

Оценка плотностных свойств уплотняемой гидровзрывом геологической системы средствами численного моделирования

Е.О. Тарасенко

Аннотация — Проведению инженерно-производственных работ по уплотнению гидровзрывом просадочных геологических систем предшествует предварительное численное моделирование плотностных свойств уплотняемых грунтов для уменьшения финансовых и временных затрат. Что определяет актуальность исследования. Исключение свойства просадочности грунтов проводится на этапе проектирования строительных объектов, зданий и сооружений с целью обеспечения их длительного и безопасного использования. В основе математической модели, уплотняемой гидровзрывом геологической системы, стоит дифференциальное уравнение в частных производных с заданными начальным и граничными условиями. В работе предложен подход численного моделирования решения начально-граничной задачи для оценки плотностных свойств уплотняемых грунтов. Применён метод конечно-разностных полунеяевых сеточных функций. Построены дискретные динамические системы, учитывающие входные воздействия параметров геологической системы, плотности грунта до уплотнения, мощности заряда взрывчатого вещества, коэффициента вертикальной диффузии газа в грунте, вектора горизонтального сноса, шага сетки. Решение систем реализовано методом прогонки. Позволяет оценить плотностные свойства грунтов. Имеет второй порядок точности по времени и по пространственным координатам. Является абсолютно устойчивым. Проведён вычислительный эксперимент по оценке плотностных свойств уплотнённых гидровзрывом грунтов, основанный на опытных данных реализации натурного глубинного уплотнения просадочных грунтов. Построены зависимости плотности уплотнённого грунта от глубины геологической толщи с течением времени. Установлена адекватность предложенного метода оценки плотностных свойств грунтов опытным данным.

Ключевые слова — конечно-разностная схема, плотность, просадочный грунт, сеточная функция, уплотнение гидровзрывом, численное моделирование.

I. ВВЕДЕНИЕ

Просадочные геологические породы являются одним из наиболее распространённых и в то же время загадочных типов континентальных

отложений нашей планеты. Обширные территории просадочных грунтов отмечаются в Восточной Европе, Средней Азии, Северной Америке [1, 2]. В России покров лёссовыми просадочными породами фиксируется в равнинной части Северного Кавказа, на юге, Нижнем Доне, Заволжье, в Крыму и других регионах [1]. Они простираются не менее чем на 13 млн км², около 15% площади страны, на них возводятся почти четверть строящихся зданий и сооружений.

Лёссовые просадочные грунты имеют жёлтый, жёлто-бурый или жёлто-палевый цвет. Обладают низкой плотностью и макропористой структурой [3–5].

Одной из наиболее стратегических и сложных проблем современного строительства является проектирование и возведение на лёссых просадочных грунтах зданий и сооружений с обеспечением их прочности и эксплуатационной надёжности [6]. Противопросадочные мероприятия представлены многообразием методов и способов уплотнения грунтов [7]. В работе рассмотрен метод уплотнения геологических систем глубинными гидровзрывами, демонстрирующий экономическую эффективность в процессе его инженерно-технологической реализации [8].

Применение средств математического моделирования позволяет совершенствовать и разрабатывать новые подходы и методы познания природы просадочных процессов, более точной оценки и прогноза изменения свойств этих грунтов. Математическое моделирование процесса уплотнения грунтов глубинными взрывами на примере Северного Кавказа проведено в работе [9]. Определены начально-граничные задачи при поглощении и отражении атомов газа, образующегося при

Статья получена 9 июня 2025.

Тарасенко Елена Олеговна, Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, Российская Федерация (e-mail: galail@mail.ru).

взрыве заряда в просадочной толще, от окружающего его грунта. Изучены отдельные физические свойства геологической системы. Решены обратные прикладные задачи в рамках математического моделирования уплотнения грунтов: проведена численная оценка глубины заложения заряда взрывчатого вещества [10], коэффициента вертикальной диффузии газа в грунтах [11].

