

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ РАБОЧЕГО ОБОРУДОВАНИЯ ОДНОКОВШОВОГО ЭКСКАВАТОРА

*Летопольский А.Б., Мещеряков В.А., Тетерина И.А., Николаев Д.И.  
Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), Омск*

**Ключевые слова:** одноковшовый экскаватор, ковш, траншея, рабочее оборудование, автоматическое управление, система управления.

**Аннотация.** Статья содержит результаты теоретических и экспериментальных исследований направленных на определение угловых положений и позиционирования рабочего оборудования одноковшового экскаватора. Отражена расчетная схема для определения угловых положений элементов рабочего оборудования экскаватора. Представлены основные технические характеристики машины участвующей в теоретических и экспериментальных исследованиях в качестве объекта. Отражен перечень оборудования входящего в состав программно-аппаратного комплекса для проведения экспериментальных исследований. Представлен график, отражающий результаты экспериментальных исследований и определяющий возмущающие воздействия на рабочее оборудование одноковшового экскаватора в процессе копания грунта. Дан подробный анализ основной операции всего цикла копания траншеи – копание грунта, состоящей из внедрения ковша в грунт, набор грунта в ковш и поворот наполненного ковша. В интервале 6 секунд (продолжительность операции) зафиксированы угловые положения стрелы, ковша и рукояти.

## SIMULATION OF MOVEMENT OF WORKING EQUIPMENT SINGLE BUCKET EXCAVATOR

*Letopolsky A.B., Meshcheryakov V.A., Teterina I.A., Nikolaev D.I.  
Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), Omsk*

**Keywords:** single-bucket excavator, bucket, trench, working equipment, automatic control, control system.

**Abstract.** The article contains the results of theoretical and experimental studies aimed at determining the angular positions and positioning of the working equipment of a single-bucket excavator. The calculation scheme for determining the angular positions of the elements of the working equipment of the excavator is reflected. The main technical characteristics of the machine participating in theoretical and experimental studies as an object are presented. The list of equipment included in the software and hardware complex for experimental research is reflected. A graph is presented that reflects the results of experimental studies and determines the disturbing effects on the working equipment of a single-bucket excavator in the process of digging the soil. A detailed analysis of the main operation of the entire cycle of digging a trench is given - digging the soil, consisting of the introduction of a bucket into the soil, the collection of soil into the bucket and the rotation of the filled bucket. In the interval of 6 seconds (the duration of the operation), the angular positions of the boom, bucket and handle were fixed.

### Введение

Развитие теории управления рабочими процессами землеройных машин должно основываться на динамических свойствах машины. Автоматическое выполнение заданного алгоритма действий одноковшовым экскаватором при выполнении технологических операций затруднено большим количеством случайных факторов, действующих на рассматриваемый объект [1-3].

Несмотря на сложности в разработке и практической реализации, преимущества использования экскаваторных систем управления очевидны и вызывают у строительных компаