

DOI:10.26104/NTIK.2023.68.68.005

Тургунбаев М.С.

**ИРИ ТАШТУУ ДИСПЕРСТИК КЫРТЫШТЫН
СТРУКТУРАСЫН МОДЕЛДӨӨ**

Тургунбаев М.С.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ДИСПЕРСНОГО
ГРУНТА С КАМЕНИСТЫМ ВКЛЮЧЕНИЕМ**

M. Turgunbajev

**MODELING OF THE STRUCTURE OF DISPERSED
SOIL WITH ROCKY INCLUSION**

УДК: 624.131.533

Гранулометрикалык курамдын теориялык-ыктымалдык берилиши жана анын негизинде топурактардын физикалык жана бекемдик касиеттерин моделдөө аркылуу топурактын бардык көп түрлөрүн камтыса болот. Топурактын минералдарынын белгилүү закон бөлүштүрүүсү ири таш камтыган кыртыштын гранулометриялык курамын, физикалык, бышыктык касиеттерин моделдөөгө мүмкүндүк берет. Макалада кыртыштын талкаланууга каршылык күчү жана ага таасир этүүчү факторлордун арасындагы көз карандылыкка өлчөмдүк талдоо жүргүзүлгөн жана жогоруда аталган көз карандылыктын жалпы түрү аныкталган. Топурактын талкаланууга туруштук берүүчү күчү жана ага таасир этүүчү факторлордун ортосундагы критерийдик теңдеме алынган. Өндүрүштүк жана лабораториялык шарттарда ири таш кошундулары бар дисперстик кыртышты талкалоо үчүн окшоштук критерийлери алынган. Окшоштук критерийлери гранулометрикалык курамды, физикалык касиеттерди, талкаланууну жана ири таштуу дисперстик кыртышты кесүү процессинин геометриялык параметрлерин эске алат. Окшоштук индикаторунун негизинде жер казуучу машинанын кесүүчү аспабы тарабынан натуралдык жана моделдик кыртышты талкалоодогу окшоштук ырасталды. Белгилүү гранулометриялык курамы, физикалык жана бышыктык касиеттерге ээ моделдик топурактын түрлөрү аныкталды.

Негизги сөздөр: *гранулометриялык курам, физикалык касиеттер, бышыктык касиеттер, бөлүштүрүү мыйзамы, топуракты моделдөө, өлчөмдүк талдоо, окшоштук критерийлери, каршылык күчү, кесүүчү аспап, ири таш кошумасы.*

Посредством теоретико-вероятностного представления гранулометрического состава и моделированием на его основе физических и прочностных свойств грунтов можно охватить все многообразие грунтов. Известный закон распределения минералов грунта позволяет смоделировать грунты с определенными гранулометрическим составом, с каменистыми включениями, физическими и прочностными свойствами. В статье проведен анализ размерностей зависимости силы сопротивления грунта разрушению от влияющих факторов и определен общий вид вышеуказанной зависимости. Получено критериальное уравнение между силой сопротивления грунта разрушению и влияющими факторами. Получены критерии подобия для разрушения дисперсного связанного грунта с отдельными каменистыми включениями в производственных и лабораторных условиях. Критерии подобия учитывают гранулометрический состав, физические свойства, разрушение и геометрические параметры процесса резания дисперсного грунта с каменистым включением. Подтверждено подобие разрушения натурального и модельного грунта режущим инструментом землеройной машины на основе индикатора подобия. Получены разновидности модельного грунта с определенными гранулометрическим составом, физическими, прочностными свойствами и каменистыми включениями.

Ключевые слова: *гранулометрический состав, физические свойства, прочностные свойства, закон распределения, моделирование грунта, анализ размерностей, критерии подобия, сила сопротивления, режущий инструмент, каменистое включение.*

By means of a theoretical and probabilistic representation of the granulometric composition and modeling on its basis of the physical and strength properties of soils, it is possible to cover the entire variety of soils. The well-known law of distribution of soil minerals makes it possible to simulate soils with a certain granulometric composition, with rocky inclusions, physical and strength properties. The article analyzes the dimensions of the dependence of the strength of the soil resistance to destruction on the influencing factors and determines the general form of the above dependence. The criterion equation between the strength of the soil resistance to destruction and the influencing factors is obtained. Similarity criteria for the destruction of dispersed cohesive soil with individual rocky inclusions in production and laboratory conditions are obtained. The similarity criteria take into account the granulometric composition, physical properties, destruction and geometric parameters of the cutting process of dispersed soil with rocky inclusion. The similarity of the destruction of full-scale and model soil by the cutting tool of an earthmoving machine based on the similarity indicator is confirmed. Varieties of model soil with certain granulometric composition, physical, strength properties and stony inclusions were obtained.