Механические свойства лёссовых геологических систем исследуются в работах [12–14]. Аппарат корреляционно-регрессионного анализа применён при анализе зависимостей механических и физических свойств грунтов [15].

Проведём исследование плотностных свойств, уплотняемых гидровзрывом, просадочных геологических систем. Применим средства численного моделирования для решения начально-граничных задач с дифференциальным уравнением параболического типа, описывающих устранение просадочности лёсса с выбросом и без выброса грунта на поверхность. Реализация численного метода даёт возможность создать методику оценки плотностных свойств грунта с течением времени.

II. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ
Математическая модель уплотнения просадочных грунтов глубинными гидровзрывами описывается полуэмпирическим дифференциальным уравнением диффузии [9]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial q}{\partial t} + \sum_{i=x,y,z} \frac{\partial(u_i q)}{\partial i} + \alpha q = \\ = \sum_{i=x,y,z} \left(\frac{\partial}{\partial i} \sum_{j=x,y,z} K_{ij} \frac{\partial q}{\partial j} \right) + f, \quad (1) \\ t \in [t_0, T], \end{aligned}$$

с начальным

$$\begin{aligned} q(t_0, x, y, z) = \\ = Q \cdot \delta(x - x^0) \cdot \delta(y - y^0) \cdot \delta(z - z^0), \quad (2) \end{aligned}$$

граничным условием

$$K_{zz} \frac{\partial q}{\partial z} \Big|_{z=z^0} = 0, \quad t > t_0. \quad (3)$$

Начально-граничные задачи (1) – (3) описывают уплотнение грунта с выбросом на

поверхность, фиксируется отражение атомов газа от окружающего его грунта. Заряд взрывчатого вещества располагается в дренажно-взрывных скважинах на глубине $H = z^0$.

Уплотнение грунта гидровзрывом без выброса на поверхность, в случае поглощения газа окружающим его грунтом, описывается начально-граничной задачей (1), (2) и граничным условием

$$q(t, x, y, z) \Big|_{z=z^0} = 0, \quad t > t_0. \quad (4)$$

Здесь $q(t, x, y, z)$ – плотность грунта в момент времени $t \in [t_0, T]$ в точке (x, y, z) ; K_{ij} – коэффициенты диффузационного взаимодействия грунта и газа, выделяемого при взрыве; Q – функция заряда взрывчатого вещества, его мощность; δ – импульсная дельта-функция.

Решение начально-граничных задач реализуем средствами численного моделирования. Для оценки плотности уплотнённого грунта применим метод конечно-разностных сеточных функций.

III. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Проведём численное моделирование оценки плотностных свойств, уплотнённых взрывом геологических систем. Для реализации численного метода конечно-разностных сеточных функций заменим в уравнении (1) частные производные на центральные конечные разности [16, 17]. Применим шеститочечный симметричный разностный шаблон аппроксимации типа «прямоугольник» [18, 19]. Так осуществим переход от непрерывной модели к её дискретной аппроксимационной интерпретации.

Производные функции плотности грунта $q = q(x, y, z, t)$ по пространственным координатам x, y, z зададим в виде суммы двух слагаемых, одно из которых аппроксимируется на $(n + 1)$ -ом шаге по времени, а другое – на n -ом шаге по времени. Это позволит достичь второго порядка аппроксимации по времени. Тогда для дифференциального уравнения (1) получим симметричную разностную схему:

$$\begin{aligned}
& \frac{q_m^{n+1} - q_m^n}{\Delta t} + U \cdot \frac{q_m^{n+1} - q_m^n}{\Delta x} = \\
& = \frac{K_{xx}}{2} \cdot \left(\frac{q_{m-1}^{n+1} - 2q_m^{n+1} + q_{m+1}^{n+1}}{(\Delta x)^2} + \frac{q_{m-1}^n - 2q_m^n + q_{m+1}^n}{(\Delta x)^2} \right) + \\
& + \frac{K_{yy}}{2} \cdot \left(\frac{q_{m-1}^{n+1} - 2q_m^{n+1} + q_{m+1}^{n+1}}{(\Delta y)^2} + \frac{q_{m-1}^n - 2q_m^n + q_{m+1}^n}{(\Delta y)^2} \right) + (5) \\
& + \frac{K_{zz}}{2} \cdot \left(\frac{q_{m-1}^{n+1} - 2q_m^{n+1} + q_{m+1}^{n+1}}{(\Delta z)^2} + \frac{q_{m-1}^n - 2q_m^n + q_{m+1}^n}{(\Delta z)^2} \right) + \\
& + \varphi_m^n,
\end{aligned}$$

$m=1, 2, \dots, M-1, n=0, 1, \dots, N-1,$

$$\varphi_m^n = f(x_m, y_m, z_m, t_n).$$

Построим конечно-разностную сетку с одинаковым шагом по пространственным координатам $\Delta x = \Delta y = \Delta z$, но шагом отличным от временного шага Δt . В этом случае схема (5) преобразуется к представлению вида

$$\begin{aligned}
& \frac{q_m^{n+1} - q_m^n}{\Delta t} + U \cdot \frac{q_m^{n+1} - q_m^n}{\Delta x} = \\
& = \frac{3K_{xx}}{2} \left(\frac{q_{m-1}^{n+1} - 2q_m^{n+1} + q_{m+1}^{n+1}}{(\Delta x)^2} + \frac{q_{m-1}^n - 2q_m^n + q_{m+1}^n}{(\Delta x)^2} \right) + (6) \\
& + \varphi_m^n,
\end{aligned}$$

$m=1, 2, \dots, M-1, n=0, 1, \dots, N-1.$

Поиск решения задачи осуществляется послойно. Последовательно на каждом временном слое вычисляются значения плотности грунта во всех узлах сетки. Учитывая, что на каждом временном слое вычисляются три значения плотности грунта, то для решения задачи по схеме (6) применим метод прогонки.

Преобразуем разностную схему (6) к виду, удобному для проведения вычислений

$$\begin{aligned}
& \frac{3K_{xx}}{2(\Delta x)^2} \cdot q_{m-1}^{n+1} - \left(\frac{1}{\Delta t} + \frac{U}{\Delta x} + \frac{3K_{xx}}{(\Delta x)^2} \right) \cdot q_m^{n+1} + \\
& + \frac{3K_{xx}}{2(\Delta x)^2} \cdot q_{m+1}^{n+1} = \frac{3K_{xx}}{2(\Delta x)^2} \cdot q_{m-1}^n - \\
& - \left(\frac{1}{\Delta t} + \frac{U}{\Delta x} + \frac{3K_{xx}}{(\Delta x)^2} \right) \cdot q_m^n + \frac{3K_{xx}}{2(\Delta x)^2} \cdot q_{m+1}^n - \\
& - \varphi_m^n,
\end{aligned} \quad (7)$$

$m=1, 2, \dots, M-1, n=0, 1, \dots, N-1.$

Схема (7) представляет собой систему линейных алгебраических уравнений с

невырожденной трёхдиагональной квадратной матрицей, имеющей диагональное преобладание.

С учётом граничного условия (3) разностная схема (7) представима дискретной системой линейных уравнений в компактной форме

$$A_1^{n+1} \cdot q^{n+1} = q^n + B_1^n \cdot C^n, \quad n=1, 2, \dots, N-1. \quad (8)$$

Границное условие (4) задаёт систему в форме

$$A_2^{n+1} \cdot q^{n+1} = q^n + B_2^n \cdot C^n, \quad n=1, 2, \dots, N-1. \quad (9)$$

