

ГОРНЫЕ МАШИНЫ MINING MACHINES

Научная статья

УДК 622.23, 629.051

DOI: 10.26730/1816-4528-2022-5-3-7

Либерман Яков Львович^{1,*}, Летнев Константин Юрьевич¹, Горбунова Любовь Николаевна²

¹Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина

²Сибирский федеральный университет

*E-mail: Yakov_Liberman@List.ru

ОБ ОПТИМАЛЬНОМ УПРАВЛЕНИИ УДАРНИКАМИ ЭКСКАВАТОРНОГО КОВША АКТИВНОГО ДЕЙСТВИЯ



Информация о статье

Поступила:

08 сентября 2021 г.

Одобрена после

рецензирования:

01 октября 2022 г.

Принята к печати:

04 октября 2022 г.

Ключевые слова:

экскаватор, ковши активного действия, ударник, грунт, энергозатраты, управление.

Аннотация.

Эффективным и наиболее широко применяемым типом землеройных машин, используемых для открытой разработки месторождений, являются экскаваторы, основным подвижным элементом которых являются ковши активного действия. Ковши активного действия эффективнее использовать для разработки крепких трещиноватых горных и им подобных пород, имеющих прочность порядка 80 МПа. Наряду со своей основной функцией – резания грунта с отделением стружки, подъема и отвала ее – ковши активного действия облегчают эту функцию – размягчают грунт, его рыхление и дробление. Снабжение ковшей специальными конструктивными элементами – ударниками усложняет их конструкцию, однако при правильном их применении позволяет уменьшить потребную силу тяги, прилагаемую рукоятью экскаватора к ковшу, что сокращает затраты энергии на работу соответствующих приводов экскаватора. Ковши активного действия являются потребителями энергии и включают несколько устройств, состоящих из энергетического блока, блока управления рабочим циклом, инструмента, делителя потока, а также источника питания базовой машины – экскаватора. В статье рассмотрена задача минимизации потребления энергии ковшей активного действия путем оптимального управления режимами их работы при разработке грунтов.

Для цитирования: Либерман Я.Л., Летнев К.Ю., Горбунова Л.Н. Об оптимальном управлении ударниками экскаваторного ковша активного действия // Горное оборудование и электромеханика. 2022. № 5 (163). С. 3-7. DOI: 10.26730/1816-4528-2022-5-3-7

Введение. В последние десятилетия при разработке мерзлых и иных твердых грунтов и пород все чаще используются экскаваторы с ковшами активного действия [1–3]. Первые работы в нашей стране по проектированию и созданию таких ковшей были проведены в 1950-е годы Всесоюзным научно-исследовательским институтом организации и механизации строительства и НИИ-200 Министерства строительства под общим руководством доктора технических наук, профессора А. И. Зеленина.

Производственный опыт показывает, что подобные ковши предназначены для разработки грунтов средней прочности, а для разработки крепких трещиноватых горных и им подобных пород, имеющих прочность порядка 80 МПа, эффективнее

использовать ковши активного действия, оснащенные ударниками разного типа (пневматические, гидравлические, магнитоэстрикционные и др.).

Указанные ковши помимо своей основной функции – резания грунта, пород с отделением стружки, подъема и отвала последней – реализуют еще и дополнительные функции, облегчающие выполнение основной: размягчение грунта, пород, рыхление или дробление. Для осуществления дополнительных функций ковши снабжаются специальными конструктивными элементами, и, разумеется, усложняются, однако это расширяет их технологические возможности, увеличивает долговечность и при грамотном их применении (своевременное техническое обслуживание, качественная

работа машиниста экскаватора и др.) повышает производительность экскаватора.

Процесс разработки твердых и мерзлых грунтов, пород экскаваторами, как известно, сопровождается значительными энергозатратами [4–7] в результате разгона стрелы, рукояти, ковша, цилиндров. При заглублении в тяжело обрабатываемый грунт, породу и при упоре (ударе) большая часть кинетической энергии приходится на ковш.

