

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-633213>

Оригинальное исследование



Расчёт силы сопротивления при копании твёрдой глины цилиндрическим ковшом

Г.Г. Бурый

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), Омск, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Производительность одноковшовых гидравлических экскаваторов влияет на многие сферы деятельности. Этот параметр машины во многом зависит от объёма перемещаемого материала. Однако силы сопротивления на ковше не позволяют устанавливать на экскаватор ковши больших объёмов.

Цель работы. В работе рассматривается конструкция ковша, при внедрении которого в грунт, сопротивление копанию сокращается. Необходимо провести проверку данного утверждения.

Методы. Для этого рассматривается процесс внедрения рассматриваемого ковша в твёрдую сухую глину. Этот грунт труднее всего поддаётся разработке. Так как в этом грунте отсутствует вязкость, для описания процесса используются уравнения пространственных задач теории упругости. Принимается ряд допущений и решается система дифференциальных уравнений, описывающих напряжения в грунте.

Результаты. Итогом решения является полученная зависимость для определения нормального давления от грунта в процессе его разрушения, что позволяет определить общую силу сопротивления копанию. Далее приводится описание исходных параметров грунта и ковша предлагаемой конструкции, спроектированного для экскаватора на базе трактора ЮМЗ. Проводится подстановка исходных параметров в полученное решение.

Заключение. Полученное значение силы сопротивления копанию существенно ниже силы, которую приходится преодолевать гидроприводу стандартного экскаватора.

Ключевые слова: ковш; экскаватор; сопротивление копанию; теория упругости; рабочее оборудование.

Как цитировать:

Бурый Г.Г. Расчёт силы сопротивления при копании твёрдой глины цилиндрическим ковшом // Тракторы и сельхозмашины. 2024. Т. 91, № 4. С. 442–449. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-633213>

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-633213>

Original Study Article

Calculation of resistance force at firm clay digging with a cylindrical bucket

Grigory G. Buryi

Siberian State Automobile and Highway University, Omsk, Russian Federation

ABSTRACT

BACKGROUND: The performance of single-bucket hydraulic excavators affects many areas of activity. This parameter of the machine largely depends on the volume of the material being moved. However, the bucket resistance forces do not allow large buckets to be installed on an excavator.

AIM: The paper discusses the design of the bucket which resistance to digging is reduced when it embeds into the ground. This statement has to be verified.

METHODS: For this aim, the process of embedding the bucket into firm dry clay is considered. This kind of soil is the most difficult to be processed. Since there is no viscosity in this soil, the equations of spatial problems of elasticity theory are used to describe the process. A number of assumptions are made, and the system of differential equations describing stresses in the soil is solved.

RESULTS: The result of the solution is the obtained dependence for determining the normal pressure from the soil in the process of its destruction, which helps to determine the overall digging resistance force. The initial parameters of the soil and bucket of the proposed design, developed for the excavator based on the YuMZ tractor, are described. The initial parameters are substituted into the resulting solution.

CONCLUSION: The obtained value of the digging resistance force is significantly lower than the force that the hydraulic drive of an ordinary excavator has to overcome.

Keywords: bucket; excavator; digging resistance; theory of elasticity; working equipment.

To cite this article:

Buryi GG. Calculation of resistance force at firm clay digging with a cylindrical bucket. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2024;91(4):442–449.

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-633213>

Received: 04.06.2024

Accepted: 30.09.2024

Published online: 30.09.2024

ВВЕДЕНИЕ

Одноковшовые гидравлические экскаваторы являются одними из самых востребованных машин в сфере строительства, добычи полезных ископаемых, в коммунальном и сельском хозяйстве. Затраты на покупку данных машин очень высоки и во многом зависят от конструкции и перемещения требуемого полезного объёма грунта. Как правило, увеличение требуемого полезного объёма перемещаемого грунта ведёт к удорожанию конструкции путём установки на машину более мощного двигателя, который обеспечит работу более мощного гидропривода. Установка более мощного гидропривода и двигателя связана с тем, что с ростом рабочего объёма ковша увеличивается площадь контакта ковша с грунтом. Таким образом, возрастают силы сопротивления на ковше, которые требуется преодолеть гидроприводу. В работе будет рассмотрена конструкция цилиндрического ковша, которая позволяет за счёт изменённой формы и траектории движения снизить силы сопротивления копанью (рис. 1) [1–2].

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Полезный эффект достигается за счёт совпадения формы цилиндрического каркаса 1 и траектории его движения. Совпадение формы каркаса ковша и его траектории движения, позволяет снизить до минимума нормальные силы сопротивления грунта на ковше, которые и создают основное сопротивление. Данный процесс можно сравнить с вертикальным внедрением в грунт вертикальной пластины. Таким образом, при неизменных характеристиках гидропривода, появляется возможность устанавливать ковши большего объёма. Однако, рассматриваемая гипотеза требует подтверждений.

МЕТОДЫ

Дизайн исследования

В работе будет определена сила сопротивления при разработке самого тяжёлого немёрзлого грунта, так как мёрзлые грунты обычно предварительно подвергают разрыхлению. К такому грунту относится пласт сухой тяжёлой глины, сформировавшийся в среде естественного залегания. Для этого рассмотрим процесс внедрения ковша в виде математической модели.

Критерии соответствия

Данный грунт имеет высокую твёрдость и в нём отсутствует вязкость. Этот материал похож на камень и активно применяется как основа строительных материалов. Таким образом, характер разрушения данного материала ковшом может быть описан уравнениями не реологических моделей, а пространственных задач теории упругости. Соответственно такое явление как налипание грунта на стенки

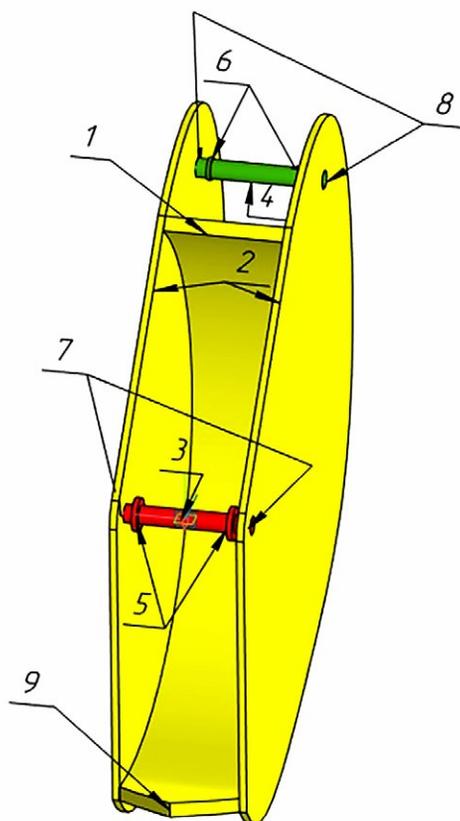


Рис. 1. Ковш цилиндрический: 1 — цилиндрический каркас; 2 — боковые стенки; 3 — ось поворота ковша устанавливаемая на рукоять экскаватора; 4 — ось крепления штока гидроцилиндра поворота ковша; 5 и 6 — буртики для исключения продольных перемещений ковша; 7 — отверстия в боковых стенках для установки оси поворота ковша; 8 — отверстия в боковых стенках для установки оси крепления штока гидроцилиндра; 9 — зуб ковша.

Fig. 1. A cylindrical bucket: 1 — a cylindrical frame; 2 — sidewalls; 3 — a bucket rotation axle for assembly with a dipperstick; 4 — a mount axle of a hydraulic cylinder rod for bucket rotation; 5, 6 — fillets for limiting longitudinal displacement of the bucket; 7 — holes in the sidewalls for the bucket rotation axle mounting; 8 — holes in the sidewalls for mounting of the hydraulic cylinder rod mount axle; 9 — a bucket's tooth.

ковша будет отсутствовать. При внедрении ковша в грунт на него действует сила сопротивления копанью, состоящая из нормальной силы и касательной силы [3–10].

При определении нормальной и касательной сил сопротивления необходимо знать нормальное давление на поверхность грунта, которое необходимо для процесса разрушения грунта. Процесс разрушения грунта происходит при превышении предельных значений напряжений в грунте. Рассмотрим напряжения в грунте на кубе грунта (рис. 2).