Где матрицы систем (8) и (9) имеют вид

$$A_1^{n+1} = \begin{bmatrix} \alpha_2 & \alpha_3 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_1 & \alpha_2 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & \alpha_2 & \alpha_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & \alpha_1 & \alpha_2 \end{bmatrix},$$

$$A_2^{n+1} = \begin{bmatrix} \alpha_2 & \alpha_3 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_1 & \alpha_2 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & \alpha_2 & \alpha_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & \alpha_4 \alpha_1 & \alpha_4 \alpha_2 & \alpha_4 \alpha_3 \end{bmatrix},$$

$$B_1^n = \begin{bmatrix} \alpha_1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_2^n = \begin{bmatrix} \alpha_1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad C^n = \begin{bmatrix} K_{xx}^n \\ q_m^n \end{bmatrix}.$$

Числовые коэффициенты матриц устанавливаются соотношениями

$$\alpha_1 = \alpha_3 = \frac{3K_{xx}}{2(\Delta x)^2};$$

$$\alpha_2 = - \left(\frac{1}{\Delta t} + \frac{U}{\Delta x} + \frac{3K_{xx}}{(\Delta x)^2} \right);$$

$$\alpha_4 = \frac{1}{1+\Delta x}; \quad \alpha_5 = \frac{\Delta x}{1+\Delta x}.$$

Разностная схема (7), аппроксимирующая уравнение (1), имеет второй порядок аппроксимации по времени и координате

$$O(t^2 + x^2).$$

Разностная схема (5) имеет второй порядок точности по времени t и по пространственным координатам x, y, z : $O(t^2 + x^2 + y^2 + z^2)$.

Схема (5) является абсолютно устойчивой.

IV. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Работоспособность представленной методики оценки плотности уплотняемого грунта проверялась путём сравнения результатов расчётов модельной задачи с результатами опытных данных натурного строительного объекта «Строительство товарно-сырьевого склада СУГ ООО «Ставролен», г. Будённовск».

Построим конечно-разностную сетку для изотропной геологической системы с одинаковым координатным шагом $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0,5\text{ м}$ (для $x \in [3;10]\text{ м}$ – глубина уплотнения грунта гидровзрывом) и $\Delta t = 0,1\text{ с}$ (для $t \in [0;1]\text{ с}$ – время проникновения атомов газа, выделяемого при взрыве аммонита 6ЖВ, в окружающий его грунт). Параметры входного воздействия на уплотняемую геологическую систему принимают значения: средняя плотность грунта до уплотнения $q(t_0, x, y, z) = 1,43\text{ г}/\text{см}^3$, мощность заряда взрывчатого вещества 10 кг, коэффициент вертикальной диффузии газа в грунте 0,726 [8, 20].

Исследуем изменение значений плотности грунта на различной глубине уплотнения и течением времени. Для расчёта применим полунеявную схему (7).

На рисунке 1 приведена зависимость плотности грунта, уплотнённого гидровзрывом, на различной глубине

уплотнения при $t=1\text{ с}$. Расчёты проводились с использованием авторской программы, разработанной на языке программирования высокого уровня Python. Точки, показывающие минимальное и максимальное значения плотности грунта на различной глубине, определены из опытных данных [8].

Вычислительный эксперимент по оценке плотности грунта проводился для различных значений $t \in [0;1]\text{ с}$ времени проникновения атомов газа, выделяемого при взрыве взрывчатого вещества, в окружающий его грунт. На рисунке 2 представлена геометрическая интерпретация полученных численных результатов. Построены зависимости плотности грунта на различной глубине уплотнения.

Расчётные численные значения плотности уплотнённого грунта имеют расхождение от экспериментальных опытных данных. Абсолютная погрешность вычислений по полунеявной разносной схеме (7) изменяется в интервале от 0,0097 до 0,0915 (0,97% – 9,15%).

Анализ вычислительного эксперимента показал, что в зоне расположения заряда взрывчатого вещества на глубине $H=6\text{ м}$, плотность уплотнённого грунта принимает значения $q \approx 1,62 - 1,63\text{ г}/\text{см}^3$. При $q > 1,60\text{ г}/\text{см}^3$ геологическую систему считают непросадочной. При отдалении от центра взрыва фиксируется увеличение значений плотности грунта. Это объяснимо более значительным проникновением атомов газа в окружающий его грунт. После проведения уплотнения грунта гидровзрывом верхний буферный слой $x \in [0;3]\text{ м}$ уплотняют поверхностными методами.