Использование ковшей активного действия, снабженных специальными ударниками рациональной конструкции [8–15], позволяет снизить энергозатраты, а также уменьшить потребную силу тяги [16], прилагаемую рукоятью экскаватора к ковшу, что сокращает затраты энергии на работу соответствующих приводов экскаватора [17–20]. Вместе с тем такие ковши сами являются потребителями энергии.

Постановка задачи. В связи с изложенным возникает задача по определению факторов, влияющих на производительность экскаватора, и разработке алгоритма оптимального управления режимами работы ударников с точки зрения оптимизации энергозатрат.

Решение задачи. Пусть экскаватор должен прокопать трассу, состоящую из P участков, грунт на каждом из которых, согласно предварительно проведенным инженерным изысканиям, обладает определенными характеристиками. Как следует из материалов работы [21], энергия (Дж), потребляемая ударником в таком случае, с точностью, достаточной для инженерных расчетов, может быть определена как

$$A = \sum_{i=1}^P \frac{\delta_i \cdot S \cdot U_i \cdot k_{si} \cdot C_i^2}{2V_i k_a E_i}, \quad (1)$$

где δ_i – требуемая глубина внедрения ударника в грунт на i -м участке, м; S – площадь контакта бойка ударника с грунтом, м²; U_i – скорость распространения продольной волны в грунте на i -м участке, м/с; E_i – динамический модуль упругости грунта на i -м участке, Па; k_a – безразмерный коэффициент, учитывающий угол заострения бойка; V_i – скорость удара бойка ударника о грунт на i -м участке, м/с; k_{si} – коэффициент, характеризующий поперечную упругость грунта на i -м участке, Па² [12]; C_i – число ударов плотномера ДорНИИ, соответствующее грунту на i -м участке.

Когда ковш движется вперед, грунт не только проявляет упругость в направлении движения ковша, но и расходится в стороны – поперек этого движения. Коэффициент k_{si} зависит от поперечной упругости и вязкости грунта на i -ом участке.

Для упрощения изображения в выражении (1) обозначим $B = S/k_a$ – характеристика бойка ударника; $\delta_i/2V_i = R_i$ – характеристика режима работы ударника на i -м участке грунта; $G_i = (V_i/E_i) (C_i)^2 k_{si}$ – характеристика грунта на i -м участке трассы. Тогда выражение (1) примет вид

$$A = \sum_{i=1}^P B \cdot R_i \cdot G_i = B \sum_{i=1}^P R_i \cdot G_i. \quad (2)$$

Предположим, что среднее значение характеристики режима работы ударника на протяжении всей прокапываемой трассы, исходя из требуемой производительности экскаватора, задано и равно \bar{R} .

Аналогично среднее значение характеристики грунта на протяжении трассы известно и равно \bar{G} . При таком предположении правомерно считать, что $P \cdot \bar{R} = \sum_{i=1}^P R_i = const$, $P \cdot \bar{G} = \sum_{i=1}^P G_i = const$. (3)

Найдем условия минимума (2) при ограничениях (3). Представим их для этого как

$$\sum_{i=1}^P R_i + \sum_{i=1}^P G_i = const,$$

или как

$$\sum_{i=1}^P \ln R_i + \sum_{i=1}^P \ln G_i = \sum_{i=1}^P (\ln R_i + \ln G_i) = \sum_{i=1}^P Z_i = T = const. \quad (4)$$

Выражение (2) при этом примет вид

$$A = B \cdot \sum_{i=1}^P e^{Z_i}. \quad (5)$$

Методика. Воспользуемся методом неопределенных множителей Лагранжа λ [22], полагая, что минимум (5) определяется минимумом входящей в него суммы. Составим функцию

$$F = \sum_{i=1}^P e^{Z_i} + \lambda \left(T - \sum_{i=1}^P Z_i \right),$$

и вычислим ее производную по Z_i :

$$\frac{dF}{dZ_i} = e^{Z_i} - \lambda.$$

Приравняв ее к нулю, получим $\ln \lambda = Z_i$. Но тогда

$$T = \sum_{i=1}^P \ln \lambda = P \cdot \ln \lambda = P \cdot Z_i,$$

откуда

$$Z_i = T/P,$$

т. е. сумма в (5), а, следовательно, и A , минимальны – при

$$Z_i = \frac{1}{P} \sum_{i=1}^P \ln R_i + \frac{1}{P} \sum_{i=1}^P \ln G_i. \quad (6)$$

