

Математическое моделирование восстановления глубины расположения заряда в уплотняемых гидровзрывом лёссах

Е.О. Тарасенко, Г.В. Тарасенко

Аннотация — Математическое моделирование уплотнения лёссов является актуальной задачей теории и практики. В инженерной деятельности на этапе проектирования строительных объектов на просадочных грунтах большой мощности широко используется метод уплотнения глубинными гидровзрывами. Анализ геологических систем приводит к необходимости решения обратных задач в рамках исследуемой математической модели. Работа посвящена решению задачи о восстановлении глубины расположения заряда взрывчатого вещества. Построены аналитические и численные решения обратной задачи: с выбросом и без выброса грунта на поверхность строительной площадки. Проведён вычислительный программный эксперимент по оценке значений глубины с заданной точностью. Последовательное приближение к решению обратной задачи построено итерационным методом. Показана адекватность предложенного подхода данным натурного уплотнения строительного объекта.

Ключевые слова — обратная задача, лёсс, уплотнение, гидровзрыв, глубина.

I. ВВЕДЕНИЕ

Просадочные лёссовые грунты имеют значительное распространение на Земле. Залегание лёссов фиксируется на территории России, Китая, странах Средней Азии, США и многих других [1, 2]. Просадочные грунты России занимают не менее 17 % площади страны. Наиболее часто встречаются в Северо-Кавказском и Южном федеральных округах, а также в Поволжье, Сибири, Якутии и т.д. [1].

Геологическое строение Северо-Кавказского региона характеризуется наличием просадочных лёссов второго типа грунтовых условий [3]. В особенностях залегания лёссовых отложений определяется выраженная зональность. Мощность просадочных толщ в среднем составляет 50–60 метров, с локальными увеличениями до 100 метров, например, в Будённовском районе Ставропольского края [4]. Расчётная величина просадки лёссовых грунтов под действием собственного веса может достигать более двух метров [5–7]. Результаты исследований геологических систем указывают на цикличную природу строения лёссов, выраженную в

горизонтальном чередовании слоев лёссовидных суглинков и лёссов с погребенными почвами [4, 8].

Лёссы характеризуются низкой плотностью и высокой пористостью [5, 7]. Отмеченные свойства приводят к интенсивному инфильтрационному водному режиму [9]. Вследствие чего происходит быстрое размокание грунта и развитие неравномерных деформаций, таких как просадка грунта [6, 8, 10].

С целью исключения просадочности лёссовых грунтов и обеспечения надёжности, прочности оснований на площадках гражданского строительства или рельефных склонах [11, 12] на практике применяется метод глубинного уплотнения гидровзрывами [13, 14]. Разработаны математические модели, описывающие геологические процессы, происходящие при гидровзрывном уплотнении просадочных грунтов. Основой которых является дифференциальное уравнение в частных производных [15]. Доказана разрешимость краевых задач с заданными начальными и граничными условиями [16]. Построение моделей учитывает изменение физико-механических свойств грунтов под действием энергии взрыва [17, 18].

Реализация математического моделирования уплотнения геологических систем приводит к необходимости решения широкого спектра прикладных обратных задач – оценки мощности заряда взрывчатого вещества [19], коэффициента вертикальной диффузии [20] и др. В рамках настоящего исследования проведём решение актуальной инженерно-геологической задачи: восстановление глубины расположения заряда взрывчатого вещества с заданной точностью для эффективного уплотнения лёссовых грунтов глубинными гидровзрывами. Решение задачи осуществим средствами математического моделирования.

II. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Математическая модель инженерно-технологического процесса уплотнения лёссов глубинными гидровзрывами основана на полуэмпирическом дифференциальном уравнении в частных производных второго порядка и представима в виде [15]:

Статья получена 3 ноября 2025.

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

Тарасенко Галина Васильевна, Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, Российская Федерация (e-mail: galya.tarasenko0507@mail.ru).

$$\begin{aligned} \frac{\partial q}{\partial t} + \sum_{i=x,y,z} \frac{\partial(u_i q)}{\partial i} &= \\ &= \sum_{i=x,y,z} \left(\frac{\partial}{\partial i} \sum_{j=x,y,z} K_{ij} \frac{\partial q}{\partial j} \right) + Q, \end{aligned} \quad (1)$$

с начальным условием

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

и граничными условиями

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

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

где $q(t, x, y, z)$ – плотность уплотнённого глубинными гидровзрывами грунта в момент времени t ; u – вектор, определяющий распространение газа; K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} – коэффициенты диффузионного проникновения газа в грунт; Q – величина мощности заряда взрывчатого вещества (т.е. масса заряда в момент времени t_0 в точке (x_0, y_0, z_0)); δ – импульсная дельта-функция.

