

**ТУРГУМБАЕВ Ж.Ж., ТУРГУНБАЕВ М.С.**

¹Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, Бишкек, Кыргызская Республика

²Таласский государственный университет, Талас, Кыргызская Республика

TURGUMBAYEV J. J., TURGUNBAYEV M. S.

¹Kyrgyz State Technical University n.a. I. Razzakov, Bishkek, Kyrgyz Republic

²Talas State University, Talas, Kyrgyz Republic
jenishtur@gmail.com melis.turgunbaev08@gmail.com

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭНЕРГОЕМКОСТИ РЕЗАНИЯ ГРУНТОВ, СОДЕРЖАЩИХ КАМЕНИСТЫЕ ВКЛЮЧЕНИЯ В ВЕРОЯТНОСТНОМ АСПЕКТЕ**FORECASTING THE ENERGY CAPACITY OF CUTTING SOILS CONTAINING STONE INCLUSIONS IN A PROBABLE ASPECT**

Топурактын таш кошулмаларынын формалары, өлчөмдөрү жана топуракта жайгашкан тереңдиктери ыктымалдуулук мүнөзгө ээ болоору аныкталган. Макалада топурактын минералдык бөлүкчөлөрүнүн белгилүү бөлүштүрүү мыйзамдарынын негизинде топурактын майда таш (галечник) жана чоң таш (валун) кошулмаларынын ыктымалдуу, тегеректелген саны аныкталган. Ар кандай таштарды камтыган топуракты кесүүнүн ыктымалдуу энергия керектөөсүнүн аналитикалык формуласы келтирилген. Топурактын i -өлчөмдөгү, j -формадагы жана кесүү учурунда ар кандай багытталган кыймылда болгон таштын ыктымалдуу санын эске алуу менен таштак топуракты кесүү энергия керектөөсү эсептелет. Таштын өлчөмүнө, формасына, топурактын талкалануу түрүнө, бекемдигине жана таштуулугуна жараша топуракты кесүү энергия керектөөсүн талдоо эсептөө формасында жүргүзүлөт.

Өзөк сөздөр: топурак, таш, өлчөм, форма, таштын багытталган кыймылы, топурактын талкалануу түрлөрү, ыктымалдуу саны, ыктымалдуу энергия керектөөсү.

Установлено, что геометрические формы, размеры каменных включений, их расположение в грунтовой массе носит стохастический характер. В статье, на основе известных законов распределения минеральных частиц грунта, аналитически определено вероятностное, округленное количество галечниковых и валунных включений грунта. Приведено аналитическое выражение для определения вероятностной энергоемкости резания грунта, содержащего различные каменные включения. С учетом вероятностного количества каменистого включения i -того размера, j -той формы, которые по-разному поступательно движутся при резании грунта, рассчитывается энергоемкость резания грунта с различными каменистыми включениями. Проведен вычислительный анализ изменения энергоемкости резания грунта в зависимости от размера, формы каменистого включения, вида разрушения, прочности и каменистости грунта, рабочим органом землеройной машины.

Ключевые слова: грунт, каменистое включение, размер, форма, поступательное движение камня, виды разрушения грунта, вероятностное количество, вероятностная энергоемкость.

It has been established that the geometric shapes, sizes of stony inclusions, and their location in the soil massif are stochastic in nature. In the article, on the basis of the known laws of distribution of mineral soil particles is analytically determined, the probabilistic rounded amount of



pebble and boulder inclusions of soil. An analytical expression is given to determine the probabilistic energy intensity of cutting soil containing various stony inclusions. Taking into account the probabilistic amount of a stony inclusion is calculated of the i -th size, j -th shape, which progressively moves in different ways when cutting the soil, the energy intensity of cutting the soil with various stony inclusions. A computational analysis of the change in the energy consumption of soil cutting is carried out depending on the size, shape of a rocky inclusion, the type of destruction, strength and rockiness of the soil, by the working body of an earth-moving machine.

Key words: soil, rocky inclusions, size, shape, translational movement of stone, types of soil destruction, probabilistic quantity, probabilistic energy intensity.