Подставляя Z_i из (4), выразим (6) как

$$\ln R_i = \frac{1}{P} \sum_{i=1}^P \ln R_i + \frac{1}{P} \sum_{i=1}^P \ln G_i - \ln G_i$$

или, после потенцирования, как

$$R_i = \frac{1}{G_i} \sqrt[P]{\prod_{i=1}^P R_i} \cdot \sqrt[P]{\prod_{i=1}^P G_i} = \frac{1}{G_i} \sqrt[P]{\prod_{i=1}^P R_i \cdot \prod_{i=1}^P G_i}. \quad (7)$$

Величину $\sqrt[P]{\prod_{i=1}^P R_i \cdot \prod_{i=1}^P G_i}$, входящую в (7), можно упростить, и путем несложных преобразований получим:

$$R_i = \frac{1}{G_i} \sqrt[P]{\prod_{i=1}^P R_i \cdot \prod_{i=1}^P G_i} = \frac{\bar{R}}{G_i} \sqrt[P]{\prod_{i=1}^P G_i} = \frac{\bar{R}}{G_i} \cdot P \bar{G},$$

откуда окончательно следует

$$R_i = \frac{\bar{R} \cdot \bar{G}}{G_i}. \quad (8)$$

Выводы. В настоящее время можно выделить два перспективных направления развития прогрессивных конструкций ковшей активного действия: их специализацию и универсализацию. Первое преследует цель повышения эффективности экскавации вполне определенных грунтов, а второе – разнообразных грунтов, обладающих принципиально различными свойствами. Каждому из направлений принадлежит будущее, или они и тогда останутся

перспективными вместе, – покажет время и государственная стратегия районирования земляных работ.

На производительность экскаватора и долговечность ковша активного действия влияет множество факторов, таких как характеристика грунта, породы, характеристика бойка ударника, характеристика режима работы ударника и др.

