

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ЗУБЬЕВ КОВША НА ЭНЕРГИЮ ЗАТРАЧИВАЕМУЮ ЭКСКАВАТОРОМ ПРИ РАБОТЕ ПО КРУПНОКУСКОВЫМ ГОРНЫМ ПОРОДАМ

Болобов В.И., Ахмеров Э.В., Ракитин И.В.

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург

Ключевые слова: зубья ковша экскаватора, абразивное изнашивание, усилия сопротивления породы экскавации, мощность экскаватора, ANSYS, Rocky DEM.

Аннотация. По результатам моделирования воздействия на зуб ковша экскаватора ЭКГ-5А потока предварительно взорванной скальной породы, проведенного с использованием программного обеспечения Rocky DEM и ANSYS, рассчитаны усилия сопротивления породы экскавации и требуемой экскаватором мощности для различной формы зубьев, принимаемой ими по мере абразивного изнашивания. Показано, что по мере изнашивания зубьев, сопровождаемого их укорочением, увеличением радиуса участка притупления их заостренной части, потерей симметричности и приобретением площадки изнашивания криволинейной формы, усилия, которые необходимо приложить для экскавации взорванной скальной породы, а так же мощность, которая требуется подъемным и напорным механизмам экскаватора, до 2-х могут превышать значения указанных показателей для экскаватора, снабженного исходными неизношенными зубьями.

THE INFLUENCE OF THE SHAPE OF THE BUCKET TEETH ON THE ENERGY EXPENDED BY THE EXCAVATOR WHEN WORKING ON LARGE-SIZED ROCKS

Bolobov V.I., Akhmerov E.V., Rakitin I.V.

Saint-Petersburg mining university, Saint-Petersburg

Abstract. Based on the results of simulation of the impact on the bucket tooth of the EKG-5A excavator of the flow of pre-exploded rock, carried out using the Rocky DEM and ANSYS software, the forces of rock resistance to excavation and the power required by the excavator for various tooth shapes taken by them as abrasive wear were calculated. It is shown that as the teeth wear, accompanied by their shortening, an increase in the radius of the blunting area of their pointed part, the loss of symmetry and the acquisition of a curvilinear wear area, the forces that must be applied to excavate the blasted rock, as well as the power that is required for lifting and pressure excavator mechanisms, up to 2 may exceed the values of the indicated indicators for an excavator equipped with original unworn teeth.

Keywords: excavator bucket teeth, abrasive wear, excavation rock resistance forces, excavator power, ANSYS, Rocky DEM.

Введение

При работе ковшей экскаваторов по абразивным породам имеет место изменение формы их зубьев, вследствие интенсивного изнашивания. Это негативно сказывается на усилиях, прилагаемом машиной для внедрения ковша в породу, что необходимо учитывать при установлении мощности, потребляемой экскаватором. В то же время, как показывает анализ существующих способов расчёта сопротивления горных пород их экскавации, эти способы, в своем большинстве, не учитывают указанное изменение формы зубьев, а те, которые учитывают, например [1-4], разработаны для резания грунтов, торфа и некоторых сыпучих материалов, оставляя без внимания кусковые скальные породы. При этом они, описывают возникающие в процессе работы экскаватора сопротивления при помощи формул, имеющих, как правило, эмпирический характер, что затрудняет их использование для расчета усилий резания других пород. В настоящей работе, на примере работы экскаватора ЭКГ-5А, предлагается метод расчета сопротивления экскавации предварительно взорванной крупнокусковой горной породы с учетом изменения формы зуба в процессе работы, а также влияния формы зуба на потребляемую экскаватором мощность.

Анализ сил, действующих на изношенный зуб, и предлагаемый метод их расчета

Как показывает осмотр зубьев ковшей экскаваторов после их работы по кусковым

скальным породам результатом изнашивания является укорочение зубьев и увеличение радиуса участка притупления $r_{пр}$ их заостренной части. При этом, вследствие разницы в интенсивности изнашивания нижней и верхней граней, зуб теряет симметричность и приобретает площадку изнашивания криволинейной формы, расположенную под отрицательным углом к преобладающей траектории резания (рис. 1). Помимо этого, происходит увеличение углов заострения ϵ и резания δ зуба (рис. 2).



