

Определение сопротивления резанию мерзлых горных пород с галечными включениями

Шемякин С. А.¹, Шишкин Е. А.^{1*}

¹ Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск, Россия

*e-mail: 004655@pnu.edu.ru

Реферат

Введение. Существующие исследования резания горных пород рыхлительной техникой не устанавливают аналитическую взаимосвязь характеристик мерзлых пород с галечными включениями с их сопротивляемостью резанию. Результаты существующих исследований позволяют лишь приблизительно установить параметры рыхлителей на базе тракторов и экскаваторов.

Цель работы. Исследование направлено на разработку методики определения составляющих (нормальной и касательной) сопротивления резанию мерзлых пород с галечными включениями.

Методология. Для достижения указанной цели разработана модель взаимодействия зуба выемочной машины с мерзлой породой, содержащей галечные включения. Рассмотрен процесс формирования ядра уплотнения при перемещении зуба выемочной машины в массиве породы. Установлены силы и напряжения, действующие на отделяемый элемент породы с галечными включениями в предельном состоянии.

Результаты. Установлена взаимосвязь характеристик породы и максимальных значений касательной и нормальной составляющих сопротивления резанию мерзлых пород при наличии в них галечных включений. Оценка адекватности модели резания мерзлых пород с галечными включениями выполнена на стенде для послойного резания породы в натуральных и в лабораторных условиях. Оценка адекватности показала достаточную для практического применения сходимость результатов аналитического расчета с натурными измерениями.

Выводы. Разработанная методика расчета сопротивления резанию позволяет определять мощность, требуемую выемочной машине для резания заданной породы рабочим органом.

Ключевые слова: горные породы; рыхлительные установки; процесс резания; галечные включения; сопротивление резанию; стенд; послойное резание породы.

Введение. На Северо-Востоке России размер галечных включений чаще составляет 30–80 мм, но нередко присутствует галька (120–140 мм), иногда встречаются валуны (500–1000 мм) [1]. Такие породы с галечными включениями можно рассматривать как тела, состоящие из двух фаз: первая – это галька, а вторая – вмещающая порода [2].

Существующие исследования резания горных пород рыхлительной техникой не устанавливают аналитическую взаимосвязь характеристик мерзлых пород с галечными включениями с их сопротивляемостью резанию. Результаты существующих исследований позволяют лишь приблизительно установить параметры рыхлителей на базе тракторов и экскаваторов.

Целью работы является создание методики аналитического определения составляющих (касательной и нормальной) сопротивления резанию мерзлых пород с галечными включениями.

Методика расчета составляющих сопротивления резанию. При резании зубом рабочего оборудования бульдозера или экскаватора происходит деформиро

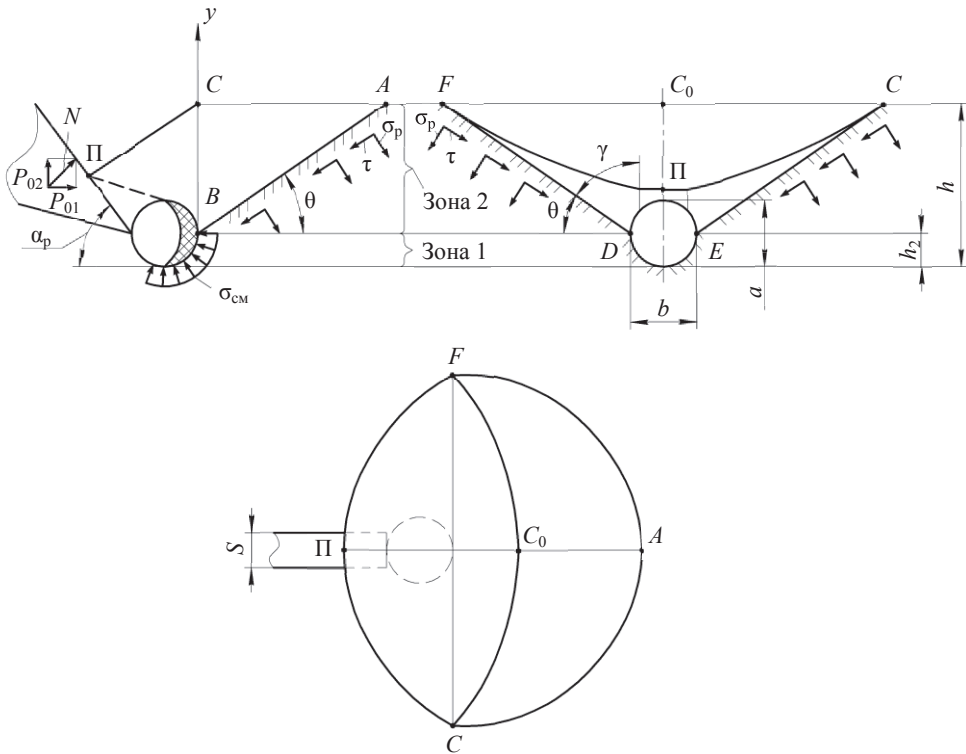


Рисунок 1. Схема к определению касательного компонента сопротивления резанию: N – суммарное сопротивление резанию; α_p – угол резания; Π , A , B , C , C_0 , D , E , F – граничные точки отделения элемента стружки; $\sigma_{см}$ – предельное напряжение смятия породы перед крупнообломочным включением; σ_p – предельное напряжение разрыва породы по поверхности отделения элемента стружки; θ – угол наклона плоскости развала в прорези; τ – предельное напряжение сдвига породы по поверхности отделения элемента стружки; γ – угол развала породы в прорези; a , b – габаритные размеры крупнообломочного включения; h – максимальная глубина разрушения породы; h_2 – высота прорези в зоне 1 формирования уплотненного ядра; S – ширина лезвия зуба