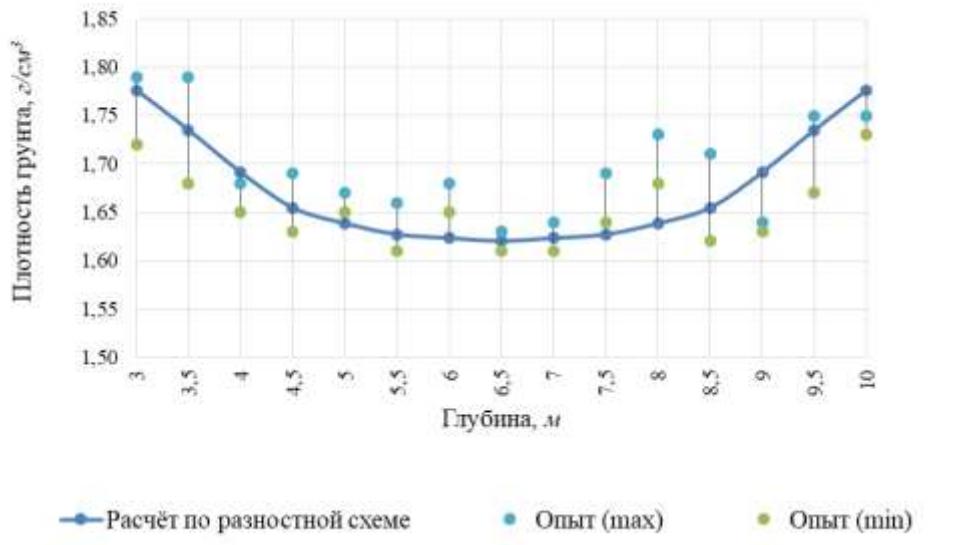


Рис. 1. Результат вычислительного эксперимента оценки плотности грунта по разностной схеме и опытных данных [3]

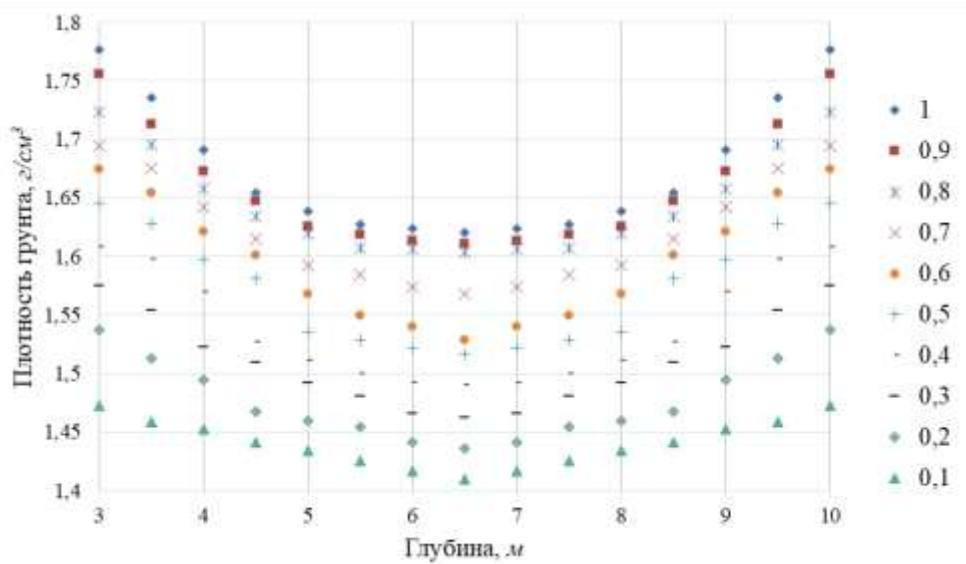


Рис. 2. Численная оценка плотности грунта по разностной схеме на различной глубине уплотнения с течением времени