Рис. 1. Вид оконечности зуба ковша экскаватора ЭКГ-5А после работы по взорванному граниту

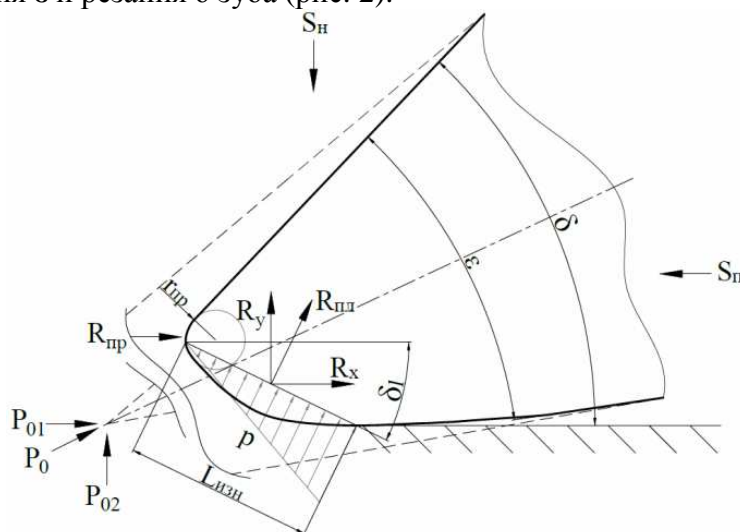


Рис. 2. Схема приложения сил, действующих на зуб в процессе его продвижения в породе [4]

Принято считать [5], что полное расчётное усилие сопротивления породы P_0 экскавации на ковше складывается из усилия P_{01} сопротивления породы перемещению, касательного к траектории движения зуба, и нормальной составляющей $P_0 - P_{02}$, представляющей собой усилие отпора (рисунок 2). При этом величина P_{01} складывается:

- из сопротивления внедрению в породу передней грани зуба, на которую, как правило, приходится наибольшая часть силы экскавации [2-3];
- силы сопротивления трению зуба о породу;
- силы сопротивления трению ковша о породу.

Исходя из геометрии изношенного зуба (рис. 1), можно заключить, что при движении в породе ему противодействуют еще 2 дополнительные силы (рис. 2):

а) реакция породы $R_{пл}$ на давление, оказываемое на нее площадкой изнашивания, действующая под углом к траектории движения зуба и раскладывающаяся на две составляющие R_x и R_y , каждая из которых сонаправлена с главными силами сопротивления экскавации P_{01} и P_{02} . Для уравнивания реакции $R_{пл}$ с целью удержания зубьев на необходимой глубине требуется увеличение напорных S_n и подъёмных S_p усилий экскаватора;

б) сила сопротивления породы движению притупленной режущей кромки (участку притупления) $R_{пр}$, в большей степени, влияющая на касательную составляющую P_{01} силы сопротивления.

Поскольку в литературе не удалось найти формул для расчета указанных сил $R_{пл}$, R_x , R_y , $R_{пр}$, для их получения, на примере зуба ковша экскаватора ЭКГ-5А, было проведено компьютерное моделирование процесса внедрения во взорванную скальную породу зуба, подвергнутого различной степени изнашивания и обладающего формой, соответствующей его виду после экскавации различного объема породы. Для анализа была использована экспериментально установленная в [6] зависимость профиля зуба ковша экскаватора ЭКГ-5А от количества добытой массы неокисленных железистых кварцитов (рис. 3).

Для моделирования процесса взаимодействия изношенного зуба с массивом крупнокусковой горной породы использовалась программная среда Rocky DEM (рис. 4) с описанием движения абразивных фрагментов в виде сферических элементов при помощи метода дискретных элементов.

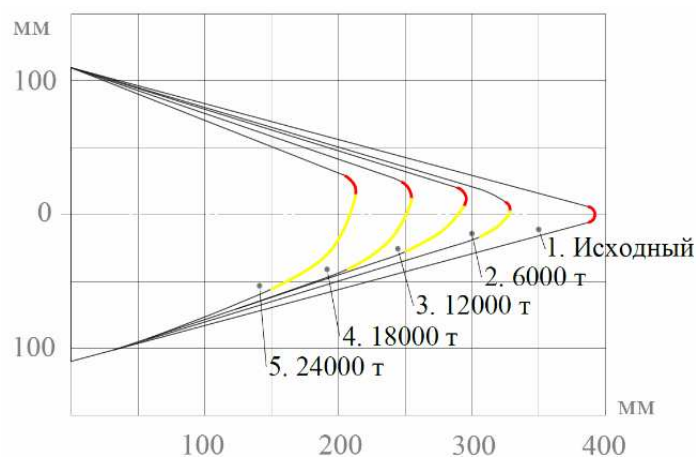


Рис. 3. Изменение геометрии острия зубьев ковша экскаватора (от 1 к 5) по мере экскавации различной массы скальной породы [3]

