

Математическое моделирование модуля деформации уплотняемого взрывом просадочного грунта методом регрессионного анализа

Е.О. Тарасенко, Г.В. Тарасенко

Аннотация — Математическое моделирование уплотнения просадочных грунтов взрывом приводит к задаче оценки деформационных свойств грунтов. Основным из которых является модуль деформации. Определение модуля деформации – трудоёмкая задача, приводящая к накоплению погрешности значений при реализации, как в полевых условиях, так и в лабораториях. В статье проведено математическое моделирование оценки модуля деформации методом регрессионного анализа. Построены уравнения регрессии зависимости модуля деформации грунта от диаметра камуфлетной полости для различных значений коэффициента пористости, влажности и числа пластичности грунта. Аппроксимирующие полиномы имеют коэффициенты детерминации равные от 0,8012 до 0,9891 и точность 0,84-0,96. Построенные аппроксимирующие полиномы позволили увеличить точность определения модуля деформации грунта в 1,2-1,5 раза. Регрессионные модели применимы при проектировании строительных объектов на просадочных грунтах, уплотняемых глубинными взрывами.

Ключевые слова — просадочный грунт, уплотнение, глубинный взрыв, модуль деформации, регрессионный анализ.

I. ВВЕДЕНИЕ

Просадочные лёссовые грунты широко распространены на поверхности Земли. Фиксируются в России, Казахстане, Таджикистане, Узбекистане, Туркменистане, Китае, Соединённых штатах Америки и других странах [1,2]. В нашей стране значительная их часть расположена в Северо-Кавказском и Южном регионах [1,3,4].

Лёссовым грунтам характерна низкая плотность, высокая макропористость, что способствует к стремительному размоканию грунтов и приводит к возникновению значительных неравномерных деформаций – просадок [5-7]. Мощность залегания просадочной толщи достигает 50 м [8,9], в отдельных территориях до 100 м (например, Будёновский и Благодарненский районы Ставропольского края) [3,10].

Статья получена 7 мая 2026.

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. (email: galya.tarasenko123@yandex.ru)

При проектировании зданий и сооружений на указанных грунтах особое внимание уделяется различным противопросадочным инженерно-технологическим мероприятиям [11,12]. Устранение просадочности грунтов реализуется различными глубинными и поверхностными методами. В статье рассмотрен метод уплотнения грунтов глубинными взрывами, применяемый для просадочных грунтов большой мощности, демонстрирующий значительное сокращение времени реализации и экономическую эффективность [10,13].

Исследование реологических [14], прочностных [15, 16] и деформационных [17, 18] свойств просадочных грунтов, подвергшихся техногенному воздействию, является актуальной практической задачей. В работах [19-21] авторы проводят математическое моделирование отдельных характеристик и свойств грунтов при уплотнении глубинными гидровзрывами.

В настоящей статье проведём моделирование модуля деформации грунта, основанное на применении инструментария регрессионного анализа. Проведём научно обоснованную оценку точности аппроксимирующих модельных структур.

II. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Моделирование механических свойств грунтов, уплотняемых глубинными взрывами, является объективным методом исследования, не зависящим от условий опыта.

К механическим свойствам грунтов относят деформационные характеристики. В соответствии с действующими нормативными требованиями, ключевым показателем, определяющим несущую способность и устойчивость возводимых зданий и сооружений, выступает модуль деформации грунта [11]. Эта характеристика является одной из фундаментальных для расчёта свойств грунтов.

Исследуем зависимости модуля деформации грунта от диаметра камуфлетной полости, образуемой при глубинном взрыве заряда промышленного взрывчатого вещества.

Математическое моделирование реализуем на основе экспериментальных данных [10]. Сконструируем связь модуля деформации от диаметра камуфлетной полости для различных значений физических свойств грунта. Исследования модуля деформации проведём на объекте

строительства склада Газоперерабатывающего завода, г. Будённовск Ставропольского края. На площадке строительства реализованы инженерно-технологические работы по устранению просадочности грунтов глубинными взрывами на этапе подготовки основания фундамента склада.

Построим зависимости диаметра камуфлетной полости, образуемой при взрыве взрывчатого вещества, от модуля деформации грунтов при различных значениях коэффициента пористости,

характеризующего плотность грунта. Учтём показатели влажности на границе текучести и числа пластичности. Геометрическая интерпретация представлена на рисунке 1 ($W_L=20-24\%$, $I_p=1-7\%$) и рисунке 2 ($W_L=24-28\%$, $I_p=7-12\%$).