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено численное моделирование плотностных свойств, уплотнённых гидровзрывом просадочных грунтов. Математическая модель инженерно-технологического процесса описана начально-граничными задачами для случаев уплотнения грунта с выбросом и без выброса на поверхность. Для решения поставленных задач применён численный метод конечно-разностных полунеявных сеточных функций типа «прямоугольник» (5) и (7). С учётом

входных воздействий параметров геологической системы построены дискретные системы линейных уравнений (8) и (9), позволяющие численно оценить плотностные свойства грунтов. Решение систем проведено методом прогонки. На основе опытных данных выполнен вычислительный эксперимент по оценке плотностных свойств уплотнённых гидровзрывом грунтов. Построены зависимости плотности грунта на различной глубине уплотнения с течением времени. Абсолютная погрешность полученных значений плотности грунта по предложенной

конечно-разностной схеме не превышает 9,15 процентных пунктов.

Метод оценки плотностных свойств грунтов, описанный в работе, может быть применён как при проведении теоретических исследований свойств грунтов, так и при практическом проведении инженерно-технологического процесса уплотнения просадочных грунтов гидровзрывом на этапе проектирования оснований и фундаментов строительных объектов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает признательность и благодарность академику РАН, доктору геолого-минералогических наук, профессору департамента строительной инженерии и прототипирования Северо-Кавказского федерального университета Галаю Борису Фёдоровичу, за консультации и рекомендации при проведении научного исследования.

БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] Трофимов В.Т., Балыкова С.Д., Болиховская Н.С. и др. Лёссовый покров Земли и его свойства. М.: МГУ, 2001. 464с.
- [2] Yates K., Fenton C.H., Bell D.H. A review of the geotechnical characteristics of loess and loess-derived soils from Canterbury, South Island, New Zealand // Engineering Geology. 2017. Vol. 236. Pp. 11–21.
DOI: 10.1016/j.engee.2017.08.001.
- [3] Григорьева И.Ю. Микростроение лёссовых пород. М.: НИЦ ИНФРА-М, 2020. 147 с.
- [4] Liu Z., Liu F., Ma F., Wang M., Bai X., Zheng Y., Yin H., Zhang G. Collapsibility, composition, and microstructure of loess in China // Canadian Geotechnical Journal. 2016. Vol. 53(4). Pp. 1–45. DOI: 10.1139/cgj-2015-0285.
- [5] Li P., Xie W.L., Pak R., Vanapalli S.K. Microstructural evolution of loess soils from the Loess Plateau of China // Catena. 2019. Vol. 173. Pp. 276–288. DOI: 10.1016/j.catena.2018.10.006.
- [6] Крутов В.И., Ковалев А.С., Ковалев В.А. Проектирование и устройство оснований и фундаментов на просадочных грунтах. М.: АСВ, 2013. 544 с.
- [7] Пантишина Е.В. Лёссовые грунты и инженерные методы устранения их просадочных свойств // Ползуновский вестник. 2011. № 1. С. 127–130.
- [8] Галай Б.Ф. Уплотнение просадочных грунтов глубинными взрывами. Ставрополь: Сервисшкола, 2015. 240 с.
- [9] 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.
DOI: 10.18799/24131830/2019/11/2352.
- [10] 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.
DOI: 10.18799/24131830/2022/1/3208.
- [11] Tarasenko E.O. Estimation of the vertical diffusion coefficient of gas in compacted soils by means of mathematical modeling // Trudy ISP RAN / Proc.ISP RAS. 2024. Vol. 36(5). Pp. 181–190. DOI: 10.15514/ISPRAS-2024-36(5)-13
- [12] Крутов В.И. О характеристиках просадочности грунтов // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2010. №4. С. 24–30.
- [13] Guo Y., Ni W., Kou Z., Zhao Y., Nie Y. Experimental study on the permeability of compacted loess // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2020. Vol. 57. Pp. 394–400. DOI: 10.1007/s11204-020-09683-y.
- [14] Li R.J., Liu J.D., Yan R., Zheng W., Shao Sh.J. Characteristics of structural loess strength and preliminary framework for joint strength formula // Water Science and Engineering. 2014. Vol. 7 (3). Pp. 319–330. DOI: 10.3882/j.issn.1674-2370.2014.03.007.
- [15] Tarasenko E.O. Mathematical modeling of the strength properties of loesses by the method of correlation-regression analysis // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2024. Vol. 20(1). Pp. 171–181. DOI: 10.22337/2587-9618-2024-20-1-171-181.
- [16] Ascher U.M. Numerical methods for evolutionary differential equations. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2008. 403 p. DOI: 10.1137/1.9780898718911.
- [17] Knabner P., Angermann L. Numerical methods for elliptic and parabolic partial differential equations. New York: Springer, 2003. 426 p. DOI: 10.1007/b97419.
- [18] Vabishchevich P.N. Additive operator-difference schemes: splitting schemes. Berlin, Boston: De Gruyter, 2014. 354p. DOI: 10.1515/9783110321463.
- [19] Liu Y., Roberts J., Yan Y. A note on finite difference methods for nonlinear fractional differential equations with non-uniform meshes // International Journal of Computer Mathematics. 2017. Vol. 95 (6–7). pp. 1151–1169. DOI: 10.1080/00207160.2017.1381691.
- [20] Галай О.Б. Буденновск: геология и город. Ставрополь: СервисШкола, 2022. 318 с.