Figure 1. Schematic diagram for determination of the tangential component of resistance to cutting: N – the total resistance to cutting; α_p – cutting angle; Π , A , B , C , C_0 , D , E , F – boundary points of chip element separation; $\sigma_{см}$ – the ultimate stress of rock contortion in front of the coarse inclusion; σ_p – the ultimate tensile stress of rock along the chip element separation surface; θ – the angle of inclination of the disintegration plane in the cut slot; τ – the ultimate shear stress of the rock along chip element separation surface; γ – angle of rock disintegration in the cut slot; a , b – overall dimensions of the coarse inclusion; h – maximum depth of rock destruction; h_2 – the height of the cut slot in zone 1 of the formation of a bulb of pressure; S – the width of the tooth blade

вание породы и смещение льда из зоны взаимодействия рабочего органа с породой [3]. Если в зону взаимодействия зуба с породой попадает мелкая галька, то происходит отделение элемента стружки вместе с галькой [4]. Однако, если в зону резания попадает крупная галька, вмержшая в окружающий массив породы, то элемент стружки отделяется по поверхности гальки [5]. Поверхность отделения стружки от массива оказывается сухой и чистой. Таким образом, наименее прочной областью при разрыве можно считать поверхность пленки льда, которая находится в контакте с галькой [6]. В результате экспериментов [7], осуществленных авторами статьи на стенде для послойного резания породы, установлено, что находящаяся в зоне 2 (т. е. внутри сечения отделяемой стружки) галька не влияет на величину сопротивления (рис. 1). Если же галечное включение оказывается в зоне 1, то сопротивление

резанию увеличивается, причем размер гальки влияет на величину прироста сопротивления [8]. При расчетах параметров рыхлительной техники общее сопротивление резанию раскладывают на две составляющие: касательную и нормальную. По касательной составляющей оценивают необходимую силу тяги базовой машины, а по нормальной рассчитывают механизмы (гидроцилиндры) заглубления рабочего органа [9]. Наибольшая касательная составляющая возникает при условии равенства статических моментов площадей контуров гальки, расположенных по обе стороны от режущей кромки зуба [10, 11]. Перемещение галечного включения вниз внутри зоны 1 вызывает значительный рост величины нормальной составляющей сопротивления. Это вызвано смещением галечного включения в более плотную породу. Если галька располагается спереди от режущей кромки зуба, то по направлению перемещения гальки формируется ядро уплотнения, площадь которого зависит от площади галечного включения. Это обстоятельство приводит к дополнительному росту сопротивления резанию [12].

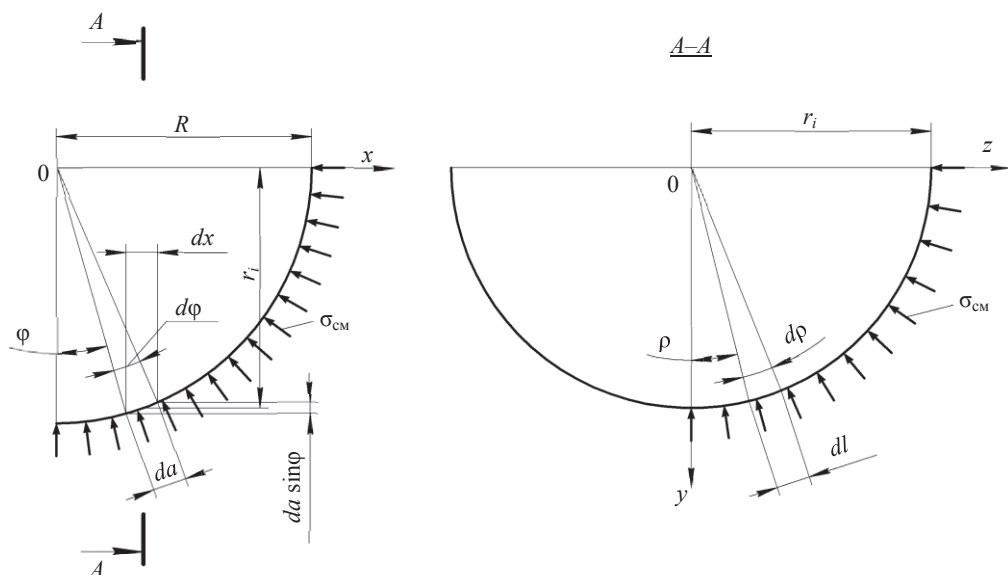


Рисунок 2. Схема к определению касательной составляющей сопротивления резанию в зоне 2
 Figure 2. Schematic diagram for determining the tangential component of resistance to cutting in zone 2

Следовательно, для расчета наибольшей величины касательной составляющей сопротивления резанию P_{01}^{max} целесообразно исследовать случай, когда нейтральная ось гальки совпадает с уровнем режущей кромки рабочего органа. Для расчета наибольшей величины нормальной составляющей сопротивления резанию P_{02}^{max} целесообразно исследовать случай, когда нейтральная ось гальки находится ниже уровня режущей кромки рабочего органа.