Лёссовый грунт с $I_p=1-7\%$ классифицируется как супесь, с $I_p=7-12\%$ – лёгкий суглинок [22]. Лёссы – лёгкие пылеватые суглинки.

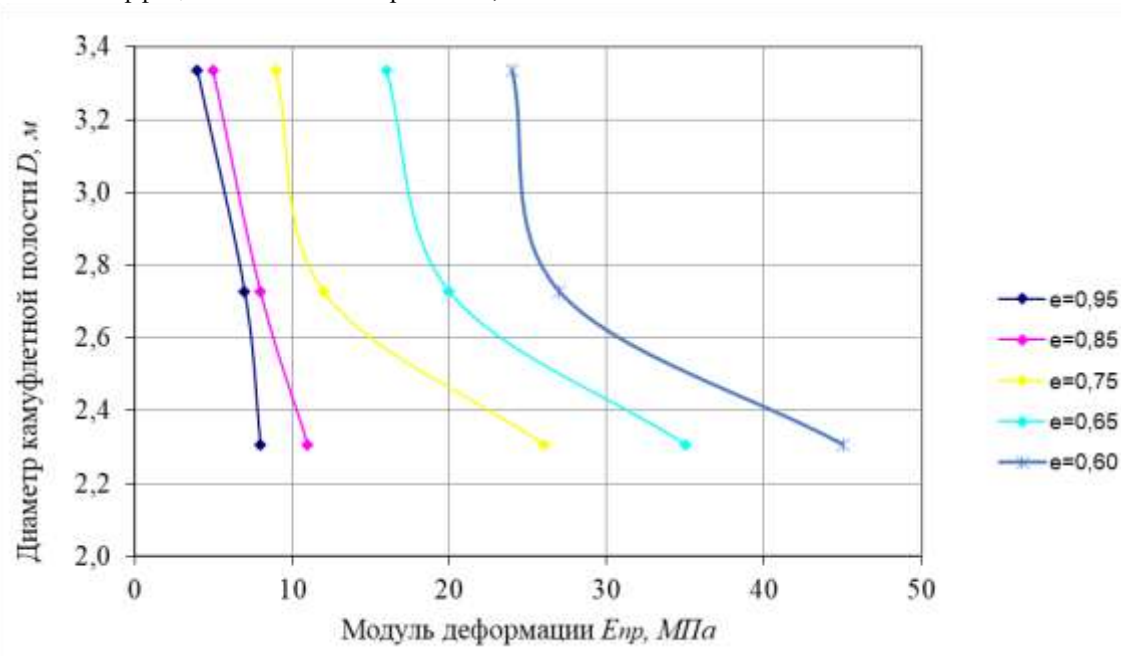


Рисунок 1. Зависимость модуля деформации грунта от диаметра камуфлетной полости для различных значений коэффициента пористости e при $W_L=20-24\%$, $I_p=1-7\%$