Evaluation of density properties of geological system compacted by hydraulic blasting using numerical modeling

Elena O. Tarasenko

Annotation—Engineering and production works on compaction of subsidence geological systems by hydraulic blasting are preceded by preliminary numerical modeling of the density properties of compacted soils in order to reduce financial and time costs. Which determines the relevance of the study. The elimination of the property of soil subsidence is carried out at the stage of designing construction projects, buildings and structures in order to ensure their long-term and safe use. The mathematical model of a geological system compacted by hydraulic blasting is based on a partial differential equation with specified initial and boundary conditions. The paper proposes an approach to numerical modeling of the solution of an initial-boundary value problem for assessing the density properties of compacted soils. The method of finite-difference semi-implicit grid functions is used. Discrete dynamic systems are constructed that take into account the input effects of the parameters of the geological system, the density of the soil before compaction, the power of the explosive charge, the coefficient of vertical diffusion of gas in the soil, the vector of horizontal demolition, the grid step. The solution of the systems is implemented by the sweep method. It allows you to estimate the density properties of soils. It has the second order of accuracy in time and spatial coordinates. It is absolutely stable. A computational experiment was conducted to assess the density properties of soils compacted by hydraulic blasting, based on experimental data from the implementation of natural deep compaction of subsidence soils. Dependences of the density of compacted soil on the depth of the geological strata over time were constructed. The adequacy of the proposed method for assessing the density properties of soils to experimental data was established.

Keywords—finite-dispersion scheme, density, subsidence soil, grid function, compaction by hydraulic blasting, numerical modeling.