Описанные расчетные случаи позволяют получать значения P_{01}^{max} и P_{02}^{max} если крепость галечных включений выше крепости вмещающих пород, а величина глубины резания не более чем в 6 раз выше ширины зуба. Если крепость галечных включений ниже крепости вмещающих пород, то наблюдается щелевое резание, при котором данная методика определения P_{01}^{max} и P_{02}^{max} неприменима [13]. В случае если глубина резания превышает ширину режущей кромки зуба более чем в 6 раз, наблюдается значительный рост энергоемкости процесса резания породы [14, 15]. Следовательно, нерационально создавать рабочие органы с указанным соотношением размеров.

При расчете наибольшей величины касательной составляющей сопротивления резанию P_{01}^{\max} необходимо исследовать две зоны (рис. 1). В первой зоне происходит смятие породы перед ядром уплотнения. Если форма галечного включения близка к шарообразной и $a \approx b$, то можно принять сферическую форму ядра уплотнения, формируемого перед этим включением. При этом начало линии AB отрыва фрагмента стружки находится в точке B , совпадающей с фронтом ядра уплотнения. Развал элемента стружки в боковых прорезях происходит из точек D и E , которые в поперечном сечении наиболее удалены от оси режущего рабочего органа. Первая зона характеризуется высотой h_2 , равной $a/2$ [16]. Сминающее напряжение $\sigma_{\text{см}}$ приложено ортогонально сферическому сегменту поверхности ядра уплотнения радиусом R (рис. 2) [17].

Выделим на указанном сферическом сегменте элементарную площадку $da \cdot dl$, где l – ширина полукольца. К данной площадке приложено нормальное усилие величиной $\sigma_{\text{см}} \cdot da \cdot dl$. При этом $da = R \cdot d\varphi$, $dl = r_i \cdot d\rho$, φ – угол установки сектора в касательной плоскости; r_i – радиус полукольца; ρ – угол установки сектора в нормальной плоскости.

Из геометрических соображений (рис. 2) имеем: $r_i = R \cos \varphi$. Тогда горизонтальная проекция нормального усилия, действующая на элементарную площадку $da \cdot \sin \varphi \cdot dl$:

$$dN_x = \sigma_{\text{см}} \cdot R^2 \cdot \sin^2 \varphi \cdot \cos \varphi \cdot d\varphi \cdot d\rho,$$

где N_x – горизонтальная проекция суммарного нормального усилия.

Горизонтальная проекция нормального усилия, действующая на всей площади сферического сегмента:

$$N_x = \sigma_{\text{см}} \cdot R^2 \cdot \int_0^{\pi/2} d\rho \int_0^{\pi/2} \sin^2 \varphi \cdot \cos \varphi \cdot d\varphi. \quad (1)$$

Интегрирование (1) по $d\rho$ дает

$$N_x = \sigma_{\text{см}} \cdot R^2 \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \int_0^{\pi/2} \sin^2 \varphi \cdot \cos \varphi \cdot d\varphi. \quad (2)$$

Интегрирование (2) по $d\varphi$ дает

$$N_x = \frac{\sigma_{\text{см}} \cdot R^2 \cdot \pi}{2} \cdot \frac{\sin^3 \varphi}{3} \Big|_0^{\pi/2} = \frac{\sigma_{\text{см}} \cdot \pi \cdot R^2}{6}.$$

Нормальное давление на четверть сферической поверхности ядра уплотнения:

$$N'_x = 2N_x = \frac{\sigma_{\text{см}} \cdot \pi \cdot R^2}{3}.$$

Аналогично получим нормальное давление на половину сферической поверхности ядра уплотнения в заданном направлении:

$$N''_x = \frac{2\sigma_{\text{см}} \cdot \pi \cdot R^2}{3}.$$

В случае вытянутой формы галечного включения (если $a \gg b$ или $b \gg a$) нормальное давление состоит из давлений на поверхности, близкой по форме к цилиндру и сфере. Для галечных включений кубической формы определяют нормальное давление, действующее на сферическую поверхность, которая оказывается вписанной в указанный куб [18]. Следовательно, касательная составляющая