При проведении уплотнения возможны две реализации инженерно-технологического процесса:

– уплотнение грунта гидровзрывом с выбросом на поверхность строительной площадки, задается начально-граничной задачей (1)–(3);

– уплотнение без выброса грунта на поверхность, описывается начально-граничной задачей (1), (2), (4).

В предположении, что распространение газа, выделяемого при взрыве заряда взрывчатого вещества, происходит горизонтально в направлении оси Ox , тогда $u_y = u_z = 0$.

Решения начально-граничных задач (1)–(3) и (1), (2), (4) аналитически задаются выражениями [15]:

$$\begin{aligned} q_1(t, x, y, z) &= \frac{Q}{(4\pi t)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \times \\ &\times \exp \left\{ -\frac{(x - u_x \cdot t)^2}{4\sigma_x^2 \cdot t} - \frac{y^2}{4\sigma_y^2 \cdot t} \right\} \times \\ &\times \left[\exp \left\{ -\frac{(z - H)^2}{4\sigma_z^2 \cdot t} \right\} + \exp \left\{ -\frac{(z + H)^2}{4\sigma_z^2 \cdot t} \right\} \right], \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} q_2(t, x, y, z) &= \frac{Q}{(4\pi t)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \times \\ &\times \exp \left\{ -\frac{(x - u_x \cdot t)^2}{4\sigma_x^2 \cdot t} - \frac{y^2}{4\sigma_y^2 \cdot t} \right\} \times \\ &\times \left[\exp \left\{ -\frac{(z - H)^2}{4\sigma_z^2 \cdot t} \right\} - \exp \left\{ -\frac{(z + H)^2}{4\sigma_z^2 \cdot t} \right\} \right], \end{aligned} \quad (6)$$

где H – глубина расположения заряда взрывчатого вещества в уплотняемом лёссе; σ_x^2 , σ_y^2 , σ_z^2 – дисперсии изменений положений атомов газа в грунте в момент времени t вдоль координатных осей Ox , Oy , Oz , соответственно.

III. ОПИСАНИЕ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ

Математическое моделирование уплотнения просадочных лёссов глубинными гидровзрывами сопровождается появлением обратных задач. Рассмотрим некоторые из них. Сформулируем обратные прикладные задачи, позволяющие оценить глубину расположения заряда взрывчатого вещества.

Пусть известны Q , σ_x^2 , σ_y^2 , σ_z^2 и

– $q_1(t, x, y, z)$ средние показатели плотности грунта после глубинного уплотнения гидровзрывом при реализации инженерно-технологического процесса с выбросом грунта на поверхность строительной площадки,

– $q_2(t, x, y, z)$ средние показатели плотности грунта, уплотнённого без выброса.

Необходимо отыскать оценку глубины расположения H заряда взрывчатого вещества в результате уплотнения лёссов глубинными гидровзрывами с выбросом и без выброса грунта.

Представим соотношения (5) и (6) в виде следующих уравнений, соответственно:

$$\begin{aligned} q_1(t, x, y, z) &= \frac{Q}{(4\pi t)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \times \\ &\times \exp \left\{ -\frac{(x - u_x \cdot t)^2}{4\sigma_x^2 \cdot t} - \frac{y^2}{4\sigma_y^2 \cdot t} \right\} \times \\ &\times \left[\exp \left\{ -\frac{(z - H)^2}{4\sigma_z^2 \cdot t} \right\} + \exp \left\{ -\frac{(z + H)^2}{4\sigma_z^2 \cdot t} \right\} \right] = 0, \end{aligned} \quad (7)$$

$$q_2(t, x, y, z) = \frac{Q}{(4\pi t)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \times$$

$$\times \exp \left\{ -\frac{(x-u_x \cdot t)^2}{4\sigma_x^2 \cdot t} - \frac{y^2}{4\sigma_y^2 \cdot t} \right\} \times \quad (8)$$

$$\times \left[\exp \left\{ -\frac{(z-H)^2}{4\sigma_z^2 \cdot t} \right\} - \exp \left\{ -\frac{(z+H)^2}{4\sigma_z^2 \cdot t} \right\} \right] = 0,$$

Разрешим уравнения (7) и (8) относительно глубины H .