Так как в грунте отсутствует пластичность, то для описания тензора напряжений следует рассмотреть пространственную контактную задачу теории упругости. Принимая допущение о том, что площадка, на которую действует давление квадратная, получаем $x=y$.

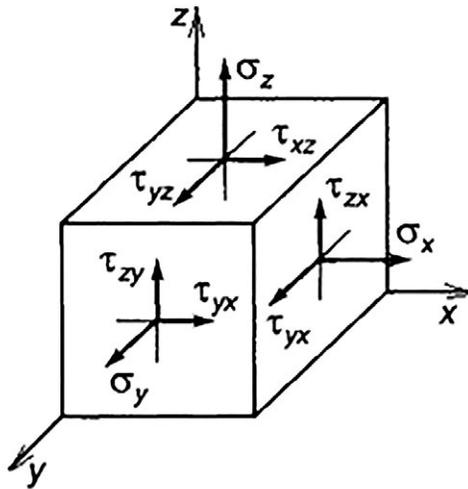


Рис. 2. Тензор механических напряжений элементарного куба грунта.

Fig. 2. The stress tensor of an elementary cube of soil.

Условия проведения

Исследование проведено на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета».

Продолжительность исследования

Исследование проводилось на протяжении 6 месяцев.

Проведённые в рамках исследования процедуры

Исходя из выше сказанного, напряжения могут быть описаны системой уравнений (1)–(6) [11–14].

$$\frac{1+\nu}{E} \times \sigma_x = 2\nu \times \frac{\partial \phi}{\partial z} + (1-2\nu) \times \int_z \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} dz - z \times \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2}; \quad (1)$$

$$\frac{1+\nu}{E} \times \tau_{yz} = -z \times \frac{\partial^2 \phi}{\partial y \partial z}; \quad (2)$$

$$\frac{1+\nu}{E} \times \sigma_y = 2\nu \times \frac{\partial \phi}{\partial z} + (1-2\nu) \times \int_z \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} dz - z \times \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2}; \quad (3)$$

$$\frac{1+\nu}{E} \times \tau_{zx} = -z \times \frac{\partial^2 \phi}{\partial z \partial y}; \quad (4)$$

$$\frac{1+\nu}{E} \times \tau_{xy} = (1-2\nu) \times \int_z \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} dz - z \times \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2}; \quad (5)$$

$$\frac{1+\nu}{E} \times \sigma_z = \frac{\partial \phi}{\partial z} - z \times \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2}. \quad (6)$$

Рассмотрим обозначения в системе уравнений: $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ — нормальные напряжения, Па; $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ — касательные напряжения, Па; ν — коэффициент Пуассона;

x и y — координаты, описывающие площадь контакта, м; z — глубина, на которой присутствуют указанные напряжения, м; E — модуль упругости грунта, Па; ϕ — гармоническая функция.

Гармоническая функция описывается следующим выражением (7)

$$\phi = -\frac{2(1+\nu)}{4\pi E} \iint_S \frac{p(\xi, \eta) d\xi d\eta}{\sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + z^2}}, \quad (7)$$

где p — нормальное давление, приложенное в центре площадки контакта, Па; ξ и η координаты центра площадки (так как площадка квадратная примем $\xi=\eta=0,5 \cdot y$); S — площадь площадки, м².

Двойной интеграл в выражении (7) описывает форму площади контакта, так как в нашем случае она имеет форму квадрата со сторонами равными y , то выражение (7) можно преобразовать и записать в следующем виде

$$\phi = -\frac{2(1+\nu)}{4\pi E} \times \int_0^y d\xi \int_0^y \frac{p d\eta}{\sqrt{\frac{y^2}{2} + z^2}}, \quad (8)$$

Проинтегрируем выражения под интегралами и получим

$$\phi = -\frac{2(1+\nu)}{4\pi E} \times \frac{p \times y^2}{\sqrt{\frac{y^2}{2} + z^2}}, \quad (9)$$

Выразим y через z , введём коэффициент $\alpha=z/y$ и про- дифференцируем по y и по z выражение (9)