Key words: *granulometric composition, physical properties, strength properties, distribution law, soil modeling, dimensional analysis, similarity criteria, resistance force, cutting tool, rocky inclusion.*

Грунты классифицированы в зависимости от природы структурных связей на классы, подклассы, от генезиса на типы, подтипы и от вещественного, петрографического состава на виды, подвиды [1]. Гранулометрический состав грунтов очень многообразен и представляет собой совокупность случайных величин. Установление теоретического закона распределения минералов грунта позволяет смоделировать минеральный состав грунта с определенной пластичностью, которая определяет вид грунта. В зависимости от природной влажности и от пластичности изменяется консистенция грунта. С изменением плотности (объемный вес), консистенции и содержания частиц крупнее 2 мм изменяется прочность грунта. Таким образом теоретическое представление гранулометри-

ческого состава и на его основе моделирование физических и прочностных свойств грунтов охватывают все разновидности грунтов, и является актуальной задачей. Известно, что грунты содержат крупные обломки в разном количестве, геометрические форма и размеры, глубина залегания их в массиве грунта изменяются случайным образом [2],[3]. Грунты, содержащие каменные включения можно представить, как грунтово-каменную смесь с разным содержанием каменных включений по массе. Граничным значением качественного изменения подкласса грунтов является содержание минеральных частиц крупнее 2 мм более 50% [1]. В [1] указано, что, если в крупнообломочном грунте (частиц крупнее 2мм более 50%) имеется мелкозернистый наполнитель (минералы мельче 2 мм), тогда в наименовании грунта должен присутствовать вид наполнителя. Таким образом зерновой состав грунтов, содержащих минералы менее 2 мм и крупнее 2 мм представляет собой механическую смесь мелкозернистых и крупнозернистых минералов, которые сильно отличаются по физическим, химическим и прочностным свойствам. Закон распределения вероятностей минералов грунта не противоречит Пуассоновскому закону распределения [4]. Силу сопротивления разрушению дисперсного связного грунта с каменным включением можно представить функцией зависящая от факторов [5]:

$$P_{md} = f(C, v_c, a_e, b, I_p, I_L, \varphi, \varphi_0, m_1, m_2) \quad (1)$$

где C – удельное сцепление, н/м², v_c – скорость резания, м/с, a_e – большая полуось эллипсоидного обломочного включения, м, b – ширина резания, м, I_p – число пластичности грунта, %, I_L – показатель консистенции грунта, %, φ – угол внутреннего трения, рад, φ_0 – угол внешнего трения, рад, m_1 – содержание частиц менее 2 мм, %, m_2 – содержание частиц крупнее 2 мм, %.

Анализ (1) показывает, что $I_p, I_L, \varphi, \varphi_0, m_1, m_2$ измеряются безразмерными величинами, которые могут выступать в качестве отдельного безразмерного параметра – критерия подобия. А у остальных параметров (факторов) размерности получены на основе независимых первичных размерностей M (масса), L (длина), T (время) [6]-[8]. Анализ размерностей [6],[7] предполагает, что уравнение силы сопротивления резанию должно быть однородным по размерностям, т.е. у правой и левой части уравнения должны присутствовать одинаковые размерности. Для получения однородной зависимости по размерностям факторы зависимости (1) возводятся в различные степени с последующим их умножением [6],[7]:

$$P_{md} = C^a v_c^b a_e^c b^d \quad (2)$$

где a, b, c, d – степени, которых следует определить.

На основе решения системы уравнений относительно степени одноименных размерностей получено:

$$\begin{cases} a = 1 \\ b = 0 \\ c = 2 - d \end{cases} \quad (3)$$

Анализ (3) показывает, что влияние на силу сопротивления грунта разрушению размера крупного обломка и ширины резания взаимосвязано, и выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} \text{если } d = 0, \text{ тогда } c = 2, \\ \text{если } d < 1, \text{ тогда } c > 1, \\ \text{если } d > 1, \text{ тогда } c < 1 \end{cases} \quad (4)$$