IV. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Разработку решений задач, определённых выше, реализуем средствами численного моделирования, итерационным методом.

Задача 1 (с выбросом). Для построения численного решения обратной задачи оценки глубины расположения заряда применим метод итераций. Отделим отрезок $[a, b]$ (графически или аналитически), включающий искомое решение H уравнения (7). Тогда (7) примет вид:

$$H = 2 \cdot \sigma_z \times$$

$$\times \left[-t \cdot \ln \left(\frac{\frac{q_1 (4\pi t)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z \times}{Q} \times \exp \left\{ \frac{(x-u_x t)^2}{4\sigma_x^2 t} + \frac{y^2}{4\sigma_y^2 t} \right\} - \exp \left\{ -\frac{(z-H)^2}{4\sigma_z^2 t} \right\}}{\exp \left\{ \frac{(x-u_x t)^2}{4\sigma_x^2 t} + \frac{y^2}{4\sigma_y^2 t} \right\}} \right) \right] - z.$$

Численное решение обратной задачи оценки глубины расположения заряда H определяется итерационным процессом последовательных приближений:

$$H^{(n+1)} = 2 \cdot \sigma_z \times$$

$$\times \left[-t \cdot \ln \left(\frac{\frac{q_1 (4\pi t)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z \times}{Q} \times \exp \left\{ \frac{(x-u_x t)^2}{4\sigma_x^2 t} + \frac{y^2}{4\sigma_y^2 t} \right\} - \exp \left\{ -\frac{(z-H^{(n)})^2}{4\sigma_z^2 t} \right\}}{\exp \left\{ \frac{(x-u_x t)^2}{4\sigma_x^2 t} + \frac{y^2}{4\sigma_y^2 t} \right\}} \right) \right] - z. \quad (9)$$

Задача 2 (без выброса). Применим метод итераций. Отделим отрезок $[a, b]$, включающий искомое решение

H уравнения (8). Тогда (8) запишем в виде:

$$H = 2 \cdot \sigma_z \times$$

$$\times \left[-t \cdot \ln \left(\frac{\frac{q_2 (4\pi t)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z \times}{Q} \times \exp \left\{ \frac{(x-u_x t)^2}{4\sigma_x^2 t} + \frac{y^2}{4\sigma_y^2 t} \right\} + \exp \left\{ -\frac{(z-H)^2}{4\sigma_z^2 t} \right\}}{\exp \left\{ \frac{(x-u_x t)^2}{4\sigma_x^2 t} + \frac{y^2}{4\sigma_y^2 t} \right\}} \right) \right] - z.$$

Процесс последовательных приближений к корню H уравнения (8) опишем следующим итерационным алгоритмом:

$$H^{(n+1)} = 2 \cdot \sigma_z \times$$

$$\times \left[-t \cdot \ln \left(\frac{\frac{q_2 (4\pi t)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z \times}{Q} \times \exp \left\{ \frac{(x-u_x t)^2}{4\sigma_x^2 t} + \frac{y^2}{4\sigma_y^2 t} \right\} + \exp \left\{ -\frac{(z-H^{(n)})^2}{4\sigma_z^2 t} \right\}}{\exp \left\{ \frac{(x-u_x t)^2}{4\sigma_x^2 t} + \frac{y^2}{4\sigma_y^2 t} \right\}} \right) \right] - z. \quad (10)$$

Для итерационных процессов (9) и (10) начальные значения $H^{(1)}$ (первый шаг итераций) выбирается произвольно из отдалённого отрезка $[a, b]$.

Условием завершения поиска приближённого решения обратных задач итерационным методом является достижение задаваемой точности вычислений ε и определяется неравенством

$$\left| H^{(n+1)} - H^{(n)} \right| < \varepsilon.$$

Построенные итерационные процессы (9) и (10) позволяют определить с задаваемой точностью решения обратных задач для оценки глубины расположения заряда взрывчатого вещества в модели уплотнения просадочных грунтов гидровзрывом, соответственно, с выбросом и без выброса грунта на поверхность.

V. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Реализуем вычислительный эксперимент с использованием опытных данных объекта строительства

на просадочных грунтах.