Полученное в работе выражение (8) может являться основой алгоритма оптимального управления ударниками ковша активного действия, Вычисленное R_i при фиксированном δ_i (в общем случае получаемое за один или n циклов работы ударника) обуславливает соответствующее значение V_i , которое может быть подано на блок управления ударником в виде задающего сигнала. Совокупность всех V_i при копании трассы обеспечит требуемую производительность экскаватора, но каждое V_i при этом с точки зрения оптимизации энергозатрат на работу ударника будет минимально необходимым.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mattis A. R., Labutin V. N., Cheskidov V. I. Active rotor for a surface miner. J Min Sci. 2008. Т. 44. Вып. 2. С. 198-205. DOI: 10.1007/s10913-008-0033у.
2. Labutin V. N., Mattis A. R., Zaitseva A. A. Blest-Free Mining of Coal Seams by Excavators Equipped with Rotary Dynamic Buckets. J Min Sci. 2005. Т. 41. Вып. 2 С. 143-150. DOI: 10.1007/s10913-005-0076-2.
3. Sun H., Ren Z., Li G. и Liu W. Bucket structure optimization of backhoe hydraulic excavator based on compound digging trajectory and limit digging force. // Advances in Mechanical Engineering. 2022. Т. 14. Вып. 4. DOI: 10.1177/16878132221092988.
4. Landberg L. Excavatorcombinecompactnessandpower // Constructionquipment. 2003. № 8. Р. 58-59.
5. Лукашук О. А., Комиссаров А. П., Летнев К. Ю. Машины для разработки грунтов: Проектирование и расчет. Екатеринбург : Изд-во Уральского ун-та, 2018. 128 с.
6. Тарасов В. Н., Коваленко М. В. Механика копания грунтов, основанная на теории предельных касательных напряжений // Строительные и дорожные машины. 2003. № 7. С. 38-43.
7. Кузнецова В. Н., Савинкин В. В. Обеспечение энергоэффективности разработки грунта за счет оптимизации углов позиционирования рабочего оборудования экскаватора // Строительные и дорожные машины. 2015. № 3. С. 44–47.
8. Monecki L., Trampezyński W., Cendrowicz J. A concept of digital control system to assist the operator of hydraulic excavators // Automation in construction. 1998. № 5. Р. 401-411.
9. Баловнев В. И., Ермилов А. Б., Хмара Л. А. Рабочий орган роторного экскаватора / Авторское свидетельство СССР № 641035, Кл.Е02F3/18; Заявл. 01.04.1974; Опубл. 05.01.1979.
10. Боженев Е. П., Гаврилова А. И., Иванов А. И., Плугин А. И. Рабочее оборудование роторного экскаватора / Авторское свидетельство СССР № 485223, Кл. Е02с 47/02; Заявл. 23.07.1973; Опубл. 05.09.1975.
11. Хартмут Гратхофф. Рабочий орган роторного экскаватора / Авторское свидетельство СССР № 1386035, Кл. Е02F3/24; Заявл. 26.11.1984; Опубл. 30.03.1988.
12. Федоров Д. И. Рабочие органы землеройных машин. М. : Машиностроение, 1989.
13. Абрамов Б. Н. Рабочий орган роторного экскаватора / Авторское свидетельство СССР № 340743, Кл. Е02F 3/24; Заявл. 08.06.1971; Опубл. 05.06.1972.
14. Бурый Г. Г., Щербаков В. С. Совершенствование конструкции ковша гидравлического экскаватора // Вестник СибАДИ. 2019. Т. 16. № 3. С. 203-213.
15. Карпов В. В., Темнов В. И., Бирючев Б. Н., Шапиро М. С., Кригер С. Д. / Авторское свидетельство СССР № 611975, Кл.Е02F 3/40. Ковш экскаватора с вибрирующими зубьями. Заявл. 10.05.1976; Опубл. 25.06.1978.
16. Пат. 194752 Российская Федерация, МПК E02F 3/40. Ковш землеройной машины / Я. Л. Либерман, К. Ю. Летнев (Россия) – № 2019120419; Заявл. 01.07.2019; Опубл. 23.12. 2019.
17. Федоров Д. И. Рабочие органы землеройных машин. М. : Машиностроение, 1989. 368 с.
18. Sinclair R. HydraulicExcavators: Quarrying&MiningApplications / R. Sinclair. London : SinclairPublishing, 2011. 388 P.
19. Demishcan V. Experimental researches of the process of enterworking of the operational parts of excavators with soil // Вестник Харьковского автомобильно-дорожного университета. 2008. № 43. С. 115-118.
20. Польский С. Б., Левин Р. В., Круглов И. К. / Авторское свидетельство СССР № 1180462, Кл. Е02 F9/22. Гидравлический привод вибрационных зубьев экскаваторного ковша. Заявл. 01.04.1981; Опубл. 23.09.1985.
21. Галдин Н. С., Бедрина Е. А. Ковши активного действия на основе гидроударников для экскаваторов. Омск : Изд-во СибАДИ, 2003. 53 с.
22. Краснов М. Л., Макаренко Г. И., Киселев А. И. Вариационное исчисление. М. : Изд-во «Наука», 1973. 191 с.

© 2022 Автор. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Об авторах:

Либерман Яков Львович, доцент кафедры «Металлорежущие станки и инструменты», Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина (620002, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19), кандидат технических наук, Yakov_Lieberman@List.ru

Летнев Константин Юрьевич, инженер кафедры «Подъемно-транспортные машины и роботы», Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина (620002, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19), k.y.letnev@urfu.ru

Горбунова Любовь Николаевна, доцент кафедры «Техносферная и экологическая безопасность», Сибирский федеральный университет (660041, Россия, г. Красноярск, пр. Свободный, 79/10), кандидат технических наук, Lubov202055@yandex.ru

Заявленный вклад авторов:

Либерман Я.Л. – постановка исследовательской задачи; научный менеджмент; обзор соответствующей литературы; концептуализация исследования; написание текста, сбор и анализ данных; обзор соответствующей литературы; выводы; написание текста.