REFERENCES

- [1] Trofimov V.T., Balykova S.D., Bolikhovskaya N.S. and others. Loess cover of the Earth and its properties. M.: MSU, 2001. 464 p. (in Russian).
- [2] Yates K., Fenton C.H., Bell D.H. A review of the geotechnical characteristics of loess and loess-derived soils from Canterbury, South Island, New Zealand // Engineering Geology. 2017. Vol. 236. Pp. 11–21. DOI: 10.1016/j.enggeo.2017.08.001.
- [3] Grigorieva I.Yu. Microstructure of loess rocks. M.: NIC INFRA-M, 2020. 147 p. (in Russian).
- [4] Liu Z., Liu F., Ma F., Wang M., Bai X., Zheng Y., Yin H., Zhang G. Collapsibility, composition, and microstructure of loess in China // Canadian Geotechnical Journal. 2016. Vol. 53(4). Pp. 1–45. DOI: 10.1139/cgj-2015-0285.
- [5] Li P., Xie W.L., Pak R., Vanapalli S.K. Microstructural evolution of loess soils from the Loess Plateau of China // Catena. 2019. Vol. 173. Pp. 276–288. DOI: 10.1016/j.catena.2018.10.006.
- [6] Krutov V.I., Kovalev A.S., Kovalev V.A. Design and construction of foundations and bases on subsidence soils. M.: ASV, 2013. 544 p. (in Russian).
- [7] Pantyushina E.V. Loess soils and engineering methods for eliminating their subsidence properties // Polzunovsky Bulletin. 2011. No. 1. Pp. 127–130. (in Russian).
- [8] Galay B.F. Compaction of subsidence soils by deep blasts. Stavropol: Service School, 2015. 240 p. (in Russian).
- [9] Tarasenko E.O., Tarasenko V.S., Gladkov A.V. Mathematical modeling of compaction of subsidence loess soils of the North Caucasus by deep blasts // Bulletin of Tomsk Polytechnic University. Georesource Engineering. 2019. Vol. 330. No. 11. Pp. 94–101. (in Russian). DOI: 10.18799/24131830/2019/11/2352.
- [10] Tarasenko E.O., Gladkov A.V. Numerical solution of inverse problems in mathematical modeling of geological systems // Bulletin of Tomsk Polytechnic University. Georesources Engineering. 2022. Vol. 333. No. 1. Pp. 105–112. (in Russian). DOI: 10.18799/24131830/2022/1/3208.
- [11] Tarasenko E.O. Estimation of the vertical diffusion coefficient of gas in compacted soils by means of mathematical modeling // Trudy ISP RAN / Proc. ISP RAS. 2024. Vol. 36 (5). Pp. 181–190. DOI: 10.15514/ISPRAS-2024-36(5)-13
- [12] Krutov V.I. On the characteristics of soil subsidence // Foundations, foundations and soil mechanics. 2010. No. 4. Pp. 24–30. (in Russian).
- [13] Guo Y., Ni W., Kou Z., Zhao Y., Nie Y. Experimental study on the permeability of compacted loess // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2020. Vol. 57. Pp. 394–400. DOI: 10.1007/s11204-020-09683-y.
- [14] Li R.J., Liu J.D., Yan R., Zheng W., Shao Sh.J. Characteristics of structural loess strength and preliminary framework for joint strength formula // Water Science and Engineering. 2014. Vol. 7 (3). Pp. 319–330. DOI: 10.3882/j.issn.1674-2370.2014.03.007.
- [15] Tarasenko E.O. Mathematical modeling of the strength properties of loesses by the method of correlation-regression analysis // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2024. Vol. 20(1). Pp. 171–181. DOI: 10.22337/2587-9618-2024-20-1-171-181.
- [16] Ascher U.M. Numerical methods for evolutionary differential equations. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2008. 403 p. DOI: 10.1137/1.9780898718911.
- [17] Knabner P., Angermann L. Numerical methods for elliptic and parabolic partial differential equations. New York: Springer, 2003. 426 p. DOI: 10.1007/b97419.
- [18] Vabishchevich P.N. Additive operator-difference schemes: splitting schemes. Berlin, Boston: De Gruyter, 2014. 354 p. DOI: 10.1515/9783110321463.
- [19] Liu Y., Roberts J., Yan Y. A note on finite difference methods for nonlinear fractional differential equations with non-uniform meshes // International Journal of Computer Mathematics. 2017. Vol. 95 (6–7). Pp. 1151–1169. DOI: 10.1080/00207160.2017.1381691.
- [20] Galay O.B. Budennovsk: geology and city. Stavropol: ServiceSchool, 2022. 318 p. (in Russian).