Исключение просадочности лёссов проведено уплотнением глубинными гидровзрывами на объекте «Строительство газохимического комплекса в г. Будённовске» [13]. Мощность лёссовых толщ на территории строительства равнялась 28 м. Суммарная просадка грунта под действием силы тяжести и своего веса достигала 78 см. Грунтовые воды обнаружены на глубине 25–29 м. Средняя плотность грунта в естественном залегании до уплотнения

$$q(t_0, x, y, z) = 1,43 \text{ г/см}^3 \text{ [4].}$$

По сетке 4,0×3,5 м в строительном котловане пробурили шестиметровые дренажно-взрывные скважины диаметром 200 мм. В скважинах расположили десяти-килограммовые заряды влагостойкого аммонита 6ЖВ, который является эталонным взрывчатым веществом для проведения грунтовых работ. Реализовали гидровзрывное уплотнение лёссов [13].

После осушения котлована строительной площадки произвели отбор монолитов грунта для определения плотностных свойств. Исследования показали, что плотность уплотнённого грунта равна от 1,60 г/см³ до 1,75 г/см³. При этом среднее значение составило 1,66 г/см³. Параметр горизонтального сноса равен нулю. Дисперсионные изменения в грунте составили 0,726 [13].

Проведём численную оценку глубины расположения заряда, при уплотнении с выбросом грунта, по итерационному алгоритму (9) с точностью до $\varepsilon = 0,001$. Расчёты проведём с помощью программы, разработанной на языке Python.

Значения глубины расположения заряда при уплотнении с выбросом грунта на поверхность строительной площадки представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения глубины расположения заряда с точностью 0,001 (с выбросом грунта)

Номер итерации	Глубина, м
1	5,21485
2	5,54729
3	5,78512
4	5,90279
5	5,95837
6	5,98718
7	5,99753
8	6,00425
9	6,00471

При реализации уплотнения грунта с выбросом численная оценка глубины расположения заряда с точностью 0,001 получена за 8 итераций. Глубина приняла значение $H=6,00425$ м.

Графическая интерпретация результата вычислительного эксперимента по оценке глубины заложения заряда взрывчатого вещества при уплотнении грунта с выбросом на поверхность на каждом шаге итераций приведён на рисунке 1.

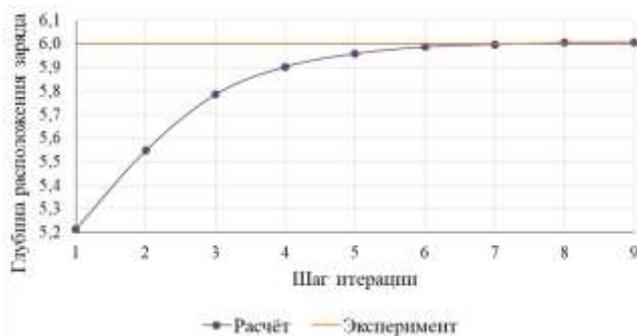


Рисунок 1. Расчётная глубина расположения заряда на каждом шаге итерации (с выбросом грунта) и экспериментальные значения

Для численной оценки глубины расположения заряда, при уплотнении без выброса грунта на поверхность котлована, применим итерационный алгоритм (10). Расчёты проведём с помощью, разработанной на языке Python, программы с точностью $\varepsilon = 0,001$.

Полученные значения глубины расположения заряда в уплотняемый грунт представлены в таблице 2 при проведении уплотнения без выброса на поверхность котлована.

Таблица 2 – Значения глубины расположения заряда с точностью 0,001 (без выброса грунта)

Номер итерации	Глубина, м
1	5,27648
2	5,63729
3	5,87614
4	5,95761
5	5,97968
6	5,99154
7	5,99817
8	6,00128
9	6,00236
10	6,00251

При реализации уплотнения грунта без выброса решение обратной задачи об оценке глубины с точностью 0,001 получено за 9 итераций. Глубина приняла значение $H=6,00236$ м.

Графически результат вычислительного эксперимента по оценке глубины в соответствии с алгоритмом (10) приведён на рисунке 2.