Введение. В общем объеме грунтового фона Кыргызской Республики грунты, содержащие каменистые включения (камни) составляют более 23% [1]. Площадь каменистых почв в стране, только в зоне земледелия составляет около 3806 тысяч гектаров, из них 1477 тысяч гектаров слабокаменистые, 1495 тысяч гектаров среднекаменистые и 10,4 тысяч гектаров сильнокаменистые почвы [2]. Разработка грунтов, содержащих каменистые включения землеройными машинами сопровождается появлением динамических нагрузок, абразивным износом режущих инструментов, преждевременными аварийными и усталостными разрушениями металлоконструкций машины и повышением энергоемкости единицы резания грунтов. Геометрические формы, размеры каменистых включений, их расположение в грунтовом массиве имеют стохастический характер [1].

В мире наблюдается тенденция автоматизации землеройных работ на основе моделей, описывающих взаимодействие рабочего органа с грунтом [3],[4], задания особенностей грунтовых условий в цифровом формате, учитывая сложность условий работы землеройных машин и монотонность выполняемых операций.

Постановка задачи. При строительстве зданий и сооружений выполняется большой объем земляных работ как на однородных грунтах, так и в грунтах, содержащих каменистые включения. Очевидно, аналитическое определение энергоемкости резания грунтов землеройными машинами, в том числе одноковшовыми экскаваторами, как объективный критерий оценки эффективности разработки грунтов становится актуальной задачей.

Разработка методики и результаты исследований. Исследуется энергоемкость резания дисперсного (связного, пластичного) грунта, содержащего различные по размеру и форме каменистые включения. Установлено, что камни распределены в грунтовом массиве равномерно, имеют приблизительно одинаковый фракционный состав при различной степени каменистости грунтов [5]. В зависимости от глубины залегания каменистых включений грунт разрушается с интенсивным, с экстенсивным выкатыванием камня на поверхность грунта и с вдавливанием камня в массив грунта [6]. Для практических расчетов энергоемкости резания грунта, содержащего каменистое включение принимаются следующие условные обозначения: каменистое включение i -того размера, j -той формы, имеет k -тое движение при разрушении грунта. Энергоемкость резания также зависит от количества каменистых включений, которого режущий элемент землеройной машины встречает в процессе резания грунта. Количество каменистых включений в массиве грунта определяется в вероятностном аспекте. По результатам статистического анализа паспортов грунтов, полученных из институтов «Кыргызгипропроводхоз» и «Кыргызавтодортранспорт», Управления геологии, в работе [7] установлены законы распределения минеральных частиц грунта. Вероятностное распределение минеральных частиц грунта не противоречит закону распределения Пуассона. Энергоемкость резания грунта, содержащего каменистое включение определенного размера, формы, который разрушается по определенному виду разрушения – $E_{e_{ijk}}$ определяется по известной методологии [8]. Сумма единичного резания грунта, содержащего каменистое включение определенного размера, формы, разрушающегося по определенному виду разрушения с учетом вероятностного количества



камней, представляет собой вероятностную суммарную энергию резания грунта, содержащего каменные включения определенного размера:

$$E_{e_{n_i}} = n_{ijk} \sum_{\substack{j=1 \\ k=1}}^{k=n} E_{ijk} \quad (1)$$

где n_{ijk} – вероятностное количество камня i -того размера, j -той формы, имеющего k -тый вид движения при разрушении грунта.

Общая вероятностная энергоемкость резания грунта, содержащего каменные включения различных геометрических размеров, форм, и которые разрушаются по различному виду разрушения определяется формулой:

$$E_{ep} = \sum_{i=1}^{i=n} E_i \quad (2)$$

На основе общей массы пробы грунта [9] определяется вероятностное округленное количество галечниковых или валунных включений i -того размера:

$$n_{ei} = \frac{m_{fi}}{m_{ei}} \quad (3)$$

где m_{fi} – валовая масса фракции i -того размера в пробе грунта, m_{ei} – масса галечника или валуна i -того размера.

В свою очередь масса галечника или валуна определяется выражением:

$$m_{ei} = \rho_{ei} V_e \quad (4)$$

где ρ_{ei} , V_e – плотность и объем каменного включения.

Объем эллипсоидного каменного включения равен [10]:

$$V_e = \frac{4}{3} \pi a_e b_e c_e \quad (5)$$

где a_{ei} , b_{ei} , c_{ei} – большая и малая полуоси эллипсоидного каменного включения.

Объем шаровидного каменного включения равняется [10]:

$$V_e = \frac{4}{3} \pi R_{ei}^3 \quad (6)$$

где R_{ei} – радиус шаровидного каменного включения.