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = -\frac{2(1+\nu)}{4\pi E} \times \frac{p}{\alpha^2 \times \sqrt{\frac{1}{2\alpha^2} + 1}}; \quad (10)$$

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0; \quad (11)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial y} = 0; \quad (12)$$

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0; \quad (13)$$

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial y \partial z} = 0. \quad (14)$$

Подставим выражения (10)–(14) в систему уравнений (1)–(6), сложим левые и правые части уравнений системы и после преобразований получим

$$\sum \sigma = -\frac{2+8\nu}{4\pi} \times \frac{p}{\alpha^2 \times \sqrt{\frac{1}{2\alpha^2} + 1}}. \quad (15)$$

Основной исход исследования

Таким образом, нормальное давление определим по формуле

$$p = \alpha^2 \times \sqrt{\frac{1}{2\alpha^2} + 1} \times \frac{2\pi}{1 + 4\pi} \times \sum \sigma. \quad (16)$$

Дополнительные исходы исследования

Нормальную силу F_1 и силу трения F_2 определим по следующим формулам

$$F_1 = p_1 \times S_1, \quad (17)$$

$$F_2 = p_2 \times S_2 \times \mu, \quad (18)$$

где p_1 — нормальное давление на плоскость нормальных сил, Па; p_2 — нормальное давление на плоскость сил трения, Па; S_1 — площадь поверхности ковша, воспринимающей нормальные силы, м²; S_2 — площадь поверхности ковша, воспринимающей силы трения, м²; μ — коэффициент трения грунта по стали (для твёрдой сухой глины $\mu=0,7$).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Объекты (участники) исследования

Рассмотрим спроектированный ковш новой конструкции объёмом 0,25 м³ для установки на трактор ЮМЗ-6АКЛ (рис. 3).

Базовый трактор взят для примера, так как в расчёте не будут рассмотрены его характеристики, за исключением силы копания. Конструкцию ковша, представленную на рис. 3, не требуется дополнять рёбрами жёсткости, так как проведённый прочностной расчёт в программе Компас 3D, приложение APM FEM, показал достаточный коэффициент запаса прочности. Выступающие за пределы задней стенки, кромки боковых стенок не будут препятствовать процессу копания, а наоборот будут дополнительно разрушать грунт.

Основные результаты исследования

Площадь контакта рассмотрим в виде квадрата со сторонами x и y , таким образом, примем $x=y$. Для рассматриваемого ковша в самой нагруженной точке (когда ковш повернут на 90°) $S_1=0,02$ м²; $S_2=3,95$ м². При определении площадей S_1 и S_2 учитывался контакт внутренней и наружной частей стенок с грунтом. По зависимости (16) определим нормальные давления $p_1=2 \cdot 10^6$ Па, $p_2=0,0139 \cdot 10^6$ Па.

Дополнительные результаты исследования

Исходя из зависимостей (17) и (18) полная сила сопротивления копанью составит приблизительно 66,5 кН. Несмотря на то, что вес экскаватора составляет около 60 кН, при любых работах выставляются гидравлические упоры, которые позволяют исключить опрокидывание экскаватора даже при работе трёх гидроцилиндров, одного для поворота ковша и двух для поворота рукояти.