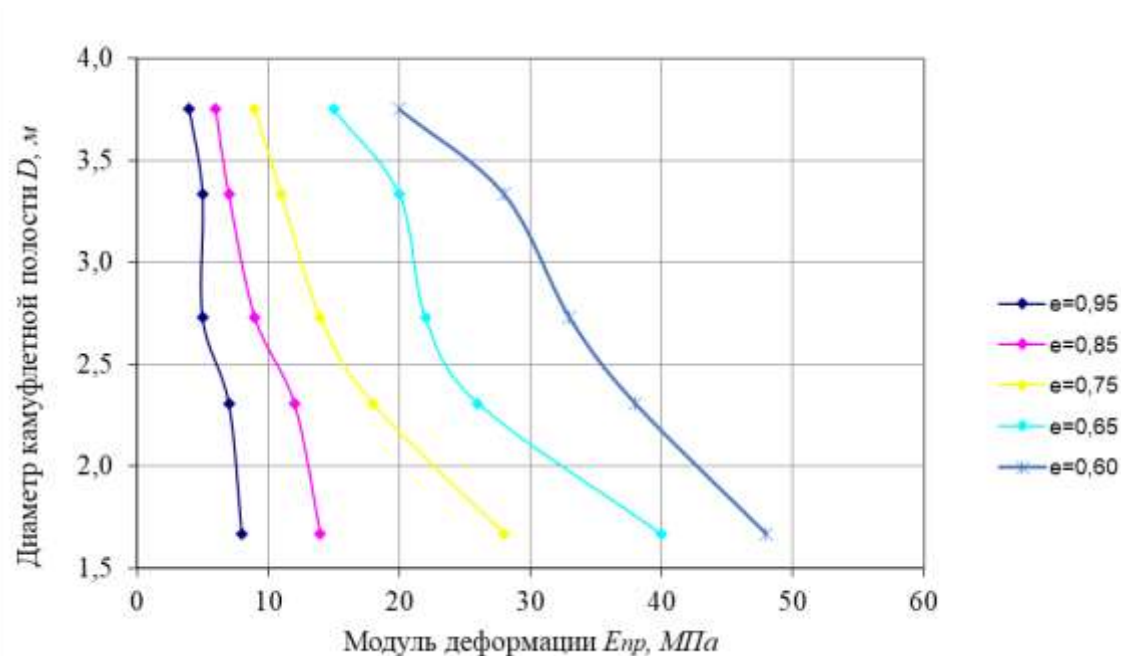


Рисунок 2. Зависимость модуля деформации грунта от диаметра камуфлетной полости для различных значений коэффициента пористости e при $W_L=24-28\%$, $I_p=7-12\%$

Из рисунка 1 следует, что плотный грунт с коэффициентом пористости $e=0.60$ обладает модулем деформации равным 24-45 МПа. Грунт средней

плотности с $e=0.65$ – 16-35 МПа. Грунт с $e=0.75$ – 9-26 МПа. Пылеватый и рыхлый грунты, соответственно с $e=0.85$ и $e=0.95$, имеют модуль деформации равный не

более 12 МПа. Отметим, что диаметры камуфлетных полостей, образуемых при глубинном взрыве зарядов взрывчатого вещества, равны 2,3 – 3,3 м.

Рисунок 2 показал, что пылеватый и рыхлый грунты имеют модуль деформации ниже порогового значения 12 МПа. Такие грунтовые основания относят к средне- и сильно-сжимаемым, могут вызвать деформацию фундамента и конструкций.

Грунт средней плотности обладает модулем деформации не менее 9 МПа и более порогового значения (рисунок 2). Плотный грунт – 15-48 МПа. Такие грунтовые основания относят к категории грунтов с высокой жесткостью и низкой сжимаемостью. Расчёты проводились для диаметров камуфлетных полостей от 1,7 до 3,8 м.

III. РЕГРЕССИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Построим регрессионные зависимости модуля деформации E от диаметра камуфлетной полости D . В таблицах 1 и 2 приведены уравнения регрессии для различных значений коэффициента пористости, влажности и числа пластичности уплотняемого глубинными взрывами просадочного грунта. Определены коэффициенты детерминации аппроксимации (КДА) и точность.

Таблица 1 – Уравнения регрессии модуля деформации E и диаметра камуфлетной полости D для различных значений коэффициента пористости e при $W_L=20-24\%$, $I_p=1-7\%$

Коэффициент пористости	Уравнения регрессии	КДА	Точность
0,95	$E = -0,2439D + 4,3339$	0,9692	0,91
0,85	$E = -0,1709D + 4,157$	0,9891	0,92
0,75	$E = -0,0509D + 3,5863$	0,8012	0,84
0,65	$E = -0,0469D + 3,8983$	0,8284	0,86
0,60	$E = -0,0399D + 4,0673$	0,8437	0,86

Проведём анализ регрессионного моделирования оценки модуля деформации грунта. Из таблицы 1 видно, что аппроксимирующие зависимости модуля деформации от диаметра камуфлетной полости имеют КДА, принимающие значения в интервале от 0,8012 до 0,9891, для различных значений коэффициентов пористости грунта при влажности на границе текучести $W_L=20-24\%$ и числе пластичности $I_p=1-7\%$. Высокие показатели КДА означают, что модельные структуры хорошо описывают данные опытного уплотнения грунтов. Уравнения позволяют оценить модуль деформации грунта с точностью не менее 0,84 и до 0,92.