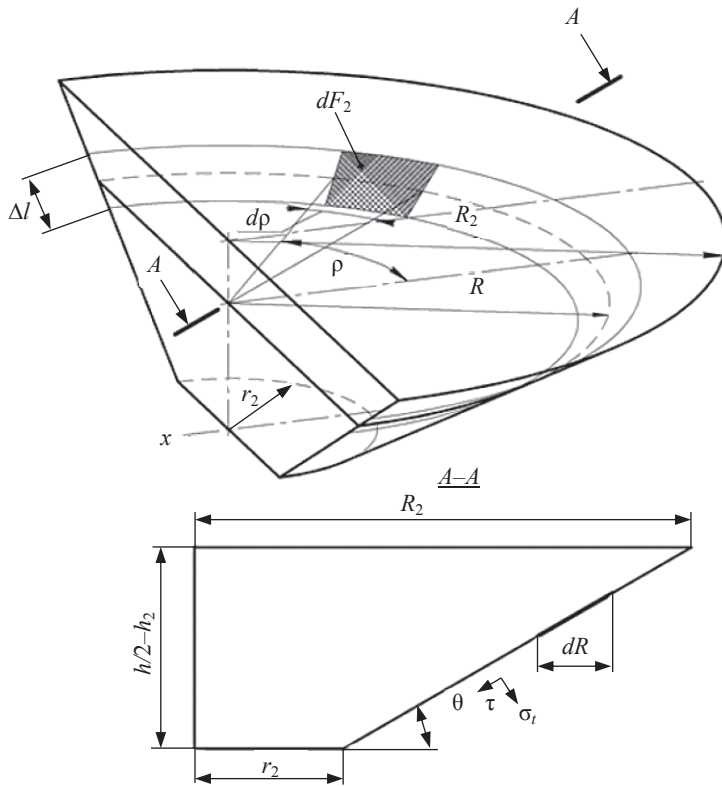


Рисунок 3. Силовая схема элемента породы, отделяемого в зоне 2: Δl – ширина элементарного полукольца; dF_2 – элементарная площадка полукольца; R_2 – максимальный радиус зоны 2; r_2 – минимальный радиус зоны 2; σ_t – предельное напряжение разрыва породы по поверхности отделения элемента стружки в зоне

Figure 3. Force diagram of the rock element separated in zone 2: Δl – the width of an elementary semi-ring; dF_2 – the elementary area of the semi-ring; R_2 – the maximum radius of zone 2; r_2 – the minimum radius of zone 2; σ_t – the ultimate tensile stress of rock along the chip element separation surface in the zone

сопротивления резанию может быть определена как сумма сопротивлений в зонах 1 и 2. Сопротивление резанию в зоне 2, определенное в работе [7], (рис. 3):

$$P_{x2} = (\tau - \sigma_p \cdot \text{tg}\theta) \left[\frac{h - h_2}{\text{tg}^2\theta} (S \cdot \text{tg}\theta + h - h_2) \right].$$

Суммарное касательное сопротивление резанию породы блокированным способом с наличием галечного включения:

$$P_{01}^{\text{max}} = \frac{\sigma_{\text{см}} \cdot \pi \cdot (b/2)^2}{3} + (\tau - \sigma_p \cdot \text{tg}\theta) \left[\frac{h - (a/2)}{\text{tg}^2\theta} (b \cdot \text{tg}\theta + h - (a/2)) \right]. \quad (3)$$

Экспериментально установлено, что максимальное значение нормальной составляющей сопротивления резанию P_{02}^{max} возникает, когда галечное включение преимущественно находится ниже режущей кромки рабочего органа (рис. 4). Таким образом, продвижение гальки внутри породы осуществляется в большей степени по плоскости затупления рабочего органа. Сминающее давление распределено по поверхности ядра уплотнения (зона 1), и на 3/4 сферической поверхности ядра, находящейся перед галечным включением, если соблюдается равенство $b \approx a$.

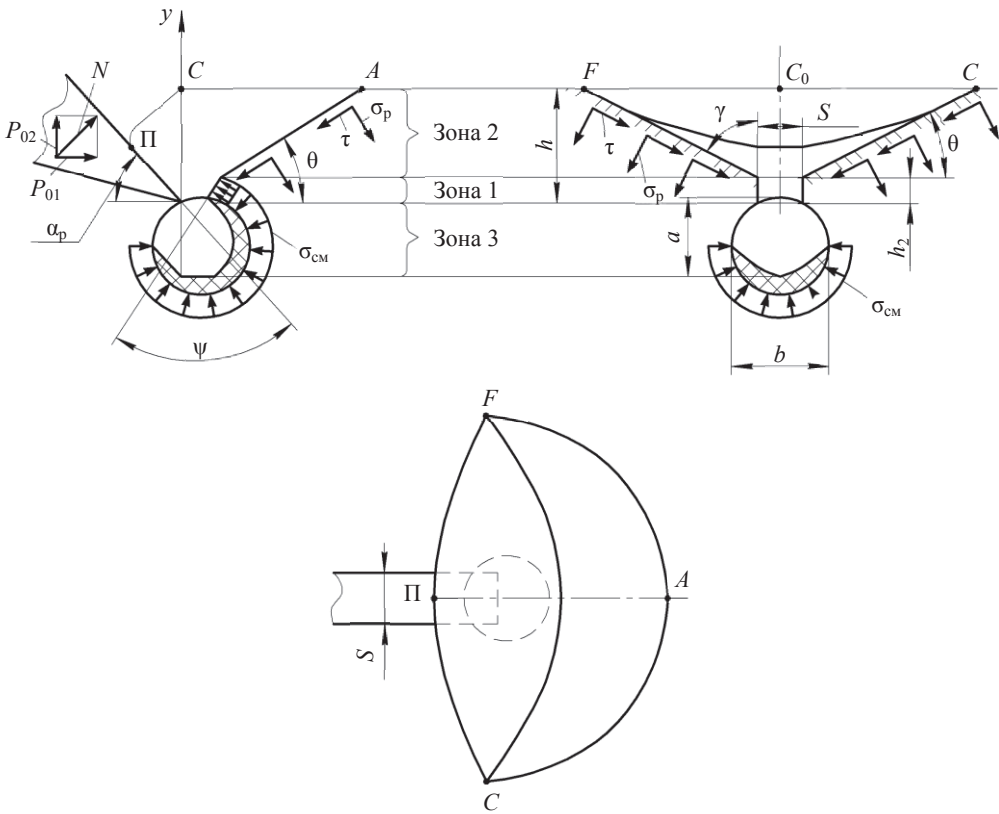


Рисунок 4. Схема к определению нормальной составляющей сопротивления резанию: ψ – максимальный угол между лобовой поверхностью уплотненного ядра в зоне 1 и лобовой поверхностью зуба

