

**Бурый Григорий Геннадьевич**, кандидат техн. наук, доцент

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 644080, Россия, г. Омск, пр. Мира, 5

E-mail: buryu1989@bk.ru

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВНЕДРЕНИЯ В ГРУНТ РАБОЧЕГО ОРГАНА ГОРНОЙ МАШИНЫ



### Информация о статье

Поступила:  
27 сентября 2021 г.

Рецензирование:  
20 октября 2021 г.

Принята к печати:  
26 октября 2021 г.

**Ключевые слова:**  
горные машины, дорожные машины, грунт, стенд, экспериментальные исследования

### Аннотация.

Исследование процесса внедрения рабочих органов строительных и горных машин позволяет подбирать их более рациональные эксплуатационные и конструктивные параметры. Совершенствование конструкций строительных и дорожных машин позволит добиться увеличения их производительности, что является актуальной задачей. Одним из основных параметров строительной или дорожной машины является сила воздействия рабочего органа на грунт, которая зависит от сил сопротивления грунта. Целью исследований является уточнение объемов грунта, оказывающих сопротивление внедрению рабочего органа. Для достижения цели методом фото- и видеофиксации был собран экспериментальный стенд, позволяющий визуально наблюдать за процессом внедрения рабочего органа в грунт. В статье приведена конструкция экспериментального стенда и методика его использования для достижения цели. Также в работе приведены методы исследования параметров экспериментального грунта. В результате проведенных экспериментальных исследований удалось выявить очертания объемов грунта, вовлекаемых в движение с рабочим органом, тем самым оказывающих сопротивление его внедрению. Результаты полученных исследований могут быть применены в математическом моделировании процессов уплотнения, копания и резания грунта рабочими органами строительных и дорожных машин.

**Для цитирования:** Бурый Г.Г. Исследование процесса внедрения в грунт рабочего органа горной машины // Горное оборудование и электромеханика – 2021. – № 5 (157). – С. 29-34 – DOI: 10.26730/1816-4528-2021-5-29-34

При разработке полезных ископаемых, строительстве и обслуживании инженерных сооружений используются различные операции, такие как копание грунта, уплотнение грунта, перемещение грунта и другие. Осуществление этих операций представляет собой внедрение рабочего органа строительной машины в грунт. Внедрению рабочего органа препятствуют массы грунта, перемещаемые с ним. Приближенное знание о перемещаемых массах грунта не позволит подобрать оптимальные параметры рабочих органов, используя математическое моделирование процесса. Таким образом, уточнение перемещаемых масс грунта позволит более точно подбирать параметры строительных машин, используя математическое моделирование процесса в качестве инструмента.

Целью работы является уточнение объемов, перемещаемых со штампом масс грунта. Любой рабочий орган дорожной машины представляет собой штамп различной формы.

Объектом исследования в работе является процесс внедрения штампа в грунт. Сила, затрачиваемая на внедрение штампа, должна превышать вес объемов перемещаемого грунта. Эти объемы грунта включают в себя не только уплотненное ядро, а также смежные слои грунта. Предметом исследования являются объемы грунта, перемещаемого штампом в процессе его заглубления.

Рассмотрим известные на сегодняшний день способы определения масс грунта, взаимодействующих со штампом.

При устройстве оснований и фундаментов ученые использовали закладываемые в грунт тензодатчики. Тензодатчики использовались для определения напряжений в грунте под штампами больших размеров, а именно более 30 см. Однако режущие кромок многих рабочих органов дорожных машин имеют меньшие размеры [1].