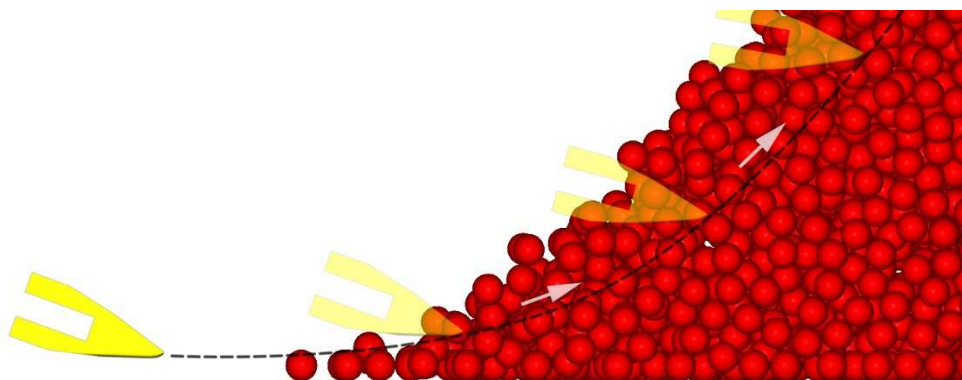


Рис. 4. Схема моделирования движения зуба через массив взорванной породы

Учет специфики экскавируемой породы осуществлялся принятием в расчетах диаметра (0,25 м) и плотности ($2 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$) сферических элементов равным, имеющим место для продуктов взрыва скальных пород. Для настройки параметров движения зуба в программе использовались технические данные скоростей подъема (0,87 м/с) и напора (0,95 м/с) ковша, а также наибольшие величины радиуса и высоты черпания экскаватора ЭКГ-5А.

Обработка полученных результатов осуществлялась в программном комплексе ANSYS с анализом распределения давления среды по поверхности изношенного зуба каждой конфигурации (рис. 5). На основании полученных данных, с целью оценки наиболее подверженных изнашиванию частей, для каждой расчетной точки поверхности (всего их ~6500) математической модели проводился расчет усредненного показателя напряженного состояния (для 150 временных позиций) в течение цикла экскавации.

Из рисунка 5 видно, что наибольшее давление на поверхность зуба приходится на место его притупления и появляющуюся площадку изнашивания. При этом, по площади каждой из указанных зон значения давления для каждого зуба распределены примерно равномерно. Это обстоятельство позволило предположить, что искомые составляющие сопротивления $R_{пл}$, R_x , R_y , $R_{пр}$ можно установить, исходя из усредненной величины давления p каждой из указанных зон, с использованием формул (1-3):

$$R_x = \sin \delta_1 \cdot R_{пл} = \sin \delta_1 \cdot p \cdot F_{пл}; \quad (1)$$

$$R_y = \cos \delta_1 \cdot R_{пл} = \cos \delta_1 \cdot p \cdot F_{пл}; \quad (2)$$

$$R_{пр} = p \cdot F_{пр}; \quad (3)$$

где $F_{пл}$ – площадь площадки изнашивания, м^2 ; $F_{пр}$ – площадь участка притупления, как функция от $r_{пр}$, м^2 , δ_1 – угол наклона площадки изнашивания относительно траектории движения зуба, град.

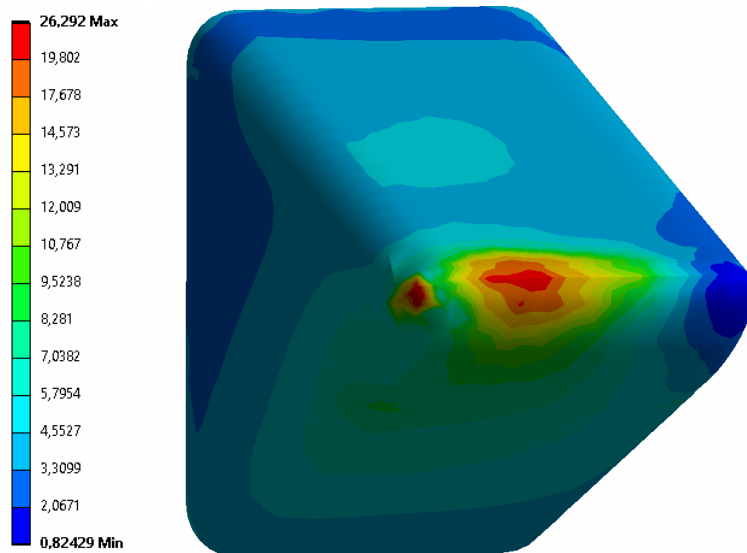


Рис. 5. Распределение усредненных значений напряжений (МПа) по поверхности изношенного зуба в течение цикла экскавации

