deep explosions. The paper describes the layer-by-layer approximation to the solution of a differential equation in partial derivatives with given initial and boundary conditions, which mathematically describes the technological process of compaction of subsiding soil for the cases of surface ejection and camouflage compaction. The stability condition for the obtained finite-difference schemes is indicated. A computational experiment was carried out. It demonstrated the adequacy of the proposed method for estimating the compacted soil density to experimental data.

Findings. The constructed numerical solutions of problems within the framework of mathematical modeling of the compaction of subsiding soils by deep explosions indicate the possibility of their practical application as calculation methods to reduce the cost of carrying out production work on the compaction of loess. The methods proposed in the work for determining soil density can be implemented in a number of areas of applied research in soil mechanics.

Key words:

subsiding soil, soil density, compaction by deep explosions, mathematical modeling, numerical modeling, finite difference scheme, grid method.

REFERENCES

1. *Lossovye porody SSSR. T. 1. Inzhenerno-geologicheskie osobennosti i problemy estestvennogo ispolzovaniya* [Loess rocks of the USSR. Vol. 1. Engineering-geological features and problems of natural use]. Eds. E.M. Sergeev, A.K. Larionov, N.N. Komissarova. Moscow, Nauka Publ., 1986. 273 p.
2. *Lossovye porody SSSR. T. 2. Regionalnye osobennosti* [Loess rocks of the USSR. Vol. 2. Regional features]. Eds. E.M. Sergeev, V.S. Bykova, N.N. Komissarova. Moscow, Nauka Publ., 1986. 276 p.
3. GOST 25100-2020. *Grunty. Klassifikatsiya* [State Standard 25100-2020. Soils. Classification]. Moscow, Standards Publ., 2020. 41 p.
4. Pantyushina E.V. Loess soils and engineering methods for eliminating their subsidence properties. *Polzunovsky vestnik*, 2011, no. 1, pp. 127–130. In Rus.
5. Ivanov P.L. Compaction of cohesion less soils by explosives. *Proceedings of the VI International conference on soil mechanics and foundation engineering*. Montreal, 1966, vol. 3. pp. 352–354.
6. Liman A.K. Compaction of cohesion less foundation soils by explosives. *Civil Engineering*, 1940, vol. 10, Iss. 4, pp. 9–15.
7. Galay B. F. *Uplotnenie prosadochnykh gruntov glubinnymi vzryvami* [Compaction of subsiding soils by deep explosions]. Stavropol, Serveshkola, NCFU Publ., 2015. 240 p.
8. Tarasenko E. O., Tarasenko V. S., Gladkov A.V. Mathematical modeling of compaction of subsident loess soils of the North Caucasus by deep explosions. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 11, pp. 94–101. In Rus.
9. Tarasenko E. O., Tarasenko V. S., Gladkov A.V. Numerical solution of inverse problems in mathematical modeling of geological systems. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 1, pp. 105–112. In Rus.
10. Tarasenko E.O., Gladkov A.V., Gladkova N.A. Solution for inverse boundary value problems on the power of a concentrated charge in a mathematical model of subsidence soils compaction. *Mathematics and its applications in new computer systems. MANCS 2021. Lecture notes in networks and systems*. Cham, Springer, 2022. Vol. 424, pp. 537–545.
11. Dembicki E., Kisielowa N., 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. *Proceedings. 9 International Harbor Congress*. Antwerp, 1988, pp. 5.165–5.170.
12. 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.
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.
14. Sviderskikh A.V., Noskov I.V. Analysis of characteristics changes in the loess soils depending on porosity. *The Eurasian Scientific*

- Journal*, 2019, no. 2, vol. 11. In Rus. Available at: <https://esj.today/PDF/76SAVN219.pdf> (accessed 25 December 2022).
15. Tsukamoto Y., Ishihara K. Analysis on settlement of soil deposits following liquefaction during earthquakes. *Soils and Foundation*, 2010, no. 50 (3), pp. 399–441.
 16. Ishihara K. New challenges in Geotechnique for ground hazards due to intensely strong earthquake shaking. *Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering*, 2009, no. 11, pp. 91–114.
 17. Kuvshinova A.N., Tsyganov A.V., Tsyganova Yu.V. Mathematical modeling of parameter identification process of convection-diffusion transport models using the SVD-based Kalman filter. *Journal of the Samara State Technical University. Series Physical and Mathematical Sciences*, 2021, vol. 25, no. 4, pp. 716–737. In Rus.
 18. Galanin M.P., Proshunin N.N., Rodin A.S., Sorokin D.L. Reshenie trekhmernogo nestatsionarnogo uravneniya teploprovodnosti metodom konechnykh elementov s uchetom fazovykh perekhodov [Solving the three-dimensional non-stationary heat equation by the finite element method with allowance for phase transitions]. *Preprints of the Institute of Applied Mathematics. M.V. Keldysh of the Russian Academy of Sciences*, 2016, no. 66, 27 p.
 19. Zhalnin R.V., Ladonkina M.E., Masyagin V.F., Tishkin V.F. Solution of 3D heat conduction equations using the discontinuous Galerkin method on unstructured grids. *Journal of the Samara State Technical University. Series Physical and Mathematical Sciences*, 2015, vol. 19, no. 43, pp. 523–533. In Rus.
 20. Wang J., Ma H., Qian J., Feng P., Tan X., Ma L. Experimental and theoretical study on the seepage mechanism characteristics coupling with confining pressure. *Engineering Geology*, 2021, vol. 291, pp. 73–84.

Received: 11 January 2023.

Reviewed: 15 January 2023.

Information about the authors

Elena O. Tarasenko, Cand. Sc., assistant professor, North-Caucasian Federal University.