

DOI:10.26104/NNTIK.2023.63.59.004

Тургунбаев М.С.

ТАШ КАМТЫГАН ЧОПОНУ ТАЛКАЛОДОГУ  
ЛОКАЛДЫК ЭНЕРГИЯ СЫЙЫМДУУЛУКТУН ТҮЗҮМДӨРҮНҮН  
МАТЕМАТИКАЛЫК РЕГРЕССИЯЛЫК МОДЕЛДЕРИ

Тургунбаев М.С.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ РЕГРЕССИОННЫЕ МОДЕЛИ  
СОСТАВЛЯЮЩИХ ЛОКАЛЬНОЙ ЭНЕРГОЕМКОСТИ РАЗРУШЕНИЯ  
СУГЛИНКА, СОДЕРЖАЩЕГО КАМЕНИСТОЕ ВКЛЮЧЕНИЕ

M. Turgunbajev

MATHEMATICAL REGRESSION MODELS OF THE COMPONENTS  
OF THE LOCAL ENERGY INTENSITY OF THE DESTRUCTION  
OF LOAM CONTAINING A ROCKY INCLUSION

УДК: 624.131.533

Талкалоонун түрлөрү боюнча таш камтыган чопону талкалоодогу локалдык энергия сыйымдуулуктун ташты топурактын үстүнө интенсивдүү чыгаруудагы, ташты топурактын үстүнө экстенсивдүү чыгаруудагы, ташты топурактын массивине ныгыруудагы механикалык аралашма зонаны, таштуу зонаны талкалоо энергиясы (жумушу), таштуу зонанын каршылык күчүнүн өзгөрүү мыйзамченемдүүлүгүнүн аналитикалык көз карандылыктары иштелип чыкты. Топурактын түзүлүшүн, гранулометриялык курамын жана физикалык касиеттерин моделдөө анан ыктымалдык мыйзам бөлүштүрүүсүнө жараша жүргүзүлгөн, топурактын бекемдик параметрлери белгилүү методикаларга ылайык аныкталган. Чопонун кесүүгө каршылык күчү үчүн үзүлүү чекити бар кесинди-сызыктык модель, кесүү узундугу, капталдык талкалануу бурчу, талкалануунун локалдык энергия сыйымдуулугу үчүн сызыктуу модель, ал эми таштын геометриялык форма коэффициентти үчүн баалануучу параметрлер бар сызыктуу эмес экспоненциалдык модель сунушталат. Аналитикалык жана эксперименттик методдордун жардамы менен алынган параметрлердин негизинде чопону талкалоодогу локалдык энергия сыйымдуулуктун түзүчүлөрүнүн математикалык регрессиялык моделдери аныкталган жана алар эсептөө методикасын иштеп чыгууга, жер казуучу машинанын жумушчу органы тарабынан таш камтыган чопону талкалоодогу энергия сыйымдуулукту болжолдоого мүмкүндүк берет.

**Негизги сөздөр:** аналитикалык көз карандылар, чопо, таш кошулмасы, талкалануу, энергия, энергия сыйымдуулук, регрессиялык модель, аппроксимациялоо, эсептөө ыкмасы.

Разработаны аналитические зависимости локальной энергоемкости разрушения суглинка с каменистым включением с интенсивным выкатыванием камня на поверхность грунта, с экстенсивным выкатыванием камня на поверхность грунта, с вдавливанием камня в массив грунта, энергии (работы) разрушения зоны механической смеси, каменистой зоны и закономерности изменения силы сопротивления каменистой зоны. Моделирование структуры, гранулометрического состава и физических свойств суглинка произведено согласно их закону распределения вероятностей, а прочностные параметры суглинка определены согласно известным методикам. Для аппроксимации силы сопротивления грунта резанию рекомендуется кусочно-линейная модель с точкой разрыва, для длины резания, бокового угла разрушения, локальной энергоемкости разрушения – линейная модель, а для коэффициента геометрической формы каменистого включения – нелинейная экспоненциальная модель по оцениваемым параметрам. Установлены математические регрессионные модели составляющих локальной энергоемкости

разрушения суглинка на основе параметров, полученных с помощью аналитического и экспериментального методов, которые позволяют разработать методику расчета и прогнозировать энергетические затраты на разрушение суглинка, содержащего каменистое включение рабочим органом землеройной машины.