Оценка влияния изменения формы зуба в процессе эксплуатации на потребляемую экскаватором энергию

Мощность, которой должен обладать карьерный экскаватор, определяется требуемой мощностью двигателей подъёмного (N_n) и напорного (N_H) его механизма [7], каждая из которых может быть рассчитана по формулам (4-5):

$$N_n = \frac{S_n \cdot V_n}{1000 \cdot \eta_{пп} \cdot \eta_n}; \quad (4)$$

$$N_H = \frac{S_H \cdot V_H}{1000 \cdot \eta_H}; \quad (5)$$

где S_n – усилия в подъёмном канате при экскавации породы, н; S_H – напорное усилие, реализуемое на рукояти ковша, Н; V_n – скорость подъёма ковша, м/с; V_H – скорость напора ковша, м/с; $\eta_{пп}$ – КПД полиспастной системы ковша и барабанов лебёдки; η_n – КПД редуктора подъёмной лебёдки; η_H – КПД редуктора напора.

Усилия S_n , влияющие на нагрузку двигателя механизма подъёма, определяются из уравнения моментов, учитывающего действие составляющих всех сил сопротивления породы экскавации, веса ковша с породой $G_{к+г}$ и веса рукояти G_p относительно оси напорного вала. Активное напорное усилие S_H , реализуемое на рукояти ковша, должно при движении ковша преодолевать нормальную реакцию породы. В данном случае необходимо учитывать, что реакция породы раскладывается на два составляющих вектора (R_x и R_y), каждый из которых сонаправлен с главными силами сопротивления экскавации (P_{01} и P_{02}). Усилия рабочих механизмов при работе изношенными зубьями с порядковыми номерами i можно представить в виде (6-7):

$$S_{n(i)} = \frac{1}{l_n} \cdot (P_{01(i)} \cdot l_0 + G_{к+г} \cdot l_{к+г} \cdot g + G_p \cdot l_p \cdot g); \quad (6)$$

$$S_{H(i)} = P_{02(i)} + R_y = A \cdot P_{01(i)} + R_y; \quad (7)$$

$$P_{01(i)} = P_{01(i-1)} + R_{pp} + R_x; \quad P_{01(0)} = K_s \cdot t_{max} \cdot a; \quad (8)$$

где l_n , l_0 , $l_{к+г}$, l_p – плечи действия сил, м; A – коэффициент, зависящий от удельного сопротивления породы копанию, для хорошо взорванных скальных пород $A = 0,65$; K_s – коэффициент удельного сопротивления копанию, МПа; t_{max} – номинальная глубина внедрения зуба, м; i – порядковый номер зуба на рисунке 3.

Подстановка рассчитанных (1-3) по результатам моделирования значений дополнительных сопротивлений (R_x , R_y , R_{pp}) в формулу (6-7) позволяет определить

увеличение мощности по формулам (4-5) в зависимости от возрастания площадки изнашивания и радиуса притупления.

Искомая зависимость устанавливалась при номинальной глубине внедрения ковша экскаватора $t_{\max} = 0,29$ м, коэффициентах A и K_s , как для хорошо взорванных скальных пород, равных $A = 0,65$ и $K_s = 0,25$ МПа [5]. Полученные результаты отражены в таблице 1 и на рисунке 6.