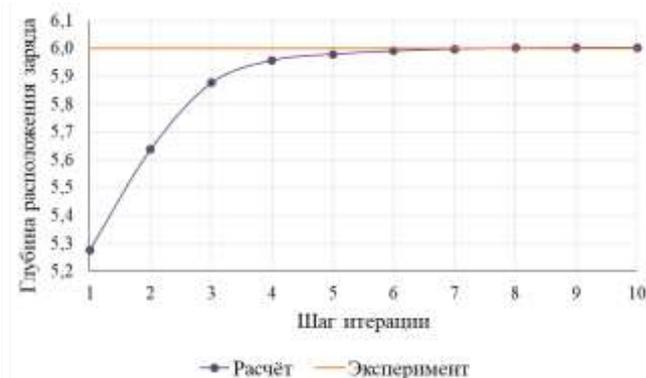


Рисунок 2. Расчётная глубина расположения заряда на

каждом шаге итерации (без выброса грунта) и экспериментальные значения

Осуществлённый эксперимент по расчёту численного значения глубины расположения заряда при уплотнении просадочных лёссов глубинными гидровзрывами, как с выбросом, так и без выброса грунта на поверхность котлована, показал высокую точность предлагаемых итерационных методов. Продемонстрировал адекватность данным натурного строительного объекта.

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящем исследовании разработаны решения обратных прикладных задач, появляющихся при математическом моделировании уплотнения геологических систем гидровзрывами.

Средствами численного моделирования построены итерационные алгоритмы решения задачи восстановления глубины расположения заряда взрывчатого вещества при реализации уплотнения грунтов с выбросом (9) и без выброса (10) на поверхность котлована. Решения учитывают свойства грунтов.

Расчётные значения глубины с точностью 0,001 получены за конечное число итераций. При реализации производственного процесса уплотнения с выбросом решение $H=6,00425$ м достигнуто за 8 итераций. Без выброса на поверхность – $H=6,00236$ м, 9 итераций.

Вычислительный эксперимент показал адекватность предложенных итерационных алгоритмов данным натурного уплотнения грунта.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны сотрудникам кафедры вычислительной математики и кибернетики факультета МКН имени профессора Н.И. Червякова СКФУ за ценные обсуждения. Авторы признательны доктору геолого-минералогических наук, профессору Галаю Борису Фёдоровичу, за рекомендации и замечания 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. 464 с.
- [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] ГОСТ 25100–2020. *Грунты. Классификация*. Москва: СтандартИнформ; 2020. 41 с.
- [4] Галай О.Б. *Буденновск: геология и город*. Ставрополь: СервисШкола, 2022. 318 с.
- [5] Григорьева И.Ю. *Микростроение лёссовых пород*. М.: НИЦ ИНФРА-М, 2020. 147 с.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Крутов В.И. О характеристиках просадочности грунтов // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 2010. №4. С. 24–30.

- [9] Liu X., Zhang X., Fu X., Yang T., Su Z. Experimental Study on Creep Characteristics of Saturated Q2 Loess // *Frontiers in Earth Science*. 2022. Vol. 10. Pp. 815275. DOI: 10.3389/feart.2022.815275.
- [10] Петраков А.А., Прокопов А.Ю., Петракова Н.А., Панасюк М.Д. Интерпретация прочностных характеристик грунта для численных исследований // *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2021. №1. С. 225–236.
- [11] СП 22.13330.2016. *Основания зданий и сооружений*. Москва: СтандартИнформ, 2016. 220 с.
- [12] Крутов В.И., Ковалев А.С., Ковалев В.А. *Проектирование и устройство оснований и фундаментов на просадочных грунтах*. М.: АСВ, 2013. 544 с.
- [13] Галай Б.Ф. *Уплотнение просадочных грунтов глубинными взрывами*. Ставрополь: СКФУ, 2015. 240 с.
- [14] *Рекомендации по уплотнению просадочных грунтов большой мощности гидровзрывным методом*. Москва: Стройиздат, 1984. 56 с. Дата актуализации 01.01.2021. Дата обращения: 01.11.2025. <https://files.stroyinf.ru/Index2/1/4293782/4293782665.htm>.
- [15] 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.
- [16] Tarasenko E.O., Gladkov A.V., Gladkova N.A. Estimation of the Solution of a Spatial Parabolic Equation Describing Anisotropic Geological Systems. In: *Current Problems of Applied Mathematics and Computer Systems. Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 1044, 2024, P. 180–186. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-03-1-64010-0_17
- [17] Jing Y., Xirong N., Qigao G., Zhiheng W., Hailong C. Strength and deformation characteristics of compacted loess with different moisture content and compaction energy // *Results in Engineering*. 2023. Vol. 20. Pp. 101637. DOI: 10.1016/j.rineng.2023.101637.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.