Если ширина резания не влияет ($d=0$), тогда размер крупного обломка на силу сопротивления влияет квадратичной зависимостью. В результате анализа размерностей получаем общий вид зависимости между факторами и силой сопротивления грунта резанию:

$$P_{md} = C a_e^{2-d} b^d \quad (5)$$

Скорость резания грунта при проведении опытных работ соответствует диапазону изменения скорости резания в производственных условиях: 0,5...0,7 м/сек. Для уточнения вида указанной зависимости требуются проведения экспериментальных исследований. Согласно [6]-[8], если процесс разрушения дисперсного грунта с крупнообломочным включением режущим инструментом землеройной машины описывается параметрами с одинаковыми размерностями ($y_1... y_5$):

$$y_1 = f(y_2, y_3, y_4, y_5) \quad (6)$$

тогда существует эквивалентное равенство с меньшим числом $(n - m)$ безразмерных параметров:

$$\Pi_1 = f(\Pi_2, \Pi_4) \quad (7)$$

где n – количество параметров, составленных из первичных размерностей, $n = 5$, m – количество независимых первичных размерностей, $m = 3$.

Таким образом процесс разрушения грунта с каменистым включением с учетом безразмерных параметров можно описать с помощью следующего критериального уравнения:

$$\Pi_1 = f(\Pi_2, \Pi_4 \dots \Pi_{17}) \quad (8)$$

Анализ (8) показывает для обеспечения подобий процессов разрушения грунтов в полевых и лабораторных условиях необходимо соблюдения 15 критериев подобия. У грунтов преобладающими, доминирующими характеристиками выступают объемный вес и силы тяжести грунта. С учетом этого критерий подобия прочности установлен на основе соотношения удельного сцепления грунта к его удельному весу.

$$\Pi_2 = \frac{C}{\gamma l} \quad (9)$$

где l – характерный масштаб.

Характерный масштаб для объемного веса грунта $l=1$, т.е для природы и модели объемный вес грунта остается одинаковым.

$$\Pi_4 = \frac{L_n}{L_m} \quad (10)$$

$$\Pi_5 = \frac{I_{pn}}{I_{pm}} \quad (11)$$

$$\Pi_6 = \frac{I_{Ln}}{I_{Lm}} \quad (12)$$

$$\Pi_7 = \frac{\varphi_n}{\varphi_m} \quad (13)$$

$$\Pi_8 = \frac{\varphi_{0n}}{\varphi_{0m}} \quad (14)$$

Индекс (n) соответствует природе, (m) – модели. Полученные критерии подобия идентичны (*idem*) для процессов разрушения в полевых и лабораторных условиях. Критерии Π_2, Π_5, Π_6 относятся к физическим свойствам грунта, критерий Π_4 - к геометрическому подобию ширины инструмента, критерии Π_7, Π_8 - к процессу разрушения грунта. Физические свойства грунтов определяются согласно [9]. Подобие гранулометрического состава заполнителя ($m_{11} \dots m_{13}$) и обломочных минералов ($m_{21} \dots m_{26}$) [10] оригинала и модельного грунта обеспечивается соблюдением критерий подобия Π_9, Π_{17} . Критерии подобия $\Pi_{15} - \Pi_{17}$ относятся к критериям подобия каменистого включения (табл. 1).

Таблица 1

Критерии подобия гранулометрического состава грунта

Критерий	Название фракции	Размер фракции, мм	Критерий	Название фракции	Размер фракции, мм
Π_9	глина	> 0,002	Π_{12}	гравий	2...10
Π_{10}	пыль	0,002...0,05	Π_{13}	галечник	10...40
Π_{11}	песок	0,05...2	Π_{14}	галечник	40...70
			Π_{15}	галечник	70...100
			Π_{16}	галечник	100...200

			Π_{17}	валун	< 200
--	--	--	------------	-------	-------

$$\Pi_9 = \frac{m_{1H}}{m_{1M}} \quad (15)$$

$$\Pi_{10} = \frac{m_{12H}}{m_{12M}} \quad (16)$$

$$\Pi_{11} = \frac{m_{13H}}{m_{13M}} \quad (17)$$

$$\Pi_{12} = \frac{m_{21H}}{m_{21M}} \quad (18)$$

$$\Pi_{13} = \frac{m_{22H}}{m_{22M}} \quad (19)$$

$$\Pi_{14} = \frac{m_{23H}}{m_{23M}} \quad (20)$$

$$\Pi_{15} = \frac{m_{24H}}{m_{24M}} \quad (21)$$

$$\Pi_{16} = \frac{m_{25H}}{m_{25M}} \quad (22)$$

$$\Pi_{17} = \frac{m_{26H}}{m_{26M}} \quad (23)$$

Для подобных процессов разрушения грунта индикаторы подобия должны быть равны единице.