**Ключевые слова:** аналитические зависимости, суглинок, каменистое включение, разрушение, энергия, энергоемкость, регрессионная модель, аппроксимация, методика расчета.

Analytical dependences of the local energy intensity of the destruction of loam with stony inclusion with intensive rolling of the stone to the surface of the soil, with extensive rolling of the stone to the surface of the soil, with the pressing of the stone into the soil mass, the energy (work) of destruction of the zone of mechanical mixture, the stony zone and the patterns of change in the resistance force of the stony zone have been developed. The modeling of the structure, granulometric composition and physical properties of the loam was carried out according to their probability distribution law, and the strength parameters of the loam were determined according to known methods. To approximate the strength of the soil resistance to cutting, a piecewise linear model with a break point is recommended, a linear model for the cutting length, lateral angle of fracture, local energy intensity of fracture, and a nonlinear exponential model for the geometric shape coefficient of a rocky inclusion according to the estimated parameters. Mathematical regression models of the components of the local energy intensity of loam destruction are established on the basis of parameters obtained using analytical and experimental methods, which allow us to develop a methodology for calculating and predicting energy costs for the destruction of loam containing a rocky inclusion by the working body of an earthmoving machine.

**Key words:** analytical dependencies, loam, rocky inclusions, destruction, energy, energy intensity, regression model, approximation, calculation method.

По данным наших исследований частота появления грунтов, содержащих каменистые включения по территории КР, составляют более 20%. Разработка таких грунтов землеройными машинами сопровождается локальным повышением силовых и энергетических затрат на разрушение грунтов с каменистыми включениями [1].

На стенде [2] проведены экспериментальные исследования по резанию дисперсного суглинка, содержащего отдельное каменистое включение. В результате реализации плана эксперимента сформирована эмпирическая совокупность, которая в дальнейшем подвергается статистическому анализу [3].

В зависимости от координаты действия режущей кромки на поверхность каменистого включения выделяются виды разрушения грунта: с интенсивным выкатыванием камня (и) ( $k_{he} = 0,25$ ), с экстенсивным выкатыванием камня (э) ( $k_{he} = 1,0$ ) и с вдавливанием камня в массив грунта (в) ( $k_{he} = 1,75$ ) [4].

Локальная энергоёмкость интенсивного и экстенсивного видов разрушений дисперсного грунта с каменистым включением определяется формулой:

$$E_{dm} = \frac{\mathcal{E}_{dm}}{V_{dm}} \quad (1)$$

где  $\mathcal{E}_{dm}$  – энергия (работа) разрушения,  $V_{dm}$  – объем прорези разрушения.

А для вида разрушения с внедрением камня в массив грунта локальная энергоёмкость определяется зависимостью:

$$E_{dmv} = \frac{\mathcal{E}_{rh}}{V_b} + \frac{\mathcal{E}_{вд}}{V_{ам}} \quad (2)$$

где  $\mathcal{E}_{rh}$  – энергия разрушения зоны механической смеси,  $\mathcal{E}_{вд}$  – энергия вдавливания камня в массив грунта,  $V_b$  – объем прорези разрушения основной области,  $V_{ам}$  – объем деформированного грунта при внедрении камня.

Основной особенностью разрушения дисперсного грунта, содержащего каменистое включение является, то, что разрушение грунта происходит на определенном пути режущего инструмента землеройной машины [1]. Очевидно, за этот промежуток пути режущего органа выполняется локальная энергия разрушения, которая определяется выражением:

$$\mathcal{E}_{dm} = \mathcal{E}_{rh} + \mathcal{E}_{re} + \mathcal{E}_{rg} \quad (3)$$

где  $\mathcal{E}_{re}$  – энергия разрушения каменистой зоны,  $\mathcal{E}_{rg}$  – энергия вывода камня из зоны разрушения.

Рассмотрим схему резания дисперсного грунта с эллипсоидным каменистым включением и соответствующая ей прорези разрушения режущим инструментом землеройной машины [1]. Из анализа этой схемы видно, что силу сопротивления зоны механической смеси (однородная часть) –  $P_{rhs}$  можно принять постоянной, а сила сопротивления каменистой зоны –  $P_{re}$  изменяется по сложной закономерности, значения  $P_{rhs}$  и  $P_{re}$  аналитически определены в [5],[6].