В своих работах А.Н. Зеленин описал экспериментальный способ определения уплотненной массы перед штампом толщиной 15мм. Испытания

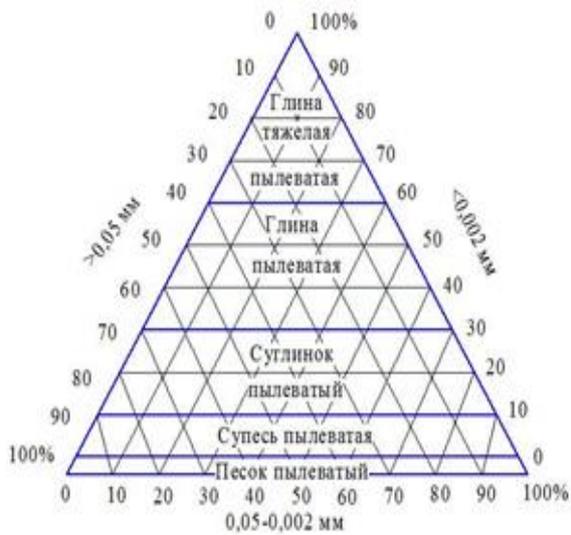


Рис. 1. Определение вида грунта:

- a) схема В.В. Охотина;  
 б) ступка с испытуемым грунтом  
 Fig. 1. Determination of the type of soil:  
 a) scheme V.V.Okhotin; b) mortar with test soil

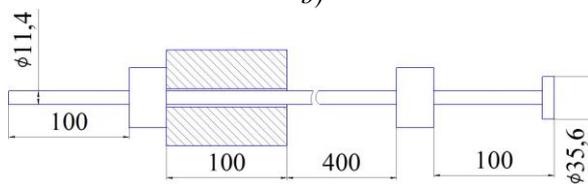


Рис. 2. Ударник ДорНИИ  
 Fig. 2. Densitometer DorNII

проводились со штампами, кромки у которых имели различную форму и углы заточки. Эксперимент заключался в установке пластины на тележку и обсыпание ее окрашенным зеленой грунтом. Далее пластину на тележке протаскивали лебедкой в плотный неокрашенный грунт естественного залегания. Через каждый 1-2 м проводили измерение окрашенного плотного ядра перед кромкой путем послыной горизонтального снятия грунта [2,3].

Из исследований, представленных выше, можно отметить, что все они проводились в статическом режиме непосредственно при остановке штампа.

Для исключения погрешности статических измерений и для определения активных перемещаемых штампом масс грунта было решено провести динамические измерения.

В качестве грунта, в который будет вдавливать штамп, было решено взять наиболее трудный при разработке грунт, а именно тяжелую глину. Для подтверждения вида грунта требовалось провести соответствующие исследования. Грунт предварительно был просеян через сито с отверстиями размером 1мм и очищен от инородных включений. Вид грунта определялся просеиванием через сито с отверстиями размером 0,05мм. Предварительно образец грунта был высушен при температуре 60°C и размельчен в мраморной ступке пестиком. Далее на электронных весах с точностью до 0,01г взвешивался образец грунта перед просеиванием и после. В процессе просеивания было установлено, что количество частиц размером менее 0,05мм составляет более 70% частиц образца В.В. Охотина [4]. Таким образом, грунт был классифицирован как тяжелая глина (Рис. 1).

В процессе проведения эксперимента был исследован имеющийся грунт. Были определены такие параметры грунта, как плотность, влажность и категория разрабатываемости. Плотность грунта определялась методом режущих колец, описанном в ГОСТ 5180-2015. При снятии прозрачного окна 5 с короба 7 в испытуемый грунт вдавливалось режущее кольцо в 5 точках. Изъятые кольца с грунтом очищались от лишнего грунта таким образом, чтобы грунт оставался во внутреннем объеме кольца. Далее грунт во внутреннем объеме кольца взвешивался на электронных весах. Плотность грунта определялась по отношению массы грунта во внутреннем объеме кольца к его внутреннему объему. Среднее значение плотности экспериментального грунта составило 1974кг/м<sup>3</sup>.

Влажность  $w$  экспериментального грунта также определялась с учетом ГОСТ 5180-2015 по формуле (1)

$$w = 100 \frac{m_1 - m_0}{m_0} \quad (1)$$

где  $m_1$  – масса влажного грунта, кг;  $m_0$  – масса грунта после просушивания, кг. В итоге влажность грунта составила приблизительно 17% [4].