$$C_M = \frac{C_H}{k_C} \quad (24)$$

$$L_M = \frac{L_H}{k_L} \quad (25)$$

$$I_{PM} = \frac{I_{PH}}{k_{I_p}} \quad (26)$$

$$I_{LM} = \frac{I_{LH}}{k_{I_L}} \quad (27)$$

$$\varphi_m = \frac{\varphi_H}{k_\varphi} \quad (28)$$

$$\varphi_{0,m} = \frac{\varphi_{0H}}{k_{\varphi_0}} \quad (29)$$

$$m_{11,m} = \frac{m_{11H}}{k_{m_{11}}} \quad (30)$$

$$m_{12,m} = \frac{m_{12H}}{k_{m_{12}}} \quad (31)$$

$$m_{13,m} = \frac{m_{13H}}{k_{m_{13}}} \quad (32)$$

$$m_{21,m} = \frac{m_{21H}}{k_{m_{21}}} \quad (33)$$

$$m_{22,m} = \frac{m_{22H}}{k_{m_{22}}} \quad (34)$$

$$m_{23,m} = \frac{m_{23H}}{k_{m_{23}}} \quad (35)$$

$$m_{24,m} = \frac{m_{24H}}{k_{m_{24}}} \quad (36)$$

$$m_{25,m} = \frac{m_{25H}}{k_{m_{25}}} \quad (37)$$

$$m_{26,m} = \frac{m_{26H}}{k_{m_{26}}} \quad (38)$$

где $k_C, k_L, k_{I_p}, k_{I_L}, k_\varphi, k_{\varphi_0}, k_{m_{11}}, k_{m_{12}}, k_{m_{13}}, k_{m_{21}}, k_{m_{22}}, k_{m_{23}}, k_{m_{24}}, k_{m_{25}}, k_{m_{26}}$ – масштабные коэффициенты.

В (24) - (38) оставляем только масштабные коэффициенты и приравняем все выражения, тогда:

$$\frac{1}{k_C} = \frac{1}{k_L} = \frac{1}{k_{I_p}} = \frac{1}{k_{I_L}} = \frac{1}{k_\varphi} = \frac{1}{k_{\varphi_0}} = \frac{1}{k_{m_{11}}} = \frac{1}{k_{m_{12}}} = \frac{1}{k_{m_{13}}} = \frac{1}{k_{m_{21}}} = \frac{1}{k_{m_{22}}} = \frac{1}{k_{m_{23}}} = \frac{1}{k_{m_{24}}} = \frac{1}{k_{m_{25}}} = \frac{1}{k_{m_{26}}} \quad (39)$$

Выражение (39) умножаем на масштабный коэффициент k_C . В таком случае индикаторы подобия становятся равным единице:

$$\frac{1}{k_L} = \frac{1}{k_{I_p}} = \frac{1}{k_{I_L}} = \frac{1}{k_\varphi} = \frac{1}{k_{\varphi_0}} = \frac{1}{k_{m_{11}}} = \frac{1}{k_{m_{12}}} = \frac{1}{k_{m_{13}}} = \frac{1}{k_{m_{21}}} = \frac{1}{k_{m_{22}}} = \frac{1}{k_{m_{23}}} = \frac{1}{k_{m_{24}}} = \frac{1}{k_{m_{25}}} = \frac{1}{k_{m_{26}}} = 1 \quad (40)$$

Выражение (40) подтверждает, что разрушение дисперсного грунта с отдельными каменными включения-

ми в полевых и лабораторных условиях характеризуется подобностью.

Прочностные параметры консолидированного среза грунта определяются соответствующими выражениями [11]. В зависимости от зернового состава заполнителя, крупнозернистых минералов, пластичности, консистенции грунта и формы каменистого включения выделяются виды грунтов (рис. 1).