Figure 4. Scheme for determination of the normal component of resistance to cutting: ψ – the maximum angle between the frontal surface of the bulb of pressure in zone 1 and the frontal tooth surface

Некоторая доля сминающего давления действует внутрь объема породы и обеспечивает продвижение галечного включения вниз, а другая доля давления действует наружу объема и вынуждает рабочий орган смещаться вверх. По этим причинам суммарное давление, действующее на 1/4 сферической поверхности:

$$N'_x = \frac{\sigma_{cm} \cdot \pi \cdot R^2}{3} = \frac{\sigma_{cm} \cdot \pi \cdot (b/2)^2}{3}.$$

С учетом дополнительного сопротивления резанию в зоне 2 [10], а также с исключением сопротивления, возникающего при затуплении рабочего органа, максимальное значение нормальной составляющей сопротивления резанию:

$$P_{02}^{max} = \sigma_{cm} \left[\frac{\pi \cdot (b/2)^2}{3} + S \cdot h_2 \cdot \text{ctg}(\alpha_p + \psi) + \frac{\pi S^2 \xi_1}{8} - \frac{\pi S \cdot h_2 \text{tg}\varphi_2}{2} - \frac{\xi_1 h_2^2 \sin(2\alpha_p + \psi) \text{tg}\varphi_2}{\text{tg}\alpha_p \cdot \sin(\alpha_p + \psi)} \right] - (\tau \cdot \text{tg}\theta + \sigma_p) \left[\frac{h - h_2}{\text{tg}^2\theta} (S \cdot \text{tg}\theta + h - h_2) \right], \tag{4}$$

где ξ_1 – коэффициент бокового распора породы.

При заданных параметрах рабочего органа с помощью уравнений (3), (4) можно определить наибольший размер галечных включений, позволяющих осуществлять блокированное резание массива породы.

Результаты. Основой разработанной теории являются полученные зависимости (3), (4). Проверка теоретических положений (3), (4) была осуществлена в ходе экспериментов по резанию зубом горных пород с предварительной закладкой внутрь породы галечных включений размером 60–80 мм. Исследования проводились на стенде для послойного резания породы (рис. 5, 6) в натуральных и лабораторных условиях.

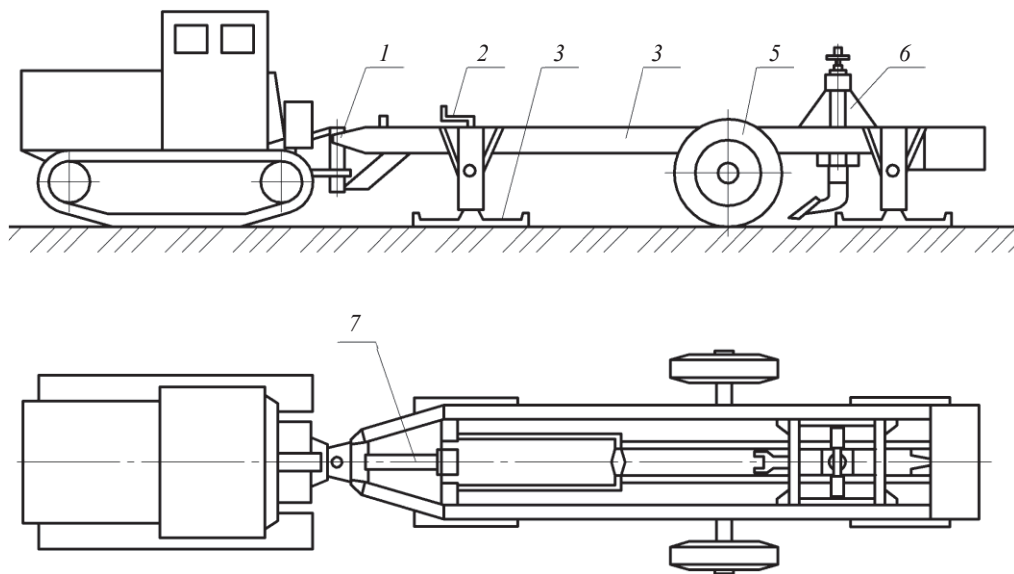


Рисунок 5. Схема стенда для послойного резания породы
Figure 5. Schematic diagram of the bench for layer-by-layer rock cutting

В натуральных (полевых) условиях экспериментальные исследования проводились на специальном полигоне на наносных мерзлых породах (тяжелых суглинках) в зимнее время при отрицательных температурах воздуха ($-15 \dots -20 \text{ }^\circ\text{C}$). Закладка гальки в породу проводилась в осенний период при положительных температурах воздуха и породы. Для этой цели в породе на заданную глубину отрывались отверстия по ширине гальки. После закладки гальки отверстия засыпались породой, уплотнялись и увлажнялись до состояния естественного залегания в массиве.

Для экспериментальных исследований в лабораторных условиях были изготовлены металлические блоки длиной 1200 мм, шириной 1100 мм и высотой 450 мм, в которые помещалась песчаная порода. Торцевые стенки, перпендикулярные линиям резания, перед резанием выдергивались. Закладка гальки производилась так же, как на суглинках. Замораживание блоков обеспечивалось в камере холода, а в зимний период на открытом воздухе. Замороженные блоки с помощью тележек и грузоподъемной техники помещались под зуб стенда, фиксировались с помощью упоров, после чего проводилось резание.