Категория разрабатываемости грунта определялась с применением ударника ДорНИИ, представленного на рисунке 2.

Принцип работы ударника ДорНИИ состоит в сбрасывании гири весом 2,5 кг с высоты 0,4 м на буртик. Количество сбрасываний продолжается, пока наконечник ударника не внедрится в исследуемый грунт на 0,1 м. Чем больше количество ударов С ударником, тем труднее разрабатывается грунт. Классификация мерзлых грунтов по числу ударов С приведена в таблице 1 [2,5].

Ударник ДорНИИ устанавливался в пяти точках исследуемого грунта. Количество ударов в каждой

Таблица. Категории грунта в зависимости от числа ударов ударника ДорНИИ  
 Table. Soil categories depending on the number of strikes of the DorNII densitometer.

| Категория грунта | I   | II  | III  | IV    |
|------------------|-----|-----|------|-------|
| Число ударов С   | 1-4 | 5-8 | 9-16 | 16-34 |

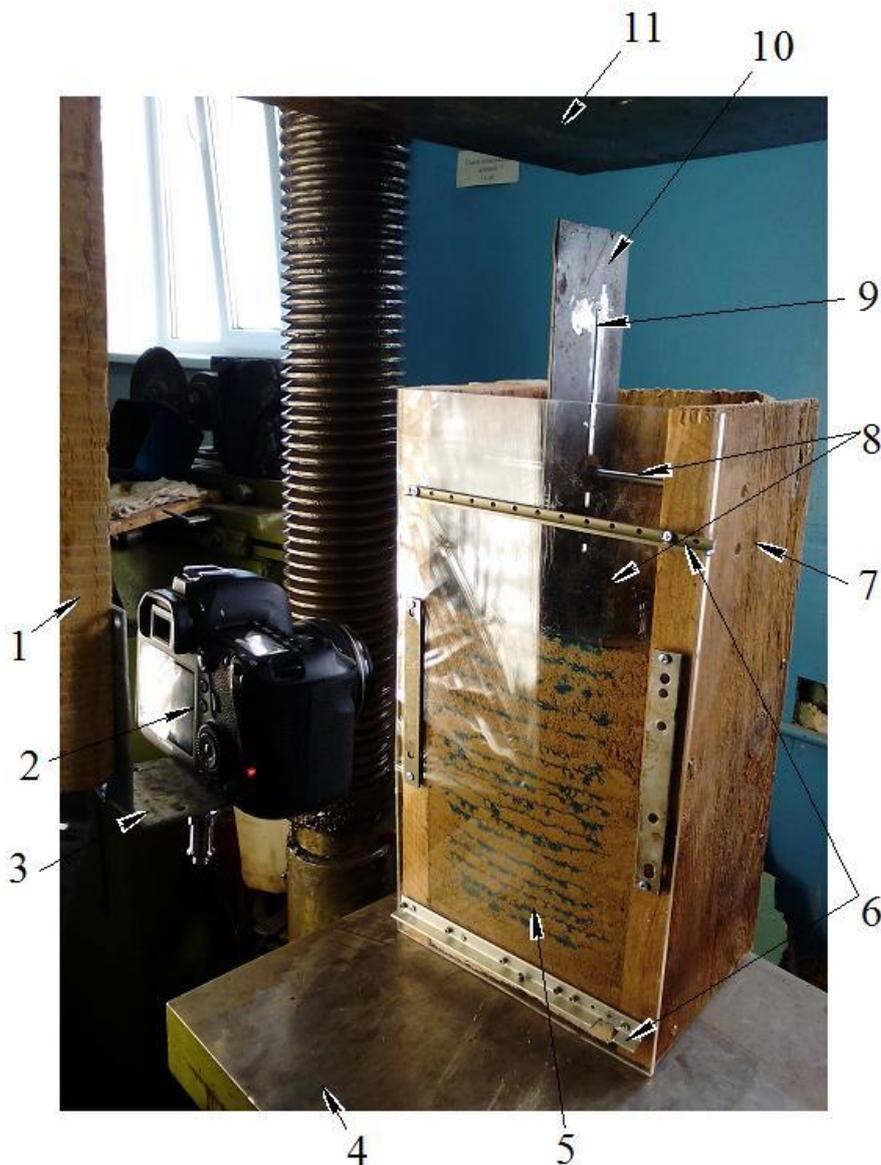


Рис. 3. Экспериментальный стенд  
 Fig. 3. Experimental stand

точке составило 2. Таким образом, экспериментальный грунт относится к I категории.

Экспериментальный стенд включает в себя: 1 – штатив; 2 – фотоаппарат Canon EOS 6D; 3 – кронштейн; 4 – нижняя плита пресса; 5 – прозрачное окно; 6 – рейки; 7 – короб; 8 – штыри; 9 – паз пластины; 10 – пластина; 11 – верхняя плита пресса.

Для наблюдения за изменением перемещаемых штампом объемов грунта было решено собрать экспериментальный стенд, представленный на рисунке 3.

Грунт засыпался в короб 7, за его перемещением можно было наблюдать через прозрачное окно 5. Короб 7 был собран из доски толщиной 0,03 м и шириной 0,2 м. Высота короба составляла 0,5 м. В качестве материала прозрачного окна 5 было выбрано органическое стекло, так как в отличие от силикатного оно обладает большей прочностью и технологичностью. Для исключения деформации оргстекла в процессе