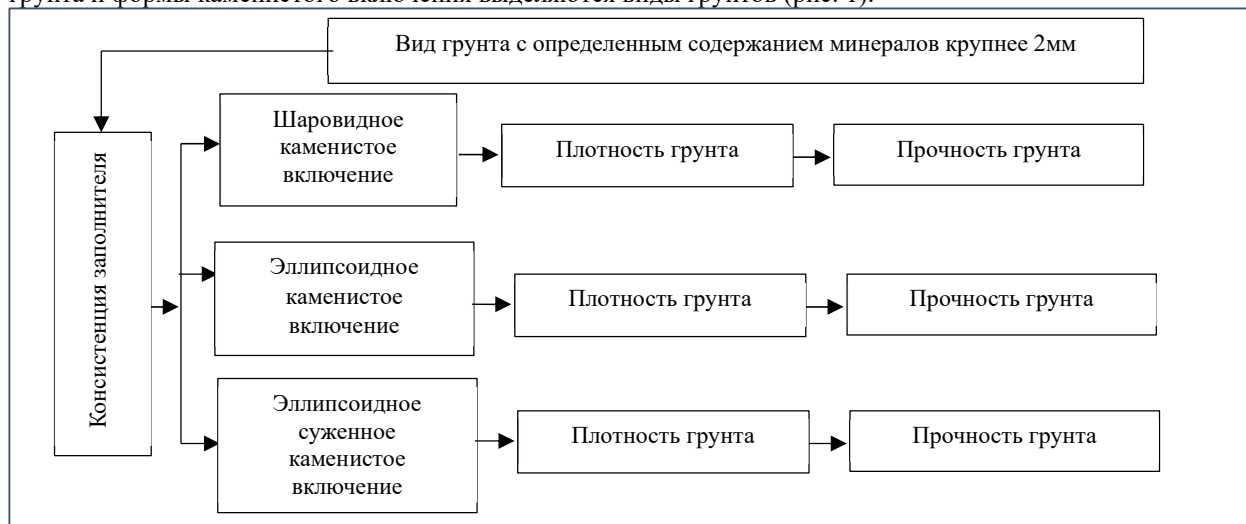


Рис. 1. Виды модельных грунтов

В зависимости от I_p выделяются 3 вида грунта [1], содержание минералов крупнее 2 мм в модельном грунте составляет 30%, 70% [11], природная влажность изменяет консистенции заполнителя $I_L = 0...0,5$; $I_L = 0,5...0,75$ [11], формы каменистого включения изменяется от шаровидной до эллипсоидно суженной [12].

Общее количество опытов по резанию грунта, содержащего каменистое включение, определяется выражением:

$$N_o = N n_{\text{вк}} n_{m_f} n_{m_p} n_{I_L} \quad (41)$$

где N – количество опытов по плану эксперимента, $n_{\text{вк}}$ – количество видов грунта, n_{m_f} – количество геометрических форм каменистого включения, n_{m_p} – количество градаций процентного содержания частиц крупнее 2мм, n_{I_L} – количество градаций консистенций заполнителя грунта,

Выводы. Установленный закон распределения минералов грунта позволяет моделировать его гранулометрический состав. Содержание минералов менее 0,002мм (глинистых частиц) влияет на пластичность грунта, а в зависимости от природной влажности можно смоделировать консистенцию грунта.

Литература:

1. ГОСТ 25100-2011. Грунты. Классификация. - М.: Стандартинформ, 2018. - 45 с.
2. Грунтовые условия Тургумбаев, Ж.Ж. Грунтовые условия эксплуатации землеройной техники на территории Кыргызской Республики [Текст]: монография / Ж.Ж.Тургумбаев, М.С. Тургунбаев. - Бишкек.: Бишкектранзит, 2008. - 80 с.
3. Интенсификация рабочих процессов землеройных машин. Кравцов Е. А. Учебное пособие. - М.: МАДИ, 1988. - 91 с.
4. Тургунбаев М.С. К вопросу закона распределения минеральных частиц грунта. Высокие технологии в строительном комплексе. Научно-технический журнал. / Воронежский государственный технический университет. online – www.ttmko.ru. №1 2020.
5. Turgumbayev J.J., Turgunbayev M. S. Prediction of the cutting resistance force of the soil containing stony fractions. News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. / Series of geology and technical sciences. ISSN 2224-5278 Volume 5, Number 449 (2021). <https://doi.org/10.32014/2021.2518-170X.86> . (in Eng).
6. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. - М.: Наука, 1977.
7. Бриджмен П. Анализ размерностей. - Ижевск: Изд-во РХД, 2001.
8. Веников В.А. Теория подобия и моделирования. - М.: Высшая школа, 1976.
9. ГОСТ 5180-2015. Методы лабораторного определения физических характеристик. - М.: Стандартинформ, 2016. - 23 с.
10. ГОСТ 12536-2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. - М.: Стандартинформ, 2015. - 24 с.
11. Методика оценки прочности и сжимаемости крупнообломочных грунтов с пылеватым и глинистым заполнителем и пылеватых и глинистых грунтов с крупнообломочными включениями. ДальНИИС Госстроя СССР. - М.: НПО «Всесоюзная книжная палата», 1989. - 24 с.
12. Тургунбаев М.С. Исследование крупнообломочных включений грунтов. / Известия КГТУ им. Раззакова №16. - Бишкек, 2009.
13. Тургумбаев Ж.Ж., Тургунбаев М.С. Теоретическое определение силы сопротивления грунта с каменистыми включениями разрушению. / Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана. 2010. №. 5. С. 15-20.