Таблица 2 – Уравнения регрессии модуля деформации E и диаметра камуфлетной полости D для различных значений коэффициента пористости e при $W_L=24-28\%$, $I_p=7-12\%$

Коэффициент пористости	Уравнения регрессии	КДА	Точность
0,95	$E = -0,478D + 5,5295$	0,9107	0,93
0,85	$E = -0,2418D + 5,0787$	0,9756	0,95
0,75	$E = -0,1051D + 4,4388$	0,9215	0,95
0,65	$E = -0,0822D + 4,7792$	0,8957	0,91
0,60	$E = -0,0776D + 5,3488$	0,9849	0,96

При влажности грунта $W_L=24-28\%$ и числе пластичности $I_p=7-12\%$ (таблица 2) для всех значений пористости грунта от 0,60 до 0,95 регрессионные зависимости имеют КДА равные 0,8957-0,9849. Точность оценки модуля деформации грунта, зависящей от диаметра камуфлетной полости, равна от 0,91 и до 0,96 для различных физических характеристик.

IV. ОБСУЖДЕНИЕ

При проектировании зданий и сооружений на просадочных грунтах модуль деформации E определяется в полевых условиях естественного залегания методом штампов и в лабораторных условиях методами компрессионного, одноосного и трёхосного сжатий. Внутрिलाбораторная относительная погрешность определения модуля деформации $E_{0,1-0,2}$ с давлением 0,1-0,2 МПа составляет 23%, межлабораторная – 27 %, суммарно – 36 %. Для $E_{0,2-0,03}$, соответственно, 19, 22 и 29 %. Точность лабораторных исследований составляет 0,64-0,71 (64-71%) [23,24].

Уплотнённый грунт при $I_p=1-7\%$ является супесью, при $I_p=7-12\%$ – лёгким суглинком. Точность оценки значений модуля деформации супеси составляет 0,84-0,91, лёгкого суглинка – 0,91-0,96.

Построенные в настоящем исследовании уравнения регрессии позволяют оценить модуль деформации грунта, с учётом физических характеристик уплотнённой взрывом геологической системы с точностью не менее 0,84 и до 0,96 (84-96%).

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено математическое моделирование модуля деформации уплотняемого взрывом грунта. Разработаны уравнения регрессии, позволяющие прогнозировать модуль деформации на основе диаметра камуфлетной полости и таких характеристик грунта, как коэффициент пористости, влажность и число пластичности. Точность прогноза модуля деформации составляет не менее 0,84, достигая 0,96. Применение метода регрессионного анализа позволило повысить точность оценки модуля деформации грунта в 1,2-1,5 раза. Это делает регрессионные модели эффективным

инструментом при проектировании строительных объектов на просадочных грунтах, уплотняемых глубинным взрывом.

БЛАГОДАРНОСТИ

Особую благодарность авторы адресуют Галаю Борису Фёдоровичу, д.г.-м.н., профессору, за ценные рекомендации и конструктивные замечания при проведении исследования.

Авторы выражают признательность сотрудникам кафедры вычислительной математики и кибернетики факультета МиКН имени профессора Н.И. Червякова СКФУ за плодотворные дискуссии.

БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] Трофимов В.Т., Балькова 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] Галай О.Б. *Буденновск: геология и город*. Ставрополь: СервисШкола, 2022. 318 с.
- [4] Королев В.А., Григорьева И.Ю. Эколого-геологические системы массивов лёссовых грунтов // *Инженерная геология*. 2022. Т. XVII(2). С. 42–64.
- [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] Галай Б.Ф. *Уплотнение просадочных грунтов глубинными взрывами*. Ставрополь: СКФУ, 2015. 240 с.
- [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] *Рекомендациями 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>.
- [14] Дежина И.Ю. Об одном методе решения задач реологии в лёссовых просадочных грунтах // *Инженерный вестник Дона*. 2017. №1. <https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2017/4001>.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [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., Gladkov A.V., Gladkova N.A. Statistical modeling of mechanical properties of blast-compacted soils // *Lecture Notes in Networks and Systems*. LNNS 1585. 2025. Pp. 211–218. DOI: 10.1007/978-3-032-01831-1_20.
- [19] 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.
- [20] Tang D., Deng L., Fan W., Yu B., Du Zh., Shen Sh., Chen J., Wang S., Liu R., Song F., Zou Y. Microscopic characteristics and microstructure evolution of loess after explosion // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2025. Vol. 17(11). Pp. 7380–7396. DOI: 10.1016/j.jrmge.2025.01.058.
- [21] 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.
- [22] ГОСТ 25100–2020. *Грунты. Классификация*. Москва: СтандартИнформ; 2020. 41 с.
- [23] Дмитриев В.В., Ярғ Л.А. *Методы и качество лабораторного изучения грунтов*. М.: КДУ, 2008. 542 с.
- [24] Виноградов А.Ю., Каширский В.И., Лободенко И.Ю. и др. Модуль деформации как основная характеристика деформационной способности грунтов при проектировании сооружений лесного комплекса // *Гидросфера. Опасные процессы и явления*. 2022. Т. 4. Вып. 1. С.52–67. DOI: 10.34753/HS.2022.4.1.52.