засыпания грунта в короб было решено укрепить оргстекло металлическими рейками 6. В качестве вдавливаемого штампа была использована стальная пластина 10 толщиной 0,002 м, высотой 0,28 м и шириной 0,09 м. Далее стояла более сложная задача, а именно как задать нужную траекторию движения пластины 10 при вдавливании ее в грунт. Для наблюдения процесса перемещения объемов грунта пластину (штамп) следует перемещать боковой кромкой пластины 10 вдоль окна 5. Визуальное наблюдение процесса возможно при расположении боковой кромки пластины 10 в непосредственной близости от окна 5. При перемещении пластины 10 не должна врезаться в окно 5 и отдаляться от него на расстояние, не позволяющее визуально наблюдать процесс. Для задания ровной траектории движения в пластине был вырезан сквозной паз 9 шириной 8 мм с параллельным расположением относительно боковой кромки пластины 10. Ровно нарезать паз удалось на фрезерном станке концевой фрезой 8 мм при фиксации пластины на столе. В паз пластины были вставлены штыри 8 диаметром менее 8 мм, которые далее были закреплены в боковых стенках короба 7. Предварительно на штырях 8 была нарезана резьба для крепления их гайками и шайбами в коробе. Таким образом, пластина перемещалась по штырям вдоль окна, не отдаляясь от него и не разрушая. Для исключения случайных продольных перемещений пластины на штырях 8 с боков были вкручены гайки с шайбами. В дальнейшем для

пластины были вставлены штыри 8 диаметром менее 8 мм, которые далее были закреплены в боковых стенках короба 7. Предварительно на штырях 8 была нарезана резьба для крепления их гайками и шайбами в коробе. Таким образом, пластина перемещалась по штырям вдоль окна, не отдаляясь от него и не разрушая. Для исключения случайных продольных перемещений пластины на штырях 8 с боков были вкручены гайки с шайбами. В дальнейшем для