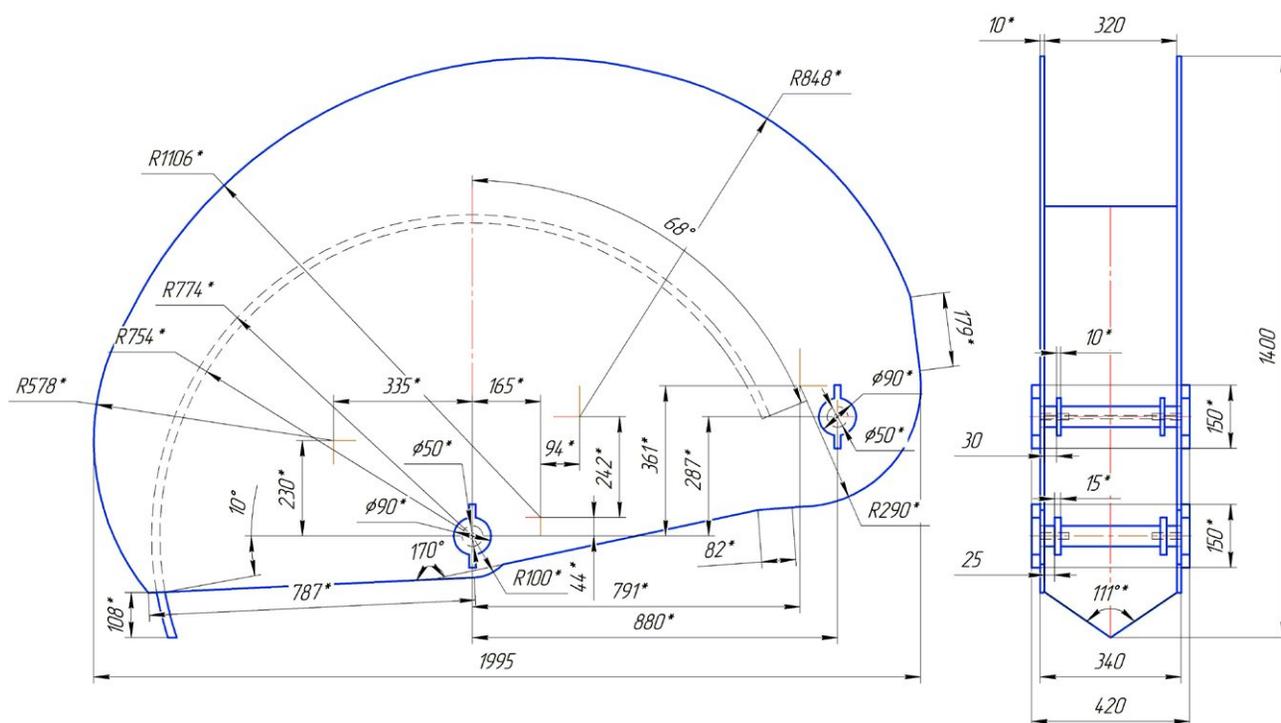


Рис. 3. Эскиз цилиндрического ковша.
Fig. 3. The sketch of the cylindrical bucket.

ОБСУЖДЕНИЕ

Резюме основного результата исследования

Следует отметить, что при разработке рассматриваемого грунта стандартным оборудованием экскаватора, используется сила от трёх гидроцилиндров, которая в сумме составляет приблизительно 240 кН. Полученные результаты показали, что при разработке рассматриваемого грунта можно использовать только гидроцилиндр поворота ковша.

Обсуждение основного результата исследования

В настоящее время известные теории копания грунтов ограничиваются определёнными допущениями, не все из них позволяют учесть динамику процесса копания грунтов. Данные теории дают адекватные результаты при определённых факторах, не учитывая изменения некоторых из них в реальных условиях. Существующие теории копания грунтов можно условно разделить на две основные группы: 1) теории, основанные на эмпирических данных, полученных в результате многофакторных экспериментов, на основе которых разработаны приближенные математические модели процессов копания; 2) теории, которые основаны на положениях статики сыпучих сред и условий предельного равновесия.

Ограничения исследования

Определим исходные данные для определения сопротивления копанию рассматриваемым ковшом. Коэффициент Пуассона, для твёрдой глины, изменяется в диапазоне 0,27–0,41, где нижние значения соответствуют сухому грунту. Таким образом, принимаем коэффициент Пуассона для сухой твёрдой глины $\nu=0,27$.