Вероятностное количество каменных включений j -той геометрической формы содержащихся в грунте определяется выражением:

$$n_{aj} = k_{ij} n_{ei} \quad (7)$$

Принимаются следующие геометрические формы каменного включения, введенные нами впервые [11], табл.1., на основе закономерности изменения его шаровидной формы.

Таблица 1 – Геометрическая форма галечника и валуна

j	Граничное значение коэффициента сжатия, k_{sa}	Описание геометрической формы
1	0...0,1	Блискошаровидная форма
2	0,1...0,3	Блискоэллипсоидновыпуклая форма
3	0,3...0,5	Блискоэллипсоидная форма
4	0,5...0,7	Блискоэллипсоидносжатая форма
5	0,7...0,9	Блискоэллипсоидносуженная форма

Коэффициент сжатия эллипсоида определяется зависимостью:

$$k = \frac{a_e}{b_{e,sa}} \quad (8)$$

Вероятностное количество каменных включений, имеющих различные поступательные движения в процессе резания грунта определяется зависимостью:

$$n_{e_{ijk}} = k_{ij} k_{ijk} n_{e_i} \quad (9)$$

Валовая масса фракции i -того размера в пробе грунта определяется на основе статистического анализа паспортов грунтов, принадлежащих строительно-климатическим районам Кыргызской Республики [12]. В [9] глинистый дисперсный грунт по содержанию каменных включений разделяется на следующие виды каменности: супесь, суглинок и глина с содержанием частиц размером более 2 мм 15...25% и супесь, суглинок и глина с содержанием частиц размером более 2 мм 25...50%. Самым представительным комплексом грунта выступает супесь содержащая галечниковые и валунные включения [1],[13].

На рис. 1 приведено общее вероятностное количество галечников и валунов для 1 строительно-климатического района Кыргызской Республики.

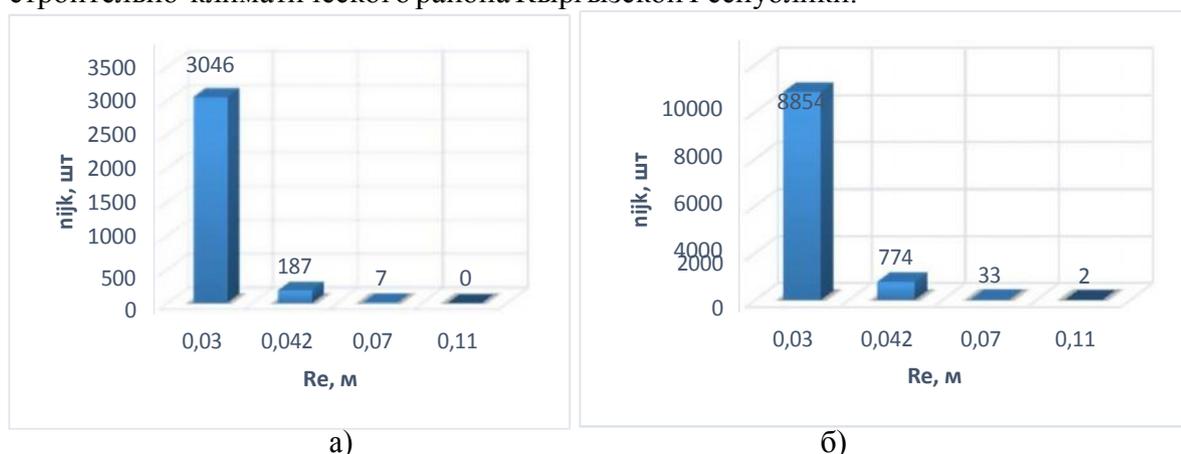


Рис. 1. Вероятностное общее количество галечников и валуна по 1 строительно-климатическому району: а) каменность грунта – 15...25%, б) каменность грунта – 25...50%

Анализ рис. 1 показывает, что с увеличением каменности грунта возрастает общее вероятностное количество каменных включений грунта до 4,71 раза.

В [4] приводится, что напряженное состояние зоны разрушения грунта с каменным включением условно состоит из однородной и каменной зон. В зависимости от соотношения ширины резания и габаритного размера камня изменяется активная площадь поверхности взаимодействия каменного включения с грунтом, приводящая к изменению продольного размера ядра из уплотненного грунта [14]. Разработаны регрессионные математические модели прогнозирования энергоемкости резания грунта, содержащего близкочашиновидное, близкоэллипсоидное и близкоэллипсоидносуженное каменное включение. При разрушении грунта каменное включение интенсивно (быстро) выкатывается, экстенсивно (медленно) выкатывается на поверхность грунта и вдавливаются в массив грунта узким режущим элементом [6]. В регрессионных моделях переменными влияющими факторами являются прочность грунта, оцениваемое числом C_0 ударника ДорНИИ [15] и активная площадь на поверхности каменного включения – f_e . Интенсивное выкатывание камня на поверхность грунта происходит, когда режущий элемент (зуб ковша) действует ниже точки $-0,75R_e$ радиуса каменного включения, экстенсивное выкатывание наблюдается, когда координата действия зуба ковша на камень находится в диапазоне $\pm 0,75R_e$ (от центра тяжести камня). Каменное включение вдавливается в массив грунта, в случае воздействия режущего элемента вышек точки $+0,75R_e$ [6].

Классификация вероятностного количества каменных включений по геометрической форме и траектории движения камня при разрушении грунта приведена на рис.2.

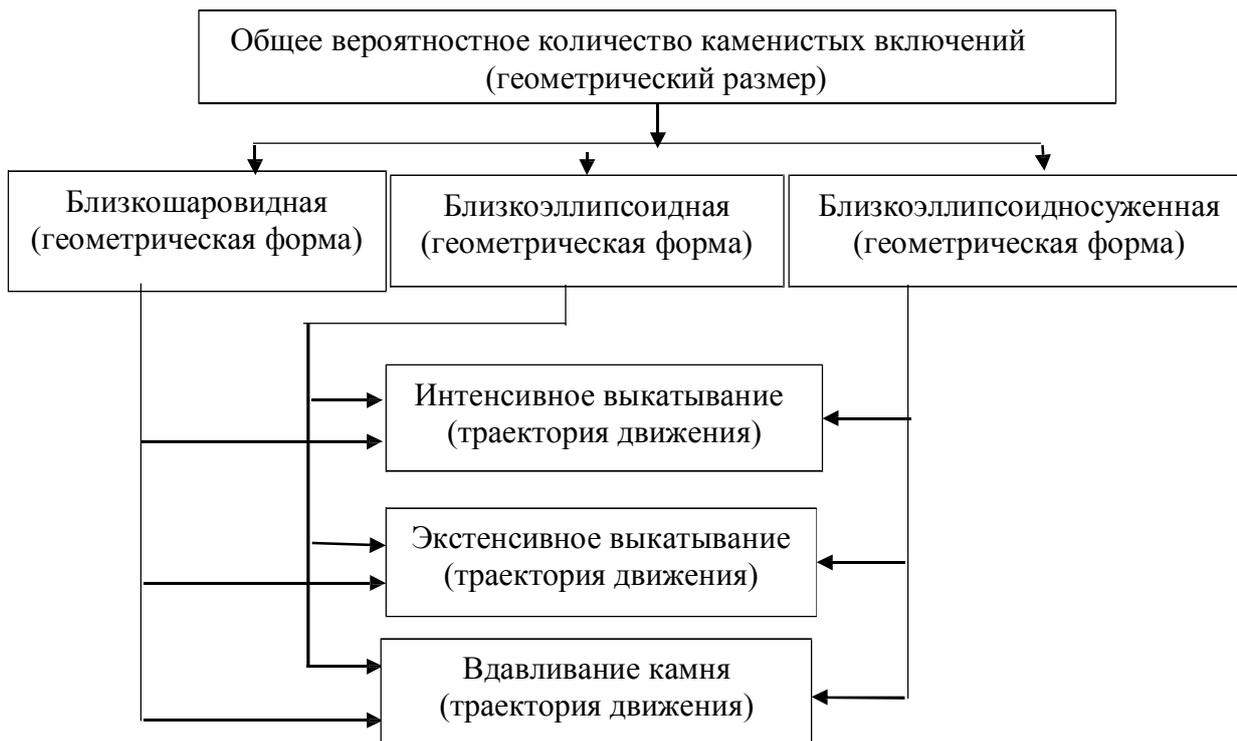


Рис.2. Классификация вероятностного количества каменных включений по форме и траектории движения камня при разрушении грунта

Сначала определяется общее вероятностное округленное количество галечниковых и валунных включений i -того размера по формуле (3) на основе законов распределения минеральных частиц грунта [7]. Согласно допущения что, камни имеют приблизительно одинаковый фракционный состав и равномерно расположены в массиве грунта [5] и схеме, приведенной на рис.2 значение коэффициента k_{ij} (формула 7), учитывающее количество каменных включений различной геометрической формы и значение коэффициента k_{ijk} , (формула 9) принимается равным 1/3.