исследования процесса внедрения пластины 10 стояла задача зафиксировать результат. По предположению перемещаемые пластиной массы грунта должны составлять считанные миллиметры, а то и доли миллиметров, если говорить о боковых массах. В связи с этим обычная съемка для фиксации результата не подойдет, требуется профессиональная макросъемка области в 2-3см. Для решения этой проблемы было решено использовать профессиональный цифровой зеркальный фотоаппарат Canon EOS 6D. Для вдавливания пластины в грунт использовался гидравлический пресс 2ПГ-125, на нижнюю плиту 4 пресса был установлен короб 7 с грунтом. Вдавливание пластины 10 проводилось верхней плитой 11. Для одновременного перемещения фотоаппарата 2 с плитой 11 и пластиной 10 требовалось изготовить штатив. Штатив 1 был изготовлен из квадратных брусков толщиной 50мм и пластины с отверстиями 7мм для крепления фотоаппарата. Крепление штатива осуществлялось к верхней плите 11 пресса зажимами. Фотоаппарат был закреплен на кронштейн 3, который крепился винтами на бруске штатива 1.

Процесс подготовки к проведению эксперимента проходил следующим образом. Изначально эксперимент был охарактеризован как пассивный, так как в сам процесс проведения вмешательство не планировалось.

Грунт смешивался с водой в пропорции 7:1 для придания влажности около 15%. Осуществлялась засыпка влажного грунта в короб 7 и его последующее уплотнение. Для фиксирования масс перемещаемого грунта через прозрачное окно 5 также требовалось послойно окрасить грунт. После уплотнения каждого слоя грунт вблизи окна 5 был окрашен раствором зеленки. Далее была установлена пластина 10 на штырях 8, а штыри 8 были закреплены в коробе 7 гайками и шайбами от продольных перемещений. Короб 7 с пластиной 10 был установлен на нижнюю плиту 4 пресса. Рядом с коробом был закреплен штатив на верхней плите 11 пресса. Фотоаппарат 2 был зафиксирован в кронштейне 3, который был закреплен на бруске штатива 1 таким образом, чтобы в поле объектива попадал требуемый участок грунта и пластины. На место съемки был направлен свет от ламп. Фиксация участка внедрения пластины в грунт проводилась съемкой видео. По видеозаписи были определены перемещающиеся объемы грунта и их размеры в миллиметрах приведены на рисунке 4.

Как видно из рисунка 3, с боковой поверхностью пластины перемещаются объемы толщиной около 4мм. Данная толщина грунта будет вовлекаться в движение и препятствовать перемещению штампа независимо от его толщины. Далее от нижней кромки пластины перемещается масса под углом 15° на протяжении 11 мм, затем выравнивается на коротком промежутке около 3 мм, затем скругляется, радиус скругления составляет около 8 мм. Следует отметить, что объем перемещаемого грунта распространяется на 20 мм ниже кромки пластины [6,7,8,9].

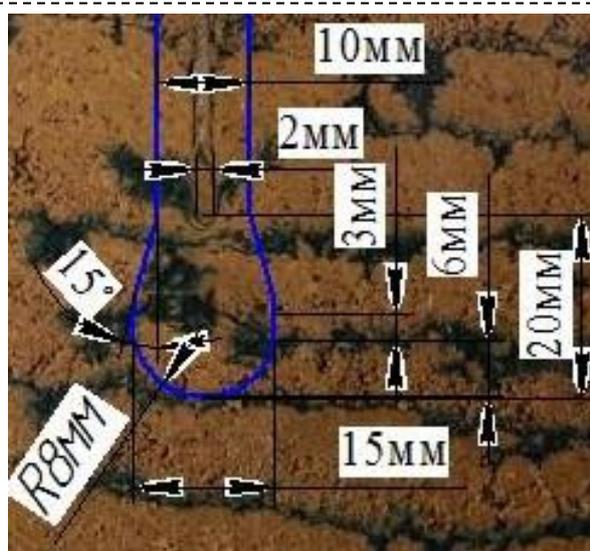


Рис. 4. Перемещающиеся объемы грунта вид сбоку

Fig. 4. Moving volumes soil side view

Таким образом, массу перемещаемого грунта со стальным штампом можно разделить на две части: боковую, которая выше режущей кромки и нижнюю, которая находится ниже кромки. Определим массу перемещаемого грунта по формуле (2)

$$m_{гр} = \rho \cdot (V_{бок} + V_{ниж}), \quad (2)$$

где  $V_{бок}$  – объем перемещаемого грунта с боку от пластины,  $m^3$ ;  $V_{ниж}$  – объем грунта ниже режущей кромки,  $m^3$ .