Табл. 1. Сопротивления внедрению зуба ковша экскаватора ЭКГ-5А в скальную породу и потребляемая экскаватором мощность для каждой i -той формы зуба (от 1 до 5), представленной на рисунке 3

i	δ_l	$R_{пл}, Н$	$R_{пр}, Н$	$P_{01}, Н$	$P_{02}, Н$	$S_{п}, Н$	$S_{н}, Н$	$N_{п}, кВт$	$N_{н}, кВт$
1	-	-	19816	142747	92786	327269	92786	99	33
2	27	15873	21587	171540	125644	365950	125644	111	45
3	29	19999	23796	205032	150762	410942	150762	124	54
4	31	21109	25602	241506	175073	459941	175073	139	62
5	37	29199	36372	295450	215362	532409	215362	161	77

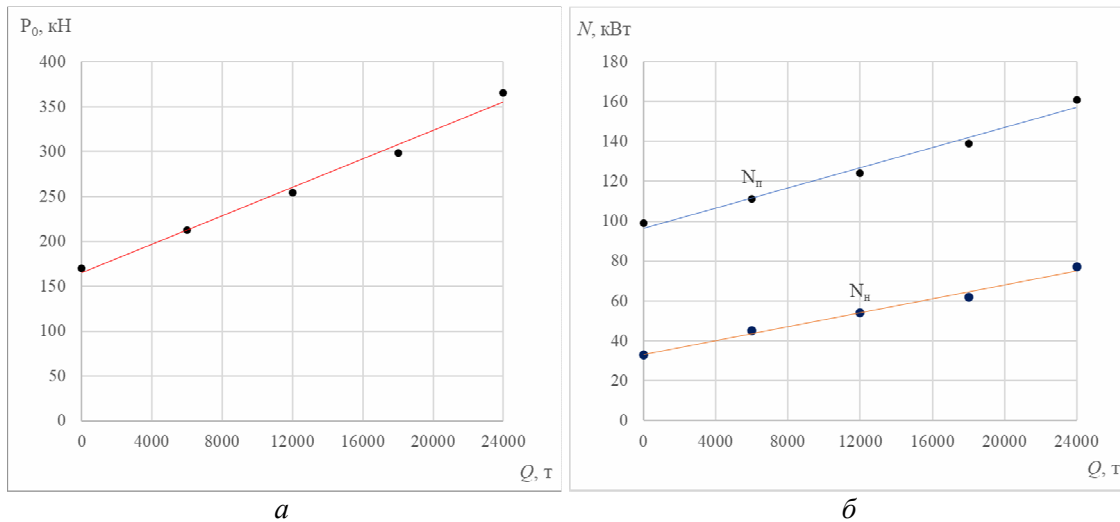


Рис. 6. Изменения усилия сопротивления породы P_0 экскавации (а) и необходимой для двигателей рабочих механизмов мощности (б) по мере увеличения массы породы, экскавируемой экскаватором

Вывод

Как видно из результатов расчета (табл. 1, рис. 6), усилия в подъемном канате $S_{п}$ и реализуемые на рукояти ковша $S_{н}$, которые необходимо приложить для экскавации взорванной скальной породы, а также результирующее усилие сопротивления породы P_0 экскавации, возрастают по мере изменения формы зубьев в результате изнашивания и до 2-ух и более раз могут превышать значения аналогичных показателей для экскаватора, работающего с неизношенными зубьями. Такие цифры соответствуют опытным наблюдениям [5], в которых указанное увеличение усилий оценено в 1,5-2 раза.

При переходе от исходного зуба (поз. 1, рис. 3) к максимально изношенному (поз. 5, рис. 3) в 1,5-2 раза увеличивается и мощность, требуемая для подъемного и напорного механизма экскаватора, что повлечет за собой существенное повышение потребляемой энергии.

Вследствие этого можно заключить, что сопротивление кусков породы воздействию притупленной режущей кромки зуба и появляющейся на зубе площадки изнашивания может составить не только соизмеримую, но и преобладающую часть силы сопротивления породы всему зубу. Следовательно, меры, направленные на длительное сохранение первоначального профиля зуба [8-13], например, создание условий для его самозатачивания в процессе работы экскаватора [14-17], позволят существенно снизить усилия, прилагаемые экскаватором для экскавации кусковых скальных пород, а также положительно сказаться на общей производительности горнодобывающего предприятия [18-20].