Рассмотрим самое нагруженное положение ковша, когда он углубился на 90° . Разрушение происходит при возникновении напряжений в нем равных пределу прочности σ_{np} . Необходимо принять значение предела прочности для тяжёлой, частично разработанной, сухой монтмориллонитовой глины. Глина принимается в частично разработанном виде, т.к. по мере заглубления ковш разрушает её. По анализу зависимости прочности на одноосное сжатие от коэффициента пористости установлено, что предел прочности немерзлого грунта приблизительно составит $\sigma_{np}=5$ МПа. Так как сила P направлена по оси z ,

напряжение $\sigma_z=\sigma_{np}=5$ МПа. Напряжения $\sigma_x=\sigma_y$ связано с напряжением σ_z зависимостью $\sigma_x=\sigma_y=\nu\cdot\sigma_z=1,35$ МПа. Касательные напряжения τ связаны с нормальными σ следующей зависимостью $\tau=\sigma\cdot\tg\varphi+C$, где φ — угол внутреннего трения грунта (по исследованиям Маслова Н.Н. для отрицательного показателя консистенции $-0,45$ для твёрдой глины $\varphi=22^\circ$); C — сцепление грунта (по исследованиям А.Н. Зеленина и В.Б. Горовица, для твёрдой глины с показателем консистенции $-0,45$ сцепление составит $C=0,23$ МПа). Именно при показателе консистенции глины $-0,45$ наблюдается наибольшее число 34 удара плотномера ДорНИИ, что говорит о верхней границе IV категории грунта. Исходя из расположения напряжений, представленных на рис. 2, определим касательные напряжения $\tau_{xy}=\sigma_y\cdot0,4+0,23=1,35\cdot0,4+0,23=0,77$ МПа, $\tau_{yz}=\tau_{zx}=\sigma_z\cdot0,4+0,23=2,23$ МПа. Таким образом, сумма напряжений для твёрдой сухой частично разработанной глины составит $\Sigma\sigma\approx 13$ МПа. Максимальный модуль упругости E для твёрдой глины составляет 7600 МПа [15–19].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итог можно отметить, что полученная сила составляет меньшее значение, чем толкающая сила гидроцилиндра поворота ковша экскаватора на базе трактора ЮМЗ-6АКЛ. Однако при копании серийным экскаватором очень часто работы проводятся не только гидроцилиндром поворота ковша, а также гидроцилиндрами поворота рукояти.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Конфликт интересов. Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с проведенным исследованием и публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Автор заявляет об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования и подготовке публикации.

ADDITIONAL INFORMATION

Competing interests. The author declares that he has no competing interests.

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент РФ 218368 / 23.05.2023 Бюл. №15. Бурый Г.Г. Ковш экскаватора. EDN: ELYPHT
2. Бурый Г.Г., Щербаков В.С., Потеряев И.К. Увеличение производительности одноковшового экскаватора через усовершенствование формы ковша // Вестник Брянского государственного

технического университета. 2019. № 11(84). С. 38–45. doi: 10.30987/1999-8775-2019-2019-11-38-45

3. Николаев В.А. Затраты энергии на резание грунта ковшами агрегата непрерывного действия для формирования подстилающего слоя автодороги // Вестник СибАДИ. 2020. № 6. С. 676–688. doi: 10.26518/2071-7296-2020-17-6-676-688