Так как объем перемещаемого грунта сбоку от пластины возникает за счет сил трения, примем ее как равноудаленную фигуру от боковой поверхности пластины. Боковую массу грунта можно разделить на: 2 призмы размерами 90 мм длиной, 4 мм толщиной и высотой заглубления, обозначим ее  $l$ ; 2 призмы размерами 2 мм длиной, 4 мм толщиной и высотой  $l$ ; цилиндр радиусом 4 мм, высотой  $l$  (рисунок 4а). Определим объем боковой поверхности по формуле (3)

$$V_{бок} = l \cdot (8 \cdot l_{ш} + 8 \cdot b_{ш} + 50,24), \quad (3)$$

где  $l_{ш}$  – длина штампа, мм;  $b_{ш}$  – толщина штампа, мм;  $l$  – высота заглубления, мм.

Нижний объем грунта условно разделим на: усеченную пирамиду высотой 11 мм, длиной 90 мм, с уклоном боковых сторон 15°; усеченный конус высотой 11 мм, с диаметром верхнего основания 10 мм, а нижнего 15 мм; призма высотой 3 мм, длиной 90 мм, шириной 15 мм; цилиндр диаметром 15 мм, высотой 3 мм; призма длиной 90 мм, основанием которой является сегмент круга диаметром 16 мм, толщиной 6 мм; сегмент шара диаметром 16 мм, толщиной 6 мм (рисунок 5а). После подстановки и преобразования определим объем нижней поверхности для штампа толщиной 2 мм по формуле (4)

$$V_{ниж} = 249,3 \cdot l_{ш} + 2575 \quad (4)$$

На основании формул (1), (2) и (3) и найденного значения плотности грунта была построена зависимость массы перемещаемого грунта от глубины

внедрения штампа толщиной 2 мм, длиной 90 мм (рисунок 5б).