Список литературы

1. Ветров Ю.А. Резание грунтов землеройными машинами – М.: Машиностроение, 1971. – 357 с.
2. Домбровский Н.Г., Панкратов С.А. Землеройные машины – М.: Госстройиздат, 1961. – 652 с.
3. Домбровский Н.Г., Гальперин М.И. Строительные машины. Ч II. – М.: Высш. шк., 1985. – 224 с.
4. Громыка Д.С., Утенкова Т.Г., Короткова О.Ю. Обзор методов оценки механизмов изнашивания исполнительных органов горных машин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – №2. – С. 75-86. – DOI: 10.25018/0236-14932021-2-0-75-86.
5. Подерни Р.Ю. Горные машины и комплексы для открытых работ: Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1985. – 544с.
6. Макушенко А.В. Разработка наплавочного сплава и технологии упрочнения зубьев ковшей карьерных экскаваторов: дисс. ... канд. тех. наук: 05.16.01 / Макушенко Антон Владимирович. – Курск, 2008. – 132 с.
7. Хмызников К.П., Лыков Ю.В. Механическое оборудование карьеров. Одноковшовые экскаваторы: Учебное пособие. – СПб.: Санкт-Петербургский гос. горный ин-т им. Г.В. Плеханова (технический ун-т), 2007. – 41 с.
8. Махмутов Р.Г., Новиков В.И., Вильданов Б.Р. Повышение стойкости зубьев ковшей экскаватора ЭКГ-5 // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. – 2011. – Т. 1, №69. – С. 67-68.
9. Ефимов И.А., Юмаев Р.Г. Повышение срока службы зубьев ковша экскаваторов // Записки Горного Института. – 1981. – Т. 87. – С. 69-72.
10. Талеров М.П. Зависимость износостойкости корпуса резцов горного инструмента от распределения твердости по длине резца // Записки Горного Института. – 2010. – Т. 186. – С. 140-142.
11. Насонов М.Ю., Лыков Ю.В., До Дык Чонг. Исследование ресурса и долговечности металлических конструкций экскаваторов после истечения срока эксплуатации // Уголь. – 2020. – №2. – С. 13-17.
12. Болобов В.И., Баталов А.П., Бочков В.С., Чупин С.А. Износостойкость стали 110Г13Л в различных абразивных средах // Записки Горного Института. – 2014. – Т. 209. – С. 17-22.
13. Дэлэг Д., Ванчинжав С., Пурэвдорж Н. Исследование самозатачивания зуба ковша экскаватора // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2008. – №S1. – С. 402-416.
14. Патент № 39148 РФ. Зуб ковша экскаватора / Р.Р. Гарифулин. – Заявка №2004105727/22 от 01.03.2004; опубл. 20.07.2004, Бюл. № 20.
15. Патент №6810 РФ. Зуб ковша экскаватора / Л.С. Белобородов, Е.А. Еремеев, Г.И. Малин, В.М. Поздеев. – Заявка №97106394/20 от 16.04.1997; опубл. 16.06.1998.
16. Патент №2048255 РФ. Способ отливки зубьев экскаватора / Н.Ю. Аптекарь, Э.С. Белокуров, В.Ф. Поляков, Г.М. Воробьев, Б.А. Кустов, Р.С. Айзатулов, С.И. Морозов, В.А. Буймов, В.И. Чичков, Ю.И. Киселев. – Заявка №5066434/02 от 10.08.1992; опубл. 20.11.1995.
17. Патент № 2269628 РФ. Зуб ковша экскаватора и способ его изготовления / В.Ф. Балашов, Г.В. Каджая, О.Г. Каджая. – Заявка №2003134867/03 от 01.12.2003; опубл. 10.02.2006, Бюл. №4.
18. Иванов С.Л., Иванова П.В., Кувшинкин С.Ю. Оценка наработки карьерных экскаваторов перспективного модельного ряда в реальных условиях эксплуатации // Записки Горного института. – 2020. – Т. 242. – С. 228-233. – doi.org/10.31897/pmi.2020.2.228.
19. Иванов С.Л. Изменение наработки современных отечественных экскаваторов ЭКГ от условий их функционирования // Записки Горного института. – 2016. – Т. 221. – С. 692-700. – doi.org/10.18454/pmi.2016.5.692.
20. Шибанов Д.А., Иванов С.Л., Емельянов А.А., Пумпур Е.В. Оценка показателей работоспособности карьерных экскаваторов в реальных условиях эксплуатации // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – №10. – С. 86-94. – DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10-0-86-94.