Общий вид кривой каменистой зоны устанавливается в результате разбиения на элементарные участки с длиной  $dL_{dm}$  и высотой  $dp_{re}$  цифровой видеосъемки процесса разрушения суглинка с эллипсоидным камнем. Аппроксимация кривой происходит на основе определения коэффициентов элементарных сил сопротивления каменистой зоны:

$$dp_{re_i} = k_{P_{re_i}} P_{re} \quad (4)$$

где  $k_{P_{re_j}}$  –  $i$ -тый коэффициент силы сопротивления каменистой зоны грунта.

В таком случае локальную энергию разрушения дисперсного грунта с каменистым включением можно определить зависимостью:

$$\mathcal{E}_{dm} = (P_{rhs} + P_{rg})L_{dm} + \sum_{i=1}^{i=n} dp_{re_i} dL_{dm_i} \quad (5)$$

где  $P_{rg}$  – сила сопротивления выведению камня из зоны действия режущего инструмента.

Коэффициент силы сопротивления каменистой зоны грунта определяется экспериментальным путем. Объем прорези разрушения грунта с каменистым включением определен в работе [1].

Полно факторный эксперимент реализуется с участием 3-х факторов: объемного веса грунта ( $x_1$ ), среднего размера камня ( $x_2$ ), ширины резания ( $x_3$ ), которые изменяются на 2-х уровнях (-1; +1). При этом постоянными факторами являются  $\alpha = 30^\circ$ ,  $h = 0,15$  м,  $v_p = 0,1 \dots 0,5$  м/с. Структура, гранулометрический состав, плотность суглинка моделируются согласно [7], а его прочностные параметры рассчитываются в соответствии [8]. Значения силы сопротивления зоны механической смеси, каменистой зоны и объема прорези разрушения грунта определяются аналитически, а закономерности изменения каменистой зоны опытным путем.

Таким образом на основе теоретико-экспериментальных исследований устанавливаются математические регрессионные модели процесса разрушения грунтов, содержащих каменистые включения режущим органом землеройной машины.

Для силы сопротивления грунта с каменистым включением резанию ( $P_{dm}$ ) с учетом пассивной области каменистого включения рекомендуется кусочно-линейная регрессионная модель с точкой разрыва:

$$y = \begin{cases} b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3, \text{ при } y < y_{br} \\ b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3, \text{ при } y \geq y_{br} \end{cases} \quad (6)$$

где  $b_0$  – свободный параметр регрессионной модели,  $b_1, b_2, b_3$  – параметры регрессионной модели,  $b_{br}$  – точка разрыва модели.

Для длины резания ( $L_{dm}$ ), угла бокового разрушения ( $\psi_s$ ), и локальной энергоёмкости разрушения грунта с каменистым включением ( $E_{dm}$ ) рекомендуется линейная регрессионная модель:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_1x_2 + b_5x_1x_3 + b_6x_2x_3 + b_7x_1x_2x_3 \quad (7)$$

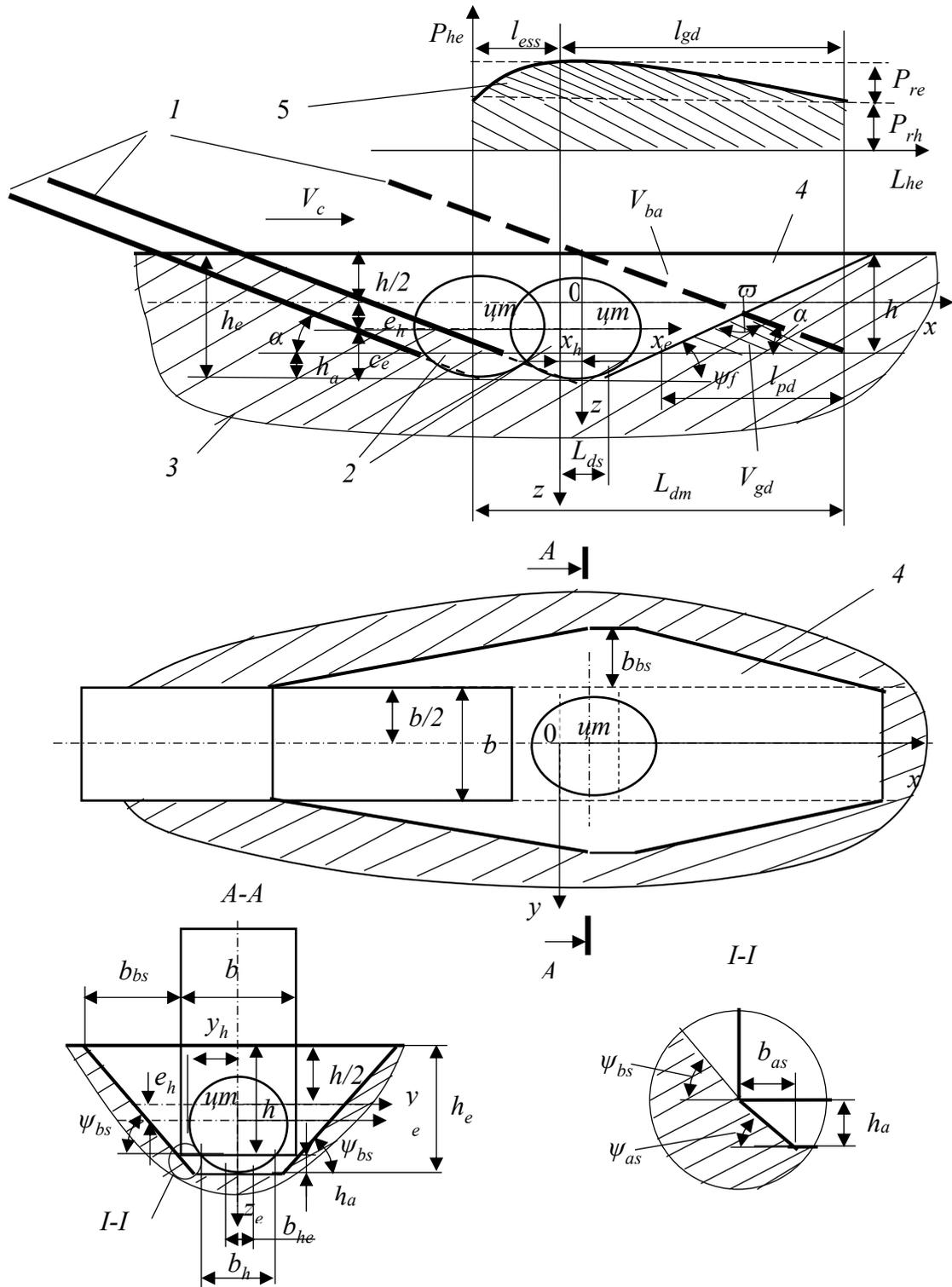
где  $b_0$  – свободный параметр регрессионной модели,  $b_1, b_2, b_3$  – параметры регрессионной модели

А для коэффициента геометрической формы каменистого включения, предназначенного для локальной энергоёмкости ( $k_{f04}$ ,  $k_{f08}$ ) рекомендуется нелинейная экспоненциальная регрессионная модель по оцениваемым параметрам [9],[10]:

$$y = a_0 + e^{b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3} \quad (8)$$

где  $a_0, b_0$  – свободные параметры регрессионной модели,  $b_1, b_2$  – параметры регрессионной модели.

В таблице 1 приведены параметры математических регрессионных моделей энергоёмкости разрушения суглинка с  $d_2 = 30\%$ ,  $L_L = 0,1$  и  $k_{he} = 0,25$ ,  $k_{he} = 1,0$ ,  $k_{he} = 1,75$ , установленных по результатам статистического анализа в [11].



**Рис. 1.** Схема резания грунта, содержащего крупнообломочное включение: 1 – режущий орган, 2 – крупнообломочное включение, 3 – грунт, 4 – прорезь разрушения, 5 – график силы сопротивления грунта резанию,  $\psi m$  – центр тяжести обломка,  $h$  – глубина резания,  $b$  – ширина резания,  $L_{dm}$  – длина резания,  $L_{ds}$  – длина прорези разрушения,  $\alpha$  – угол резания,  $\psi_f$  – угол сдвига в фронтальной части,  $\psi_{bs}$ ,  $\psi_{as}$  – углы сдвига в боковой части,  $e_h$  – эксцентриситет по глубине резания,  $h_e$  – глубина залегания обломочного включения,  $h_a$  – высота дополнительной области,  $b_{he}$  – ширина резания дополнительной области.