Исходя из проведенных исследований, можно сделать вывод о том, что за счет сил трения с боковой поверхностью штампа перемещается глинистый грунт толщиной около 4мм. При этом грунт, перемещающийся вниз вместе со штампом, растягивался, о чем свидетельствуют образующиеся волокна. Исследования показали, что под кромкой толщиной 2 мм перемещается незначительная масса; уплотняясь до определенного значения и продвигаясь вниз, она выталкивает нижние слои грунта в бок. Сила на перемещение штампа при этом затрачивается на перемещение и растяжение бокового грунта и на сжатие грунта под режущей кромкой [10-15].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маслов Н.Н. Основы механики грунтов и инженерной геологии/ Маслов Н.Н. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Высшая Школа, 1968. – 629 с.
2. Зеленин А.Н. Машины для земляных работ / А.Н. Зеленин, В.И. Баловнев, И.П. Керов. – М.: Машиностроение, 1975. – 423 с.
3. Зеленин А.Н. Исследование разработки грунта гидравлическими экскаваторами/ Зеленин А.Н., Павлов В.П., Агароник М.Я., Королев А.В., Перлов А.С. // Строительные и дорожные машины. 1976. № 10. С. 9-11.
4. Трофимов В.Т. Грунтоведение/ Трофимов В.Т., Королев В.А., Вознесенский Е.А., Голодковская Г.А., Васильчук Ю.К., Зиангиров Р.С. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГУ, 2005. – 1024 с.
5. Баловнев, В.И. Моделирование процессов взаимодействия со средой рабочих органов дорожно-строительных машин / В.И. Баловнев. - М.: Высшая школа, 1981. – 335 с.
6. Кузнецов И.С. Теоретические исследования процесса взаимодействия реза фрезерного рабочего оборудования экскаватора с грунтом/ Кузнецов И.С. // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2021. Т. 18. №1 (77). С. 42-50.
7. Бурый Г.Г. Исследование сил сопротивления резанию на новой конструкции ковша гидравлического экскаватора / Бурый Г.Г., Потеряев И.К., Скобелев С.Б., Ковалевский В.Ф.// Горное оборудование и электромеханика. 2019. №2 (142). С. 46-51.
8. Ананин В.Г. Результаты экспериментальных исследований и моделирования рабочего оборудования одноковшового экскаватора/ Ананин В.Г. // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2013. № 1 (38). С. 205-213.
9. Тарасов В.Н., Коваленко М.В. Механика копания грунтов, основанная на теории предельных касательных напряжений/ Тарасов В.Н. // Строительные и дорожные машины. 2003. № 7. С.38-43.
10. Лукашук О.А. Закономерности формирования режимных параметров главных механизмов карьерного экскаватора в процессе экскавации горных пород/ Лукашук О.А. // Горное оборудование и электромеханика. 2019. №3 (143). С. 14-17.
11. Кузнецова В.Н. Обеспечение энергоэффективности разработки грунта за счет оптимизации углов позиционирования рабочего оборудования экскаватора/ Кузнецова В.Н., Савинкин В.В. // Строительные и дорожные машины. 2015. № 3. С. 44-47.
12. Зеньков С.А. Определение кинематических параметров ковша экскаватора/ Зеньков С.А., Минеев Д.А. // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. 2019. №3. С. 30-33.
13. Kujundžić T. Influence of crushed rock properties on the productivity of a hydraulic excavator/ Kujundžić T., Klanfar M., Korman T., Briševac Z.// Applied Sciences (Switzerland). 2021. Т. 11. №5. С. 1-15.
14. Choudhary B.S. Effect of blast induced rock fragmentation and muckpile angle on excavator performance in surface mines//Mining of Mineral Deposits. 2019. Т. 13. №3. С. 119-126.
15. Niskanen I. 4D modeling of soil surface during excavation using a solid-state 2D profilometer mounted on the arm of an excavator/ Niskanen I., Immonen M., Makkonen T., Tyni P., Hiltunen M., Kolli T., Heikkilä R., Keränen P., Hallman L., Kostamovaara J., Louhisalmi Y., 2020. Т. 112. С. 103-112.

DOI: 10.26730/1816-4528-2021-5-29-34

**Grigoriy G. Buriy**<sup>1</sup>, Ph. D. Of Technical Sciences, Associate Professor

<sup>1</sup>Siberian state automobile and highway university, prospect Mira, 5, Omsk, Russia, 644080

E-mail: buryy1989@bk.ru

## INVESTIGATION OF THE PROCESS OF PENETRATION INTO THE SOIL OF THE WORKING BODY OF A MINING MACHINE



Article info

#### Abstract.

*The study of the process of introducing the working bodies of construction and mining machines allows you to select their more rational operational and design parameters. Improving the designs of construction and road machines will increase their productivity, which is an urgent task. One of the*

Received:  
27 September 2021

Revised:  
20 October 2021

Accepted:  
26 October 2021

**Keywords:** mining machines,  
road machines, soil, stand, ex-  
perimental research

main parameters of a construction or road vehicle is the force of action of the working body on the ground, which depends on the forces of resistance of the soil. The purpose of the research is to clarify the volume of soil resisting the introduction of the working body. To achieve the goal by the method of photo and video recording, an experimental stand was assembled that allows you to visually observe the process of introducing the working body into the ground. The article describes the design of the experimental stand and the method of using it to achieve the goal. Also, the paper provides methods for studying the parameters of the experimental soil. As a result of the experimental studies, it was possible to identify the outlines of the volumes of soil involved in movement with the working body, thereby resisting its introduction. The results of the studies obtained can be applied in mathematical modeling of the processes of compaction, digging and cutting of soil by the working bodies of construction and road machines.