Mathematical modeling of charge depth restoration in loess compacted by hydraulic blasting

Elena O. Tarasenko, Galina V. Tarasenko

Annotation — Mathematical modeling of loess compaction is a pressing issue in both theory and practice. In engineering, deep hydraulic blast compaction is widely used during the design phase of construction projects on thick subsidence soils. The analysis of geological systems necessitates solving inverse problems within the mathematical model under study. This paper addresses the problem of reconstructing the depth of an explosive charge. Analytical and numerical solutions are constructed for the inverse problem: with and without soil ejection onto the construction site surface. A computational software experiment was conducted to estimate depth values with a specified accuracy. Successive approximations to the solution of the inverse problem are constructed using an iterative method. The adequacy of the proposed approach to the data of in-kind compaction of the construction site is demonstrated.

Keywords — inverse problem, loess, compaction, hydraulic blast, depth.

REFERENCES

- [1] Trofimov V.T., Balykova S.D., Bolikhovskaya N.S. et al. *Loess cover of the Earth and its properties*. M.: MSU, 2001.
- [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] GOST 25100–2020. *Soils. Classification*. M.: StandartInform, 2020. 41 p.
- [4] Galay O.B. *Budennovsk: geology and city*. Stavropol: ServiceSchool, 2022. 318 p.
- [5] Grigorieva I.Yu. *Microstructure of loess rocks*. M.: NIC INFRA-M, 2020. 147 p.
- [6] Liu Z., Liu F., Ma F. et al. Collapsibility, composition, and microstructure of loess in China // *Canadian Geotechnical Journal*. 2016. Vol. 53 (4). Pp. 1–45. DOI: 10.1139/cgj-2015-0285.
- [7] 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.
- [8] Krutov V.I. On the characteristics of soil subsidence // *Foundations and soil mechanics*. 2010. No. 4. Pp. 24–30.
- [9] Liu X., Zhang X., Fu X., Yang T., Su Z. Experimental Study on Creep Characteristics of Saturated Q2 Loess // *Frontiers in Earth Science*. 2022. Vol. 10. Pp. 815275. DOI:10.3389/feart.2022.815275.
- [10] Petrakov A.A., Prokopov A.Yu., Petrakova N.A., Panasyuk M.D. Interpretation of soil strength characteristics for numerical studies // *Bulletin of Tula State University. Earth Sciences*. 2021. No. 1. P. 225–236.
- [11] SP 22.13330.2016. *Foundations of buildings and structures*. Moscow: StandartInform; 2016. 220 p.
- [12] Krutov V.I., Kovalev A.S., Kovalev V.A. *Design and construction of foundations and bases on subsidence soils*. M.: ASV, 2013.
- [13] Galay B.F. *Compaction of subsidence soils by deep blasts*. Stavropol: NCFU, 2015. 240 p.
- [14] *Recommendations for compacting highly subsiding soils using hydraulic blasting*. Moscow: Stroyizdat, 1984. <https://files.stroyinf.ru/Index2/1/4293782/4293782665.htm>.
- [15] Tarasenko E.O., Tarasenko V.S. and Gladkov A.V. Mathematical modeling of compaction of subsidence loess soils of the North Caucasus by deep blasts // *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2019. Vol. 330. No. 11. Pp. 94–101. DOI: 10.18799/24131830/2019/11/2352.
- [16] Tarasenko E.O., Gladkov A.V. et al. Estimation of the Solution of a Spatial Parabolic Equation Describing Anisotropic Geological Systems. In: CPAMCS. *Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 1044, 2024, P. 180–186. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-031-64010-0_17
- [17] Jing Y., Xirong N., Qigao G. et al. Strength and deformation characteristics of compacted loess with different moisture content and compaction energy // *Results in Engineering*. 2023. Vol. 20. Pp. 101637. DOI: 10.1016/j.rineng.2023.101637
- [18] 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.
- [19] Tarasenko E.O. and 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. DOI: 10.18799/24131830/2022/1/3208.
- [20] Tarasenko E.O. Estimation of the vertical diffusion coefficient of gas in compacted soils by means of mathematical modeling // *Proc. ISPRAS*. 2024. Vol. 36(5). Pp. 181–190. DOI: 10.15514/ISPRAS-2024-36(5)-13.