В качестве тягового агрегата стенда использовался трактор ДТ-75. Характеристики стенда: предельная скорость резания породы 0,8 м/с, максимальное усилие резания 180 кН, наибольшая глубина резания 0,4 м. Стенд включает измерительную тележку 6, установленную на раму 4 (рис. 5).

В процессе измерений горизонтальность рамы обеспечивается с помощью лыж 3, а тяговое усилие от трактора передается на раму через шаровый шарнир 1. Транспортировка рамы к месту измерений осуществляется посредством пневматических колес 5. Расстояние от рамы до слоя породы изменяется посредством винтовых домкратов 2, вмонтированных в лыжи 3. Передвижение измерительной тележки 6 вдоль направляющих рамы 4 производится с помощью гидроцилиндра 7, подключенного к гидросистеме трактора. Стойка 3 (рис. 6), установленная в раме 1 измерительной тележки, перемещается с помощью винта 2. В отверстиях фланца 4 стойки 3 установлены измерительная ось 9 и задняя ось 10. Рабочий

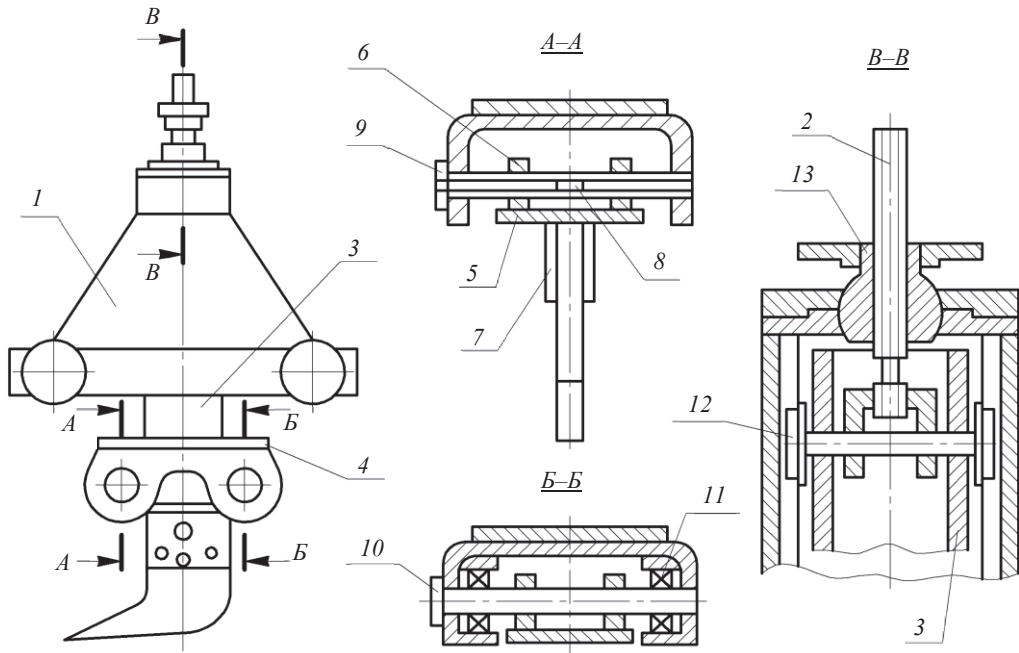


Рисунок 6. Схема измерительной тележки стенда
Figure 6. Schematic diagram of the measuring cart of the bench

орган подвешен на осях 9, 10 посредством фланцев 5 с проушинами 6 и направляющими 7. Касательная составляющая сопротивления резанию фиксируется при помощи датчиков 8, установленных на оси 9 в вертикальной плоскости. Нормальная составляющая сопротивления резанию фиксируется датчиками, установленными на оси 9 в горизонтальной плоскости.

В результате сравнения экспериментальных данных с расчетами согласно (3), (4) можно сделать вывод об удовлетворительной сходимости аналитических расчетов с физической картиной резания мерзлых горных пород с галечными включениями (расхождение не превышает 11 %).