Mathematical modeling of the deformation modulus of subsidence soil compacted by explosion using the regression analysis method

Elena O. Tarasenko, Galina V. Tarasenko

Abstract — Mathematical modeling of compaction of subsidence soils by blasting leads to the problem of assessing the deformation properties of soils. The most important of these is the deformation modulus. Determining the deformation modulus is a labor-intensive task, leading to the accumulation of errors in the values during implementation, both in the field and in laboratories. This article presents a mathematical modeling of the deformation modulus assessment using regression analysis. Regression equations are constructed for the dependence of the soil deformation modulus on the diameter of the camouflet cavity for various values of the porosity coefficient, moisture content, and plasticity index of the soil. Approximating polynomials have determination coefficients equal to 0.8012 to 0.9891 and an accuracy of 0.84–0.96. The constructed approximating polynomials made it possible to increase the accuracy of determining the soil deformation modulus by 1.2–1.5 times. Regression models are applicable in the design of construction projects on subsidence soils compacted by deep blasts.

Keywords — subsidence soil, compaction, deep blasting, deformation modulus, regression analysis.

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] Galay O.B. *Budennovsk: geology and city*. Stavropol: ServiceSchool, 2022. 318 p.
- [4] Korolev V.A., Grigorieva I.Yu. Ecological and geological systems of loess soil massifs // *Engineering Geology*. 2022. Vol. XVII(2). Pp. 42–64.
- [5] Grigorieva I.Yu. *Microstructure of loess rocks*. M.: NIC INFRA-M, 2020. 147 p.
- [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] Krutov V.I. On the characteristics of soil subsidence // *Foundations, 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] Galay B.F. *Compaction of subsidence soils by deep blasts*. Stavropol: NCFU, 2015. 240 p.
- [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] *Recommendations for compacting highly subsiding soils using hydraulic blasting*. M.: Stroyizdat, 1984. <https://files.stroyinf.ru/Index2/1/4293782/4293782665.htm>.
- [14] Dezhina I.Yu. On one method for solving rheology problems in loess subsidence soils // *Engineering Bulletin of the Don*. 2017. №1. <https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2017/4001>.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [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., Gladkov A.V., Gladkova N.A. Statistical modeling of mechanical properties of blast-compacted soils // *Lecture Notes in Networks and Systems. LNNS 1585*. 2025. Pp. 211–218. DOI: 10.1007/978-3-032-01831-1_20.
- [19] 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.
- [20] Tang D., Deng L., Fan W., Yu B., Du Zh., Shen Sh., Chen J., Wang S., Liu R., Song F., Zou Y. Microscopic characteristics and microstructure evolution of loess after explosion // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2025. Vol. 17(11). Pp. 7380–7396. DOI: 10.1016/j.jrmge.2025.01.058.
- [21] Tarasenko E.O. Estimation of the vertical diffusion coefficient of gas in compacted soils by means of mathematical modeling // *Proc. ISP RAS*. 2024. Vol. 36(5). Pp. 181–190. DOI: 10.15514/ISPRAS-2024-36(5)-13.
- [22] GOST 25100–2020. *Soils. Classification*. M.: StandartInform, 2020. 41 p.
- [23] Дмитриев В.В., Ярғ Л.А. *Методы и качество лабораторного изучения грунтов*. М.: КДУ, 2008. 542 с. Dmitriev V.V., Yarg L.A. *Methods and quality of laboratory study of soils*. M.: KDU, 2008. 542 p.
- [24] Vinogradov A.Yu., Kashirskiy V.I., Lobodenko I.Yu. et al. The deformation modulus as the main characteristic of the deformation capacity of soils in the design of forestry complex structures // *Hazardous processes and phenomena*. 2022. Vol. 4(1). Pp. 52–67. DOI: 10.34753/HS.2022.4.1.52.