4. Литвин О.И., Хорешок А.А., Дубинкин Д.М., и др. Анализ методик расчёта производительности карьерных гидравлических экскаваторов // Горная промышленность. 2022. № 5. С. 112–120. doi: 10.30686/1609-9192-2022-5-112-120
5. Николаев В.А. Анализ взаимодействия кромки лезвия консольного ножа с грунтом // Вестник СибАДИ. 2020. № 2. С. 172–181. doi: 10.26518/2071-7296-2020-17-2-172-181
6. Лукашук О.А. Закономерности формирования режимных параметров главных механизмов карьерного экскаватора в процессе экскавации горных пород // Горное оборудование и электромеханика. 2019. № 3(143). С. 14–17. doi: 10.26730/1816-4528-2019-3-14-17
7. Трояновская И.П., Разношинская А.В., Козьминых В.А., Лещенко Е.А. Экспериментальные исследования процесса промышленного рыхления грунта // Горный журнал. 2021. № 5. С. 87–90. doi: 10.17580/gzh.2021.05.11
8. Kujundžić T., Klanfar M., Korman T., Briševac Z. Influence of crushed rock properties on the productivity of a hydraulic excavator // Applied Sciences (Switzerland). 2021. Vol. 11, N. 5. P. 1–15. doi: 10.3390/app11052345
9. Choudhary B.S. Effect of blast induced rock fragmentation and muckpile angle on excavator performance in surface mines // Mining of Mineral Deposits. 2019. Vol. 13, N. 3. P. 119–126. doi: 10.33271/mining13.03.119
10. Xu G., Yu Z., Lu N., Lyu G. High-gain observer-based sliding mode control for hydraulic excavators // Harbin Gongcheng Daxue Xuebao. 2021. Vol. 42, N. 6. P. 885–892. doi: 10.11990/jheu.201911056
11. Пожарский Д.А. Периодические контактные и смешанные задачи теории упругости (обзор). Известия высших учебных заведений // Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. 2021. № 2 (210). С. 22–33. doi: 10.18522/1026-2237-2021-2-22-33
12. Босаков С.В. К решению контактной задачи для прямоугольной пластинки на упругом полупространстве // Наука и техника. 2020. Т. 19, № 3. С. 224–229. doi: 10.21122/2227-1031-2020-19-3-224-229
13. Линник Е.Ю. Оценка контактных напряжений при внедрении ударника в прочный грунт // Проблемы прочности и пластичности. 2020. Т. 82, № 1. С. 52–63. doi: 10.32326/1814-9146-2020-82-1-52-63
14. Босаков С.В., Котов Ю.Н. Контактная задача для пластинки при условии ограничений на её некоторые перемещения // Строительная механика и расчёт сооружений. 2022. № 1 (300). С. 54–58. doi: 10.37538/0039-2383.2022.1.54.58
15. Бровка А.Г., Дедюля И.В., Мурашко А.А. Зависимость прочностных характеристик глины аргиллитоподобной от количества незамёрзшей воды // Природопользование. 2021. № 2. С. 96–105. doi: 10.47612/2079-3928-2021-2-96-105
16. Рашидов Т.Р., Джураева Н.Б., Уринов А.П. Моделирование процесса деформирования и движения почвы в зоне воздействия глубокорыхлителя // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2021. № 73. С. 81–94. doi: 10.17223/19988621/73/8
17. Бекбасаров И.И. О влиянии показателей глинистых грунтов на сжимающие напряжения в свае при забивке // Труды университета. 2023. № 4 (93). С. 254–260. doi: 10.52209/1609-1825_2023_4_254
18. Куликова Е.Г. Некоторые результаты лабораторных исследований влияния вибрации на прочностные характеристики связанных мелкодисперсных геоматериалов // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2022. Т. 2, № 3. С. 194–201. doi: 10.33764/2618-981X-2022-2-3-194-201
19. Трофимов В.Т., Королев В.А., Вознесенский Е.А., и др. Грунтоведение. Москва: МГУ, 2005.