Выводы. В результате теоретического анализа процесса резания мерзлых горных пород с галечными включениями зубом выемочной машины разработана методика расчета составляющих сопротивления резанию. Разработанная методика может применяться для расчета требуемой мощности выемочной машины при заданных типе породы и конструктивных характеристиках рабочего органа. Таким образом, появляется возможность технико-экономической оценки процесса резания мерзлой горной породы с галечными включениями.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кравченко С. М., Слепченко В. А. Влияние гравийно-галечниковых включений на процесс резания мерзлых грунтов с учетом износа резцов траншекопателей // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2019. № 4. С. 443–449. DOI: 10.22281/2413-9920-2019-05-04-443-449
2. Техничко-технологические решения разработки мерзлых пород в горном деле и строительстве: монография / С. А. Шемякин [и др.]. Хабаровск: ДВГУПС, 2017. 188 с.
3. Hu M., Gao T., Dong X. Simulation of soil-tool interaction using smoothed particle hydrodynamics (SPH) // Soil and Tillage Research. 2023. Vol. 229. DOI: 10.1016/j.still.2023.105671
4. Liu Y., Dai F. A review of experimental and theoretical research on the deformation and failure behavior of rocks subjected to cyclic loading // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2021. Vol. 13. P. 1203–1230. DOI: 10.1016/j.jrmge.2021.03.012
5. Wang X., Zhang S., Pan H., Zheng Z. Effect of soil particle size on soil-subsoiler interactions using the discrete element method simulations // Biosystems Engineering. 2019. Vol. 182. P. 138–150. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2019.04.005
6. Kuznetsova V., Savinkin V., Ratushnaya T., Sandu A. Study of the spatial distribution of forces and stresses on wear surfaces at optimization of the excavating part of an earthmoving machine transverse profile // Coatings. 2021. Vol. 11. No. 2. P. 1–16. DOI: 10.3390/coatings11020182
7. Шемякин С. А., Чебан А. Ю. Определение сопротивления резанию мерзлых пород глубокоблокированным (щелевым) способом // Горное оборудование и электромеханика. 2015. № 6. С. 39–44.
8. Makange N. R., Ji C., Nyalala I., Sunusi I. I. Prediction of precise subsoiling based on analytical method, discrete element simulation and experimental data from soil bin // Scientific Reports. 2021. Vol. 11. DOI: 10.1038/s41598-021-90682-w
9. Третьяк А. Я., Попов В. В., Гроссу А. Н., Борисов К. А. Инновационные подходы к конструированию высокоэффективного породоразрушающего инструмента // ГИАБ. 2017. № 8. С. 217–222. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-8-0-225-230
10. Шемякин С. А., Шишкин Е. А. Физико-математическая модель разрушения горных пород зубом фрезерной установки // Записки Горного института. 2021. Т. 251. С. 639–647. DOI: 10.31897/PMI.2021.5.3
11. Hegde A., Murthy T. Experimental studies on deformation of granular materials during orthogonal cutting // Granular Matter. 2022. Vol. 24. DOI: 10.1007/s10035-022-01227-5.
12. Hegde A., Murthy T. An experimental study on shear bands in sand using the orthogonal cutting setup // EPJ Web of Conferences. 2021. Vol. 249. Art. 10007. DOI: 10.1051/epjconf/202124910007
13. Wang X., Fang W., Han D., Chen X. Review of the research on soil disturbance by tools // Applied Sciences. 2022. Vol. 13. No. 1. DOI: 10.3390/app13010338
14. Бояркина И. В. Удельная энергоёмкость процессов копания грунтов и материалов ковшом технологической машины // Омский научный вестник. 2017. № 2 (152). С. 5–7.
15. Николаев В. А. Расчет затрат энергии на резание грунта горизонтальным лезвием путем анализа процесса // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2019. № 2. С. 243–250. DOI: 10.22281/2413-9920-2019-05-02-243-250
16. Yadav S., Saldaña C., Murthy T. G. Experimental investigations on deformation of soft rock during cutting // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2018. Vol. 105. P. 123–132. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2018.03.003
17. El Naim A. M., Zaiid B., Omer A. Effect of tine depth and width on soil failure angle, cutting coefficients and power in three-dimensional case: computer modeling // World Journal of Agricultural Research. 2016. Vol. 4(1). P. 24–30. DOI: 10.12691/wjar-4-1-4
18. Шемякин С. А., Шишкин Е. А. Определение максимального усилия поворота ковша гидравлического экскаватора, оборудованного обратной лопатой // Известия вузов. Горный журнал. 2023. № 3. С. 17–24. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-3-17-24

Поступила в редакцию 21 января 2024 года

Сведения об авторах:

Шемякин Станислав Аркадьевич – доктор технических наук, профессор Высшей школы промышленной инженерии Тихоокеанского государственного университета. E-mail: 000403@pnu.edu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3238-0840>

Шишкин Евгений Алексеевич – кандидат технических наук, доцент Высшей школы промышленной инженерии Тихоокеанского государственного университета. E-mail: 004655@pnu.edu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4387-0228>

Determining the resistance to cutting of frozen rock with pebble inclusions

Stanislav A. Shemiakin¹, Evgenii A. Shishkin^{1*}

¹ Pacific National University, Khabarovsk, Russia.

Abstract

Introduction. The existing studies of rock cutting by ripping equipment do not establish an analytical relationship between the characteristics of frozen rock with pebble inclusions and their resistance to cutting. The results of the existing studies allow only approximating the parameters of tractor and excavator-based rippers.

Research objective is to develop a methodology for determining the normal and tangential components of resistance to cutting for frozen rock with pebble inclusions.

Methods of research. To achieve the objective, a model was developed of interaction between the shearer tooth and frozen rock with pebble inclusions. The process of bulb of pressure formation during the shearer tooth motion in the rock massif was considered. Forces and stresses have been determined which act on the separated block of rock with pebble inclusions in the limit state.

Results. The relationship has been established between the rock characteristics and the maximum values of the tangential and normal components of resistance to cutting of frozen rock with pebble inclusions. The adequacy of the model of resistance to cutting of frozen rocks with pebble inclusions was assessed on a bench for layer-by-layer rock cutting in full-scale and laboratory conditions. The adequacy assessment showed the convergence of the analytical calculation results and in-situ measurements, which is sufficient for practical application.

Conclusions. The developed method of calculating the resistance to cutting allows to determine power the shearer requires to cut the given rock with a cutting body.

Keywords: rocks; ripping equipment; cutting process; pebble inclusions; resistance to cutting; bench; layer-by-layer rock cutting.