Параметры математической регрессионной модели локальной энергоёмкости разрушения суглинка с каменистым включением

Название					$I_p$		$d_2, \%$	$I_L$	$\gamma, \text{кН/м}^3$	
Суглинок					0,1536		30	0,1	20,21...20,6	
$y$	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$	$b_6$	$b_7$	$R$	$k_{не}$
$L_{dm}$	-0,2793	0,0146	8,7929	3,0795	-0,4005	-0,1502	-99,7321	5,0058	1,0	0,25
$\psi_s$	216,393	-8,191	-496,429	-162,946	18,203	6,826	4598,214	-227,537	1,0	0,25
$E_{dmu}$	8,3	-0,4	-2656,2	35,6	146,8	-1,9	-20144,5	1019,2	1,0	0,25
$L_{dm}$	-0,58	0,029	15,571	6,237	-0,728	-0,305	-182,679	9,101	1,0	1,0
$\psi_s$	304,96	-12,56	-3482,14	-1008,48	163,83	47,78	-32366,07	-1592,76	1,0	1,0
$E_{dmс}$	48,4	-2,5	-4845,8	-20,0	259,5	0,7	-18904,1	971,7	1,0	1,0
$L_{dm}$	0,1247	-0,0051	-4,7071	0,5482	0,2548	-0,0273	-15,3571	0,9101	1,0	1,75
$\psi_s$	108,29	-2,91	1357,14	900,0	-72,81	-45,51	-9375,0	455,07	1,0	1,75
$E_{dme}$	59	-3	-12622	676	693	-31	-107889	5452	1,0	1,75

Таким образом посредством математических моделей, составленных на основе величин, полученных аналитическим и экспериментальным методами, можно разработать методику расчета и прогнозировать локальную энергоёмкость разрушения дисперсных грунтов, содержащих каменистые включения режущим инструментом землеройной машины.

**Литература:**

1. Тургунбаев М.С. Длина резания дисперсного грунта с каменистым включением режущим инструментом землеройной машины. [Текст] / М.С. Тургунбаев. – Б.: «Изд. научных журналов и детской худож. литературы». Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана, №4 2023. – С. 27-32.
2. Стенд для исследования процесса резания грунтов. Патент на полезную модель Кыргызской Республики №113 [Текст] / М.С. Тургунбаев, К.Т. Шамуратов. - Б., 2010.
3. Тургунбаев М.С. Статистический анализ результатов резания дисперсного грунта с каменистым включением режущим инструментом землеройной машины. [Текст] / М.С. Тургунбаев. -Бишкек: «Издательство научных журналов и детской художественной литературы». Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана, №5 2023. – С. 27-32.
4. Тургунбаев М.С. Особенности разрушения пород, содержащих каменистые включения. [Текст] / М.С. Тургунбаев. / Горное оборудование и электромеханика. - Издательство «Новые технологии». - 2014. №11(108). - С. 34-40.
5. Turgumbayev J.J., Turgunbayev M. S. 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).
6. 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).
7. Моделирование структуры дисперсного грунта с каменистым включением [Текст] / М.С. Тургунбаев. - Бишкек, «Издательство научных журналов и детской художественной литературы». Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана, №4 2023. DOI: 10.26104/NNTIK.2023.
8. ДальНИИС Госстроя СССР. Методика оценки прочности и сжимаемости крупнообломочных грунтов с пылеватым и глинистым заполнителем и пылеватых и глинистых грунтов с крупнообломочными включениями. – М., 1989. - 24 с.
9. Левенберг К. Метод решения некоторых задач методом наименьших квадратов. Приложение. Математика. Т.2. - С. 164-168. - 1944.
10. Марквардт Д. Алгоритм оценки нелинейных параметров методом наименьших квадратов. СИАМ Дж. Приложение. / Математика. - Том 11. - 1963. - С. 431-441.
11. Программный комплекс Staistica. StatSoft@ Inc. USA. Версия 10.