Составляющими регрессионной модели энергоемкости резания грунта с каменным включением являются: общая сила сопротивления грунта резанию – P_{re} , сила сопротивления однородной зоны грунта - P_{re} , длина резания – L_{fe} , боковой угол разрушения прорези - ψ_{se} и степень полуволны синусоиды, которая аппроксимирует кривую резания - n_{se} [14].

В табл.1 приведены данные энергоемкости резания грунта с прочностью ($C_0 = 7$ ударов), содержащего шаровидное ($R_e = 0,03$ м), эллипсоидное, и эллипсоидносуженное ($a_e = 0,03$ м) каменное включение, разрушающегося по различному виду разрушения, полученные на основе известных зависимостей [8],[14]. Каменность грунта составляет 15...25% [9].

Таблица 1 – Энергоемкость резания грунта, содержащего различные каменные включения

Геометрическая форма	Вид траектории камня	n_{ijk} , шт	Составляющие энергоемкости резания грунта							E_{ep} , Дж/м ³
			f_e , см ²	P_{re} , н	P_{he} , н	L_{fe} , см	ψ_{se} , град	n_{se}	V_e , м ³	
Блискошаровидная	интенсивное	338	27,37	1047,8	858,5	3,06	53,56	1,67	0,0094	3127,32
	экстенсивное	338	51,46	1927,9	1601,3	4,2	52,1	1,57	0,0143	5223,02
	вдавливание	338	14,14	2342,86	873,7	3,98	53,2	1,62	0,0097	6830,69



Близко эллипсоидная	интенсивное	338	22,329	951,56	861,13	2,37	54,6	1,68	0,00904	2385,89
	экстенсивное	338	31,79	1679,81	1549,93	3,01	55,01	1,41	0,01331	3693,23
	вдавливание	339	7,5	2261,47	861,42	2,7	54,1	1,66	0,00921	4466,6
Близко эллипсоидно суженная	интенсивное	339	16,705	897,32	849,58	1,8	55,74	1,61	0,00874	1801,7
	экстенсивное	339	19,93	1638,02	1510,64	2,12	56,25	1,44	0,01274	2629,33
	вдавливание	339	2,248	1891,65	830,71	1,86	56,6	1,602	0,00867	3017,83

На рис. 3-5 показано изменение вероятностной энергоемкости резания грунта, в зависимости от размера, формы каменистых включений и вида разрушения грунта по 1 строительно-климатическому району Кыргызской Республики. Каменистость грунта составляет 15...25%.

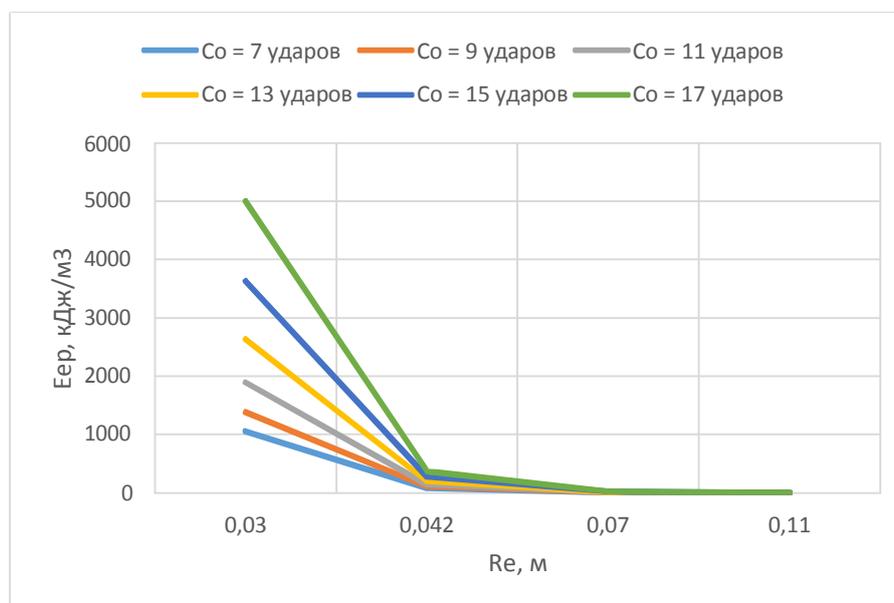


Рис. 3. Изменение вероятностной энергоемкости резания грунта с близкошаровидным каменистым включением, разрушающегося с интенсивным выкатыванием камня на поверхность грунта, в зависимости от геометрического размера каменистого включения