REFERENCES

1. Kravchenko S. M., Slepchenko V. A. The influence of gravel-pebble inclusions on the process of cutting frozen soils, taking into account the wear of cutters of trenchers. *Nauchno-tehnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta = The Bryansk State University Herald*. 2019; 4: 443–449. (In Russ.) Available from: doi: 10.22281/2413-9920-2019-05-04-443-449
2. Shemiakin S. A. et al. *Technical and technological solutions for the development of frozen rocks in mining and construction*. Khabarovsk: DVGUPS Publishing; 2017. (In Russ.)
3. Hu M., Gao T., Dong X. Simulation of soil-tool interaction using smoothed particle hydrodynamics (SPH). *Soil and Tillage Research*. 2023; 229. Available from: doi: 10.1016/j.still.2023.105671
4. Liu Y., Dai F. A review of experimental and theoretical research on the deformation and failure behavior of rocks subjected to cyclic loading. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2021; 13: 1203–1230. Available from: doi: 10.1016/j.jrmge.2021.03.012
5. Wang X., Zhang S., Pan H., Zheng Z. Effect of soil particle size on soil-subsoiler interactions using the discrete element method simulations. *Biosystems Engineering*. 2019; 182: 138–150. Available from: doi: 10.1016/j.biosystemseng.2019.04.005
6. Kyznetsova V., Savinkin V., Ratushnaya T., Sandu A. Study of the spatial distribution of forces and stresses on wear surfaces at optimization of the excavating part of an earthmoving machine transverse profile. *Coatings*. 2021; 11(2): 1–16. Available from: doi: 10.3390/coatings11020182
7. Shemiakin S. A., Cheban A. Iu. Determination of resistance to cutting of frozen rocks deeply blocked (slot). *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika = Mining Equipment and Electromechanic*. 2015; 6: 39–44. (In Russ.)
8. Makange N. R., Ji C., Nyalala I., Sunusi I. I. Prediction of precise subsoiling based on analytical method, discrete element simulation and experimental data from soil bin. *Scientific Reports*. 2021. Vol. 11. Available from: doi: 10.1038/s41598-021-90682-w
9. Tretiak A. Ia., Popov V. V., Grossu A. N., Borisov K. A. Innovative approaches to designing highly efficient rock breaking tool. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tehnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2017; 8: 217–222. (In Russ.) Available from: doi: 10.25018/0236-1493-2017-8-0-225-230.
10. Shemiakin S. A., Shishkin E. A. Physical and mathematical model of rock destruction by a milling machine cutter. *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute*. 2021; 251: 639–647. (In Russ.) Available from: doi: 10.31897/PMI.2021.5.3

11. Hegde A., Murthy T. Experimental studies on deformation of granular materials during orthogonal cutting. *Granular Matter*. 2022; 24. Available from: doi: 10.1007/s10035-022-01227-5.
12. Hegde A., Murthy T. An experimental study on shear bands in sand using the orthogonal cutting setup. *EPJ Web of Conferences*. 2021; 249: 10007. Available from: doi 10.1051/epjconf/202124910007
13. Wang X., Fang W., Han D., Chen X. Review of the research on soil disturbance by tools. *Applied Sciences*. 2022; 13(1). Available from: doi: 10.3390/app13010338
14. Boiarkina I. V. Specific energy intensity of digging soils and materials by a technological machine bucket. *Omskii nauchnyi vestnik = Omsk scientific Bulletin*. 2017; 2(152): 5–7. (In Russ.)
15. Nikolaev V. A. Calculation of energy costs for cutting soil with a horizontal blade by analyzing the process. *Nauchno-tehnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta = The Bryansk State University Herald*. 2019; 2: 243–250. (In Russ.) Available from: doi: 10.22281/2413-9920-2019-05-02-243-250
16. Yadav S., Saldaña C., Murthy T. G. Experimental investigations on deformation of soft rock during cutting. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2018; 105: 123–132. Available from: doi: 10.1016/j.ijrmmms.2018.03.003
17. El Naim A. M., Zaied B., Omer A. Effect of tine depth and width on soil failure angle, cutting coefficients and power in three-dimensional case: computer modeling. *World Journal of Agricultural Research*. 2016; 4(1): 24–30. Available from: doi: 10.12691/wjar-4-1-4
18. Shemiakin S. A., Shishkin E. A. Determining the maximum turning force of the hydraulic backhoe excavator bucket. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2023; 3: 17–24. (In Russ.) Available from: doi: 10.21440/0536-1028-2023-3-17-24

Received 21 January 2024

Information about the authors:

Stanislav A. Shemiakin – DSc (Engineering), professor of the School of Industrial Engineering, Pacific National University. E-mail: 000403@pnu.edu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3238-0840>

Evgenii A. Shishkin – PhD (Engineering), associate professor of the School of Industrial Engineering, Pacific National University. E-mail: 004655@pnu.edu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4387-0228>

Для цитирования: Шемякин С. А., Шишкин Е. А. Определение сопротивления резанию мерзлых горных пород с галечными включениями // Известия вузов. Горный журнал. 2024. № 4. С. 86–96. DOI: 10.21440/0536-1028-2024-4-86-96

For citation: Shemiakin S. A., Shishkin E. A. Determining the resistance to cutting of frozen rock with pebble inclusions. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2024; 4: 86–96. DOI: 10.21440/0536-1028-2024-4-86-96