References

1. Vetrov Ju.A. Soil cutting with earthmoving machines. – M.: Mechanical Engineering, 1971. – 357 p.
2. Dombrovskij N.G., Pankratov S.A. Earthmoving machines. – M.: Gosstrojizdat, 1961. – 652 p.
3. Dombrovskij N.G., Gal'perin M.I. Construction machines. Part II. – M.: High school, 1985. – 224 p.
4. Gromyka D. S., Utenkova T. G., Korotkova O. Yu. Estimation methods of wear mechanisms in cutting heads of mining machines: Review // Mining information and analytical bulletin. 2021, no. 2, pp. 75-86. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-2-0-75-86.
5. Poderni R.Yu. Mining machines and complexes for open works. – M.: Nedra, 1985. – 544 p.
6. Makushenko A.V. Development of a hardfacing alloy and technology for hardening the teeth of pit excavator buckets: Diss. ... cand. tech. sc.: 05.16.01. – Kursk, 2008. – 132 p.
7. Khmyznikov K.P., Lykov Yu.V. Quarry mechanical equipment. Single-bucket excavators: Textbook. – SPb.: Saint-Petersburg State Mining Institute n.a. G.V. Plekhanov, 2007. – 41 p.
8. Makhmutov R.G., Novikov V.I., Vildanov B.R. Increasing the durability of the teeth of the buckets of the EKG-5 excavator // Actual problems of modern science, technology and education. 2011, vol. 1, no. 69, pp. 67-68.
9. Efimov I.A., Yumaev R.G. Extending excavator bucket teeth life // Journal of Mining Institute. 1981, vol. 87, pp. 69-72.
10. Talerov M.P. The dependence of the wear resistance of the body of the cutters of mining tools on the distribution of hardness along the length of the cutter // Journal of Mining Institute. 2010, vol. 186, pp. 140-142.

11. Nasonov M.Yu., Lykov Yu.V., Trong D.D. Study of the resource and durability of metal structures of excavators after the expiration of the service life // Ugol. 2020, no. 2, pp. 13-17. DOI: 10.18796/0041-5790-2020-2-13-17.
12. Bolobov V.I., Batalov A.P., Bochkov V.S., Chupin S.A. Wear resistance of steel 110G13L in various abrasive media // Journal of Mining Institute. 2014, vol. 209, pp. 17-22.
13. Deleg D., Vanchinzhav S., Purevdorzh N. Study of self-sharpening of an excavator bucket tooth // Mining Informational and Analytical Bulletin. 2008, no. S1, pp. 402-416.
14. Patent No. 39148 RU. Excavator bucket tooth / R.R. Garifullin. – Application No. 2004105727/22 dated 01.03.2004; publ. 20.07.2004, Bul. No. 20.
15. Patent No. 6810 RU. Excavator bucket tooth / L.S. Beloborodov, E.A. Eremeev, G.I. Malin, V.M. Pozdeev. – Appl. No. 97106394/20 from 16.04.1997; publ. 16.06.1998.
16. Patent No. 2048255 RU. Method of casting excavator teeth / N.Yu. Aptekar, E.S. Belokurov, V.F. Polyakov, G.M. Vorobyev, B.A. Kustov, R.S. Aizatulov, S.I. Morozov, V.A. Buymov, V.I. Chichkov, Yu.I. Kiselev. – Appl. No. 5066434/02 from 10.08.1992; publ. 20.11.1995.
17. Patent No. 2269628 RU. Excavator bucket tooth and method of its manufacture / V.F. Balashov, G.V. Kajaya, O.G. Kajaya. – Appl. No. 2003134867/03 from 01.12.2003; publ. 10.02.2006, Bul. No. 4.
18. Ivanov S.L., Ivanova P.V., Kuvshinkin S.Yu. Promising model range career excavators operating time assessment in real operating conditions // Journal of Mining Institute. 2020, vol. 242, pp. 228-233. DOI: 10.31897/pmi.2020.2.228.
19. Ivanov S.L. Changes in operating time of modern domestic EKG excavators in dependence of their functioning conditions // Journal of Mining Institute. 2016, vol. 221, pp. 692-700. doi.org/10.18454/pmi.2016.5.692.
20. Shibanov D.A., Ivanov S.L., Yemelyanov A.A., Pumpur E.V. Evaluation of working efficiency of open pit shovels in real operating conditions // Mining information and analytical bulletin. 2020, no. 10, pp. 86-94. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10-0-86-94.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Болобов Виктор Иванович – доктор технических наук, профессор	Bolobov Viktor Ivanovich – doctor of technical sciences, professor
Ахмеров Эрик Викторович – аспирант	Akhmerov Erik Viktorovich – postgraduate student
Ракитин Илья Витальевич – студент	Rakitin Il'ya Vital'evich – student
s195040@stud.spmi.ru	

Получена 29.11.2022