**For citation** Buriy G.G. Investigation of the process of penetration into the soil of the working body of a mining machine. Mining Equipment and Electromechanics, 2021, no.5 (157), pp. 29-34. DOI: 10.26730/1816-4528-2021-5-29-34

#### REFERENCES

1. Maslov N.N. Fundamentals of soil mechanics and engineering geology / Maslov N.N. – 2nd ed. revised and add. - M.: Higher School, 1968. – 629 p.
2. Zelenin A.N. Machines for earthworks / A.N. Zelenin and V.I. Balovnev, I.P. Kerov. – M.: Mashinostroenie, 1975. – 423 p.
3. Zelenin A.N. Investigation of soil development by hydraulic excavators / Zelenin A.N., Pavlov V.P., Agharonik M.Ya., Korolev A.V., Perlov A.S. // Construction and road machines. 1976. No. 10. Pp. 9-11.
4. Trofimov V.T. Soil science / Trofimov V.T., Korolev V.A., Voznesensky E.A., Golodkovskaya G.A., Vasilchuk Yu.K., Ziangirov R.S. – 6th ed., Rev. and add. - M.: Publishing house of Moscow State University, 2005. – 1024 p.
5. Balovnev, V.I. Modeling the processes of interaction with the environment of the working bodies of road-building machines / V.I. Balovnev. – M.: Higher school, 1981. – 335 p.
6. Kuznetsov I.S. Theoretical studies of the process of interaction of the cutter of the milling working equipment of an excavator with the ground / Kuznetsov I.S. // Bulletin of the Siberian State Automobile and Road University. 2021. T. 18. No.1 (77). S. 42-50.
7. Buriy G.G. Investigation of cutting resistance forces on a new design of a hydraulic excavator bucket / Buriy G.G., Poteryaev I.K., Skobelev S.B., Kovalevsky V.F. // Mining equipment and electromechanics. 2019. No. 2 (142). S. 46-51.
8. Ananin V.G. Results of experimental research and modeling of working equipment of a single-bucket excavator / Ananin V.G. // Bulletin of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering. 2013. No. 1 (38). S. 205-213.
9. Tarasov V.N., Kovalenko M.V. Soil digging mechanics based on the theory of limiting tangential stresses / Tarasov V.N. // Construction and road machines. 2003. No. 7. Pp.38-43.
10. Lukashuk O.A. Regularities of the formation of operating parameters of the main mechanisms of a quarry excavator in the process of excavation of rocks / Lukashuk O.A. // Mining equipment and electromechanics. 2019. No. 3 (143). S. 14-17.
11. Kuznetsova V.N. Ensuring energy efficiency of soil development by optimizing the positioning angles of the excavator working equipment / Kuznetsova V.N., Savinkin V.V. // Construction and road machines. 2015. No. 3. Pp. 44-47.
12. Zenkov S.A. Determination of the kinematic parameters of the excavator bucket / Zenkov S.A., Mineev D.A. // Transport, mining and construction engineering: science and production. 2019. No. 3. S. 30-33.
13. Kujundžić T. Influence of crushed rock properties on the productivity of a hydraulic excavator/ Kujundžić T., Klanfar M., Korman T., Briševac Z. // Applied Sciences (Switzerland). 2021. T. 11.No. 5. Pp. 1-15.
14. Choudhary B.S. Effect of blast induced rock fragmentation and muckpile angle on excavator performance in surface mines//Mining of Mineral Deposits. 2019. T. 13. No. 3. Pp. 119-126.
15. Niskanen I. 4D modeling of soil surface during excavation using a solid-state 2D profilometer mounted on the arm of an excavator/ Niskanen I., Immonen M., Makkonen T., Tyni P., Hiltunen M., Kolli T., Heikkilä R., Keränen P., Hallman L., Kostamovaara J., Louhisalmi Y. 2020. T. 112. Pp. 103-112.