REFERENCES

1. Patent RUS №218368/ 23.05.2023. Byul. №15. Bury`j GG. Kovsh e`skavatora. (In Russ.) EDN: ELYPHT
2. Bury`j GG, Shherbakov VS, Poteryaev IK. Increase Single Bucket Excavator Productivity by Improving Bucket Shape. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo texnicheskogo universiteta*. 2019;84(11):38–45. (In Russ.) doi: 10.30987/1999-8775-2019-2019-11-38-45
3. Nikolaev VA. Energy consumption for cutting the soil with buckets of a continuous unit to form the underlying layer of the road. *Vestnik SibADI*. 2020; 76(6):676–688. (In Russ.) doi: 10.26518/2071-7296-2020-17-6-676-688
4. Litvin OI, Xoreshok AA, Dubinkin DM, et al. Analysis of methods for calculating the productivity of quarry hydraulic excavators. *Gornaya promy`shlennost`*. 2022;5:112–120. (In Russ.) doi: 10.30686/1609-9192-2022-5-112-120
5. Nikolaev VA. Analysis of the interaction of the edge of the cantilever knife blade with the ground. *Vestnik SibADI*. 2020;72(2):172–181. (In Russ.) doi: 10.26518/2071-7296-2020-17-2-172-181
6. Lukashuk OA. Regularities of formation of regime parameters of main mechanisms of quarry excavator in process of rock excavation. *Gornoe oborudovanie i e`lektromexanika*. 2019; 143(3):14–17. (In Russ.) doi: 10.26730/1816-4528-2019-3-14-17
7. Troyanovskaya IP, Raznoshinskaya AV, Koz`miny`x VA, Leshhenko EA. Experimental studies of the process of industrial soil loosening. *Gorny`j zhurnal*. 2021;5:87–90. (In Russ.) doi: 10.17580/gzh.2021.05.11
8. Kujundžić T, Klanfar M, Korman T, Briševac Z. Influence of crushed rock properties on the productivity of a hydraulic excavator. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2021;11(5):1–15. doi: 10.3390/app11052345
9. Choudhary BS. Effect of blast induced rock fragmentation and muckpile angle on excavator performance in surface mines. *Mining of Mineral Deposits*. 2019;13(3):119–126. doi: 10.33271/mining13.03.119
10. Xu G, Yu Z, Lu N, Lyu G. High-gain observer-based sliding mode control for hydraulic excavators. *Harbin Gongcheng Daxue Xuebao*. 2021;42(6):885–892. doi: 10.11990/jheu.201911056
11. Pozharskij DA. Periodic contact and mixed elasticity theory problems (overview). *Izvestiya vy`sshix uchebny`x zavedenij. Severo-Kavkazskij region. Seriya: Estestvenny`e nauki*. 2021; 210(2):22–33. (In Russ.) doi: 10.18522/1026-2237-2021-2-22-33
12. Bosakov SV. To the solution of the contact problem for a rectangular plate on an elastic half-space. *Nauka i texnika*. 2020;19(3):224–229. (In Russ.) doi: 10.21122/2227-1031-2020-19-3-224-229

13. Linnik EYu. Assessment of contact stresses when inserting the striker into strong soil. *Problemy` prochnosti i plastichnosti*. 2020;82(1):52–63. (In Russ.) doi: 10.32326/1814-9146-2020-82-1-52-63
14. Bosakov SV, Kotov YuN. Contact task for the plate, subject to restrictions on its some movements. *Stroitel'naya mexanika i raschyot sooruzhenij*. 2022;300(1):54–58. (In Russ.) doi: 10.37538/0039-2383.2022.1.54.58
15. Brovka AG, Dedyulya IV, Murashko AA. Dependence of strength characteristics of argillite-like clay on the amount of unfrozen water. *Prirodopol`zovanie*. 2021;2:96–105. (In Russ.) doi: 10.47612/2079-3928-2021-2-96-105
16. Rashidov TR, Dzhuraeva NB, Urinov AP. Modeling of the process of deformation and movement of the soil in the area of impact of the dredger. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mexanika*. 2021;73:81–94. (In Russ.) doi: 10.17223/19988621/73/8
17. Bekbasarov II. Impact of clay soil parameters on compressive stresses in pile during driving. *Trudy` universiteta*. 2023; 93(4):254–260. (In Russ.) doi: 10.52209/1609-1825_2023_4_254
18. Kulikova EG. Some results of laboratory studies of the effect of vibration on the strength characteristics of cohesive fine geomaterials. *Intere`kspo Geo-Sibir`*. 2022;2(3):194–201. (In Russ.) doi: 10.33764/2618-981X-2022-2-3-194-201
19. Trofimov VT, Korolev VA, Voznesenskij EA, et al. *Soil science*. Moscow: MGU; 2005. (In Russ.)

ОБ АВТОРЕ

Бурый Григорий Геннадьевич,

доцент, канд. техн. наук,
доцент кафедры «Автомобильный транспорт»;
адрес: Российская Федерация, 644034, Омск,
ул. 26 Северная, д. 19, корп. 1;
ORCID: 0000-0002-5008-9176;
eLibrary SPIN: 4216-0384;
e-mail: buryy1989@bk.ru

AUTHOR'S INFO

Grigory G. Buryi,

Associate Professor, Cand. Sci. (Engineering),
Associate Professor of the Automotive Transportation Department;
address: 19 bldg 1 26th Severnaya street, 644034 Omsk,
Russian Federation;
ORCID: 0000-0002-5008-9176;
eLibrary SPIN: 4216-0384;
e-mail: buryy1989@bk.ru