Летнев К.Ю. – постановка исследовательской задачи; научный менеджмент; обзор соответствующей литературы; концептуализация исследования; написание текста, сбор и анализ данных; обзор соответствующей литературы; выводы; написание текста.

Горбунова Л.Н. – постановка исследовательской задачи; научный менеджмент; обзор соответствующей литературы; концептуализация исследования; написание текста, сбор и анализ данных; обзор соответствующей литературы; выводы; написание текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

DOI: 10.26730/1816-4528-2022-5-3-7

Yakov L. Lieberman^{1, *}, Konstantin Yu. Letnev¹, Lubov N. Gorbunova²

¹Ural Federal University

²Siberian Federal University

*E-mail: Yakov_Lieberman@List.ru

ABOUT OPTIMAL DRUMMER CONTROL EXCAVATOR BUCKET OF ACTIVE ACTION



Article info

Received:

08 September 2021

Accepted for publication:

01 October 2022

Accepted:

04 October 2022

Keywords: excavator, active bucket, drummer, ground, energy consumption, management.

Abstract.

The most effective and most widely used type of earthmoving machines used for open-pit mining are excavators, the main movable element of which are active buckets of active action. Active buckets are more effective to use for the development of strong fractured rocks and similar rocks with a strength of about 80 MPa. Along with its main function – cutting the soil with the separation of chips, lifting and dumping it, active buckets facilitate this function – soften the soil, its loosening and crushing. The supply of buckets with special structural elements-strikers complicates their design, but if they are used correctly, they can reduce the required traction force applied by the excavator handle to the bucket, which reduces the energy costs for the operation of the corresponding excavator drives. Active buckets are energy consumers and include several devices consisting of an energy unit, a duty cycle control unit, a tool, a flow divider, and a power source for the basic excavator machine. The article deals with the problem of minimizing the energy consumption of active buckets, by optimal control of their operation modes in the development of soils.

For citation: Lieberman Ya.L., Letnev Ko.Yu., Gorbunova L.N. About optimal drummer control excavator bucket of active action. Mining Equipment and Electromechanics, 2022; 5(163):3-7 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2022-5-3-7

REFERENCES

1. Mattis A.R., Labutin V.N., Cheskidov V.I. Active rotor for a surface miner. *J Min Sci.* 2008; 44(2):198-205 DOI: 10.1007/s10913-008-0033y.
2. Labutin V.N., Mattis A.R. и Zaitseva A.A. Blest-Free Mining of Coal Seams by Excavators Equipped with Rotary Dynamic Buckets. *J Min Sci.* 2005. 41 (2):143-150. DOI: 10.1007/s10913-005-0076-2.
3. Sun H., Ren Z., Li G., Liu W. «Bucket structure optimization of backhoe hydraulic excavator based on compound digging trajectory and limit digging force. *Advances in Mechanical Engineering.* 2022; 14(4). DOI: 10.1177/16878132221092988.
4. Landberg L. Excavator combine compactness and power / L. Landberg // *Construction quipment.* 2003; 8:58-59.
5. Lukashuk O.A., Komissarov A.P., Letnev K.Yu. Machines for soil development: Design and calculation. Yekaterinburg: Publishing House of the Ural University; 2018.
6. Tarasov V.N., Kovalenko M.V. Mechanics of soil digging based on the theory of limit shear stresses. *Construction and road machines.* 2003; 7:38-43.
7. Kuznetsova V.N., Savinkin V.V. Ensuring the energy efficiency of soil development by optimizing the positioning angles of the excavator working equipment. *Construction and road building machinery.* 2015; 3: 44-47.
8. Monecki L., Trampezyński W., Cendrowicz J. A concept of digital control system to assist the operator of hydraulic excavators. *Automation in construction.* 1998; 5:401-411.
9. Balovnev V.I., Ermilov A.B., Khmara L.A. The working body of a rotary excavator / Author's certificate of the USSR No. 641035, Cl. E02F3 / 18; Appl. 04/01/1974; Published 01/05/1979.
10. Bozhenov E.P., Gavrilova A.I., Ivanov A.I., Plugin A.I. Working equipment of a rotary excavator / Author's certificate of the USSR No. 485223, Cl. E02c 47/02; Appl. 07/23/1973; Published 09/05/1975.
11. Hartmut Grathoff. The working body of a rotary excavator / Author's certificate of the USSR No. 1386035, Cl. E02F3/24; Appl. 11/26/1984; Published 03/30/1988.
12. Fedorov D.I. Working bodies of earth-moving machines. M.: Mashinostroenie; 1989.
13. Abramov B.N. The working body of a rotary excavator / Author's certificate of the USSR No. 340743, Cl. E02F 3/24; Appl. 08/06/1971; Published 05/06/1972.
14. Bury G.G., Shcherbakov V.S. Improving the design of the hydraulic excavator bucket. *Bulletin of SibADI.* 2019; 16(3):203-213.
15. Karpov V.V., Temnov V.I., Biryuchev B.N., Shapiro M.S., Kriger S.D. / Author's certificate of the USSR No. 611975, Cl. E02F 3/40. Bucket excavator with vibrating teeth. Appl. May 10, 1976; Published 06/25/1978.
16. Pat. 194752 Russian Federation, IPC E02F 3/40. Bucket of an earth-moving machine / Ya.L. Liberman, K.Yu. Letnev (Russia) – No. 2019120419; Appl. 07/01/2019; Published 23.12. 2019.
17. Fedorov D.I. Working bodies of earth-moving machines. M.: Mashinostroenie; 1989.
18. Sinclair R. Hydraulic Excavators: Quarring & Mining Applications / R. Sinclair. London: Sinclair Publishing; 2011.
19. Demishcan V. Experimental researches of the process of enterworking of the operational parts of excavators with soil. *Bulletin of the Kharkiv Automobile and Road Union.* 2008; 43:115-118.
20. Polsky S.B., Levin R.V., Kruglov I.K. / Author's certificate of the USSR No. 1180462, Class. E02 F9/22. Hydraulic drive of vibratory teeth of excavator bucket. Appl. 04/01/1981; Published 09/23/1985.
21. Galdin N.S., Bedrina E.A. Active buckets based on hydraulic hammers for excavators. Omsk: SibADI Publishing House; 2003.
22. Krasnov M.L., Makarenko G.I., Kiselev A.I. Calculus of Variations. M.: Publishing House «Nauka»; 1973.

© 2022 The Author. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The author declare no conflict of interest.

About the author:

Yakov L. Lieberman, Associate Professor, Department of Transport Technological Processes and Machines, Ural Federal University (Russian Federation, Ekaterinburg, ul. Mira 19), Candidate of Technical Sciences, Yakov_Lieberman@List.ru

Konstantin Yu. Letnev, Engineer, Department «Lifting and Transport machines and Robots», Ural Federal University (Russian Federation, Ekaterinburg, ul. Mira 19), k.y.Letnev@urfu.ru

Lubov N. Gorbunova, Associate Professor, Department of Transport Technological Processes and Machines, Siberian Federal University (Russian Federation, Krasnoyarsk, pr. Svobodniy, 79/10), Candidate of Technical Sciences, Lubov202055@yandex.ru

Contribution of the authors:

Yakov L. Lieberman – research problem statement; scientific management; reviewing the relevant literature; conceptualisation of research; writing the text, data collection; data analysis; reviewing the relevant literature; drawing the conclusions; writing the text.

Konstantin Yu. Letnev – research problem statement; scientific management; reviewing the relevant literature; conceptualisation of research; writing the text, data collection; data analysis; reviewing the relevant literature; drawing the conclusions; writing the text.

Lubov N. Gorbunova – research problem statement; scientific management; reviewing the relevant literature; conceptualisation of research; writing the text, data collection; data analysis; reviewing the relevant literature; drawing the conclusions; writing the text.

Author have read and approved the final manuscript.