Анализ этого графика показывает, что наибольшая вероятностная энергия затрачивается на резание грунта, содержащего каменистое включение с диаметром 0,06 м. Это объясняется тем, что каменистые включения с $R_s = 0,03$ м имеют наибольшую вероятность появления в грунте.

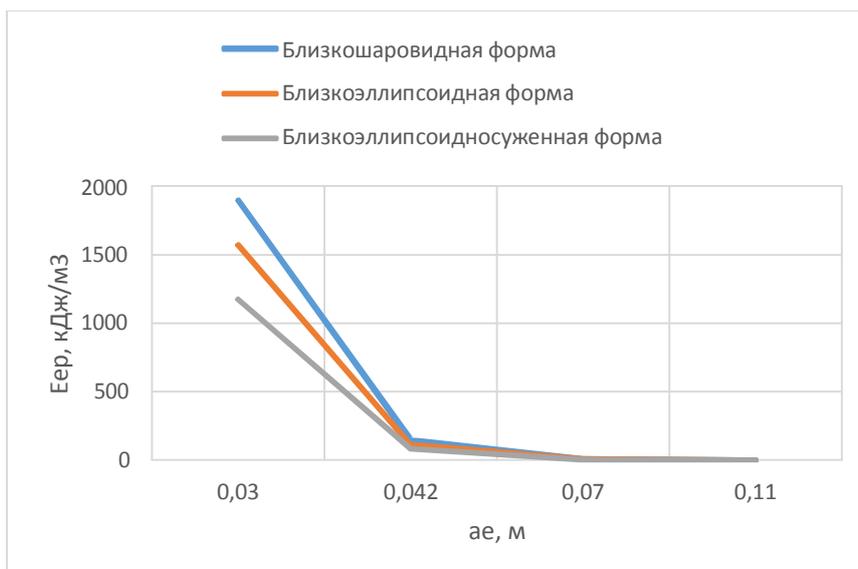


Рис. 4. Изменение вероятностной энергоемкости резания грунта с прочностью ($C_0 = 11$ ударов) разрушающегося с интенсивным выкатыванием камня, в зависимости от геометрической формы каменистого включения

Анализ рис.4 показывает, что резание грунта, содержащего шаровидное каменистое включение, характеризуется высокой энергоемкостью резания грунта узким режущим элементом. Это объясняется тем, что у каменистого включения шаровидной формы наибольшая активная площадь взаимодействия с грунтом в каменистой зоне, приводящая к возрастанию энергоемкости резания грунта.

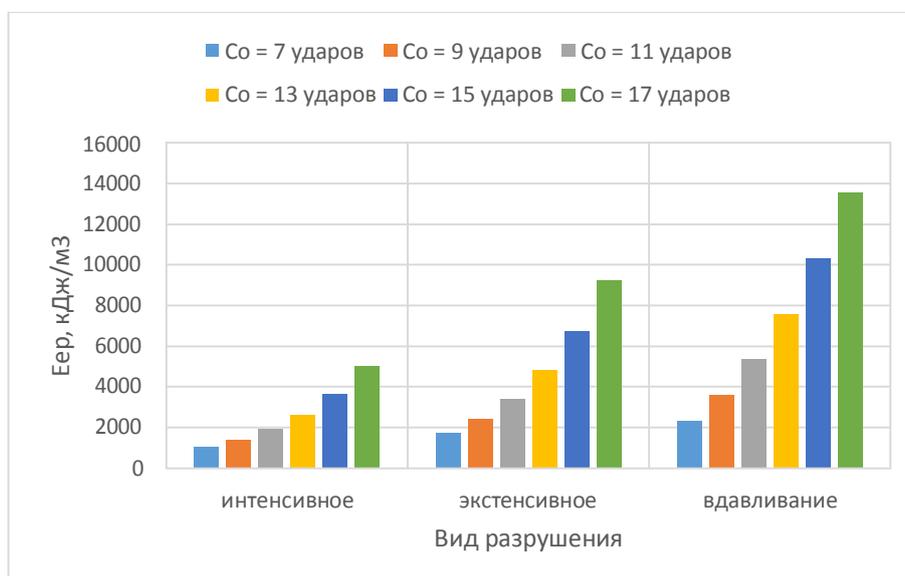


Рис. 5. Изменение вероятностной энергоемкости резания грунта с шаровидным каменистым включением ($R_e = 0,03$ м) в зависимости от вида разрушения грунта

Анализ этого графика показывает, что с увеличенной энергоемкостью характеризуется процесс резания грунта с вдавливанием каменистого включения в массив грунта. При вдавливании каменистого включения в массив грунта режущим элементом преобладающими видами деформации грунта выступают сжатие, смятие грунта, характеризующие более высоким сопротивлением грунта деформации.



На рис.6 показана динамика суммарной энергоемкости резания грунта, содержащего каменные включения определенного размера (формула 1), в зависимости от прочности грунта и размера каменного включения. Суммируются единичные энергоемкости резания грунта с каменными включениями различной геометрической форм, разрушающегося по различной схеме разрушения, с учетом вероятностного количества камней.

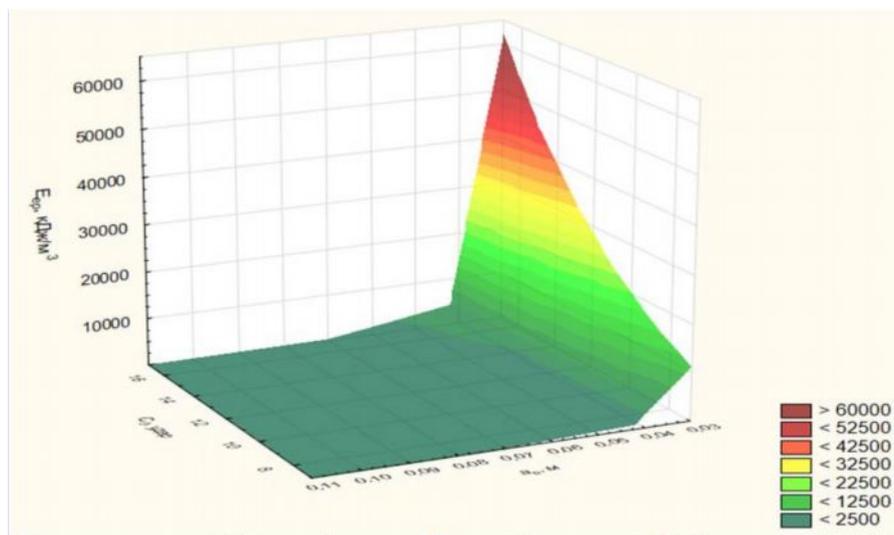


Рис. 6. Динамика суммарной вероятностной энергоемкости резания грунта с каменными включениями определенного размера в зависимости от прочности грунта и размера каменного включения

Анализ этого рисунка показывает, что наибольшей энергоемкостью обладает резание грунта, содержащего каменное включение радиусом $R_c = 0,03$ м. С увеличением прочности энергоемкость грунта с каменными включениями определенного размера изменяется не линейной зависимостью.

Изменение общей вероятностной энергоемкости резания узким режущим элементом грунта, содержащего различные каменные включения, разрушающегося по различному виду разрушения (формула 2) приведено на рис.7. В этом случае происходит суммирование энергоемкостей резания грунта, содержащего каменные включения различных размеров.



Рис. 7. Изменение общей вероятностной энергоемкости резания грунта с различными каменными включениями, разрушающегося по различной схеме разрушения в зависимости от прочности грунта



Из анализа данных на рис.7 можно сделать вывод, что общая вероятностная энергоёмкость резания грунта с каменистыми включениями различных размеров, форм и видами разрушения возрастает нелинейно: в области менее крепких грунтов ($C_o = 7...11$ ударов) энергоёмкость возрастает менее интенсивно, чем, когда разрушается грунт с высокими прочностными свойствами рабочим органом землеройной машины. Сравнительный анализ каменистости грунтов показывает, что с увеличением каменистости возрастают вероятности появления более крупных фракций грунта, при этом рост энергоёмкости резания грунта составляет более 3-х раза, относительно грунта, у которого каменистость - 15...25%.

Выводы. Таким образом разработанная методология позволяет аналитически определить энергоёмкости резания грунта в зависимости от геометрического размера, формы каменистого включения, вида разрушения, прочности и каменистости грунта в вероятностном аспекте. Аналитическая оценка энергоёмкости резания грунта является более объективным критерием оценки совершенствования технологии разработки как однородных, так и каменистых грунтов землеройными машинами.

Список литературы

1. 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.
2. Мамытова Д.А. Природно-сельскохозяйственное районирование и использование земельных ресурсов Кыргызской Республики / автореф.дис. на соиск. учен.степ.докт.с/х.наук: 03.00.27 / Мамытова Д.А.; НАН КР. - Бишкек: 1998. – 35 с. [Электронный ресурс] Режим доступа: // URL:<http://earthpapers.net/preview/35594>.
3. Turgumbayev J.J., Turgunbayev M.S. (2021) Predicting the resistance force of homogeneous ground to cutting // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of geology and technical sciences. ISSN 2224-5278 Volume 4, Number 448 (2021), 91-98. <https://doi.org/10.32014/2021.2518-170X.86>. (in Eng).
4. 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), 161-169. <https://doi.org/10.32014/2021.2518-170X.110>. (in Eng).
5. Тургумбаев Ж.Ж. Пылеватые и глинистые грунты с крупнообломочными включениями [Текст] / Ж.Ж.Тургумбаев, М.С.Тургунбаев // Известия КГТУ им. И. Раззакова. - Бишкек.: 2009. – №16. - С.151-154.
6. Тургунбаев М.С. К вопросу особенности разрушения грунта, содержащего обломочно-каменные включения рабочим органом землеройной машины / М.С.Тургунбаев // Интернет-журнал «Науковедение». - 2017. - №3. [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://naukovedenie.ru>.
7. Turgunbayev M.S. (2020) To the question of the law of distribution of mineral particles of soil. [К вопросу закона распределения минеральных частиц грунта] High technologies in the construction complex. Scientific and technical journal. No. 1, 2020. pp. 134-141. www.ttmko.ru. ISSN 2618-9054 (in Russian).
8. Тургумбаев Ж.Ж. Прогнозирование энергоёмкости резания грунта, содержащего каменистое включение [Текст] / Ж.Ж.Тургумбаев, М.С.Тургунбаев // Техника и технология транспорта: <http://www.transport-kgasu.ru> 2021. № 3 (22) http://transport-kgasu.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=10&Itemid=2. URL статьи: <http://transport-kgasu.ru/files/N22-16TI321.pdf>
9. Межгосударственный стандарт ГОСТ 25100-2020 «Грунты. Классификация». [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200174302>



- 10.Алиев И.И. Краткий справочник по математике [Текст] / И.И.Алиев. – Москва: РадиоСофт, 2006. – 190 с.
- 11.Тургумбаев Ж.Ж. Модель прогнозирования силы сопротивления резанию грунта, содержащего различные каменные включения / Ж.Ж.Тургумбаев, М.С.Тургунбаев // Высокие технологии в строительном комплексе. - Воронеж: 2021. - №2. -С.130. . [Электронный ресурс] Режим доступа: www.ttmko.ru ISSN 2618-9054.
- 12.Баканов Б.Т. Проблемы организации и механизации строительства в условиях высокогорья Киргизии [Текст]. / Б.Т. Баканов. - Фрунзе.: КиргизНИИТИ, 1990. - 37 с.
- 13.Кравцов Э.А. Интенсификация рабочих процессов землеройных машин [Текст]: Учебное пособие / Э.А.Кравцов. –М.: МАДИ, 1988. - 91с.
- 14.Тургумбаев Ж.Ж., Математические регрессионные модели составляющих процесса резания грунта с различными каменными включениями / Ж.Ж.Тургумбаев, М.С.Тургунбаев // Высокие технологии в строительном комплексе. - Воронеж: 2021. - №2. - С.16. . [Электронный ресурс] Режим доступа: www.ttmko.ru ISSN 2618-9054.
- 15.Зеленин А.Н. Машины для земляных работ [Текст] / А.Н.Зеленин, И.П. Баловнев, И.П. Керов. – М.: Машиностроение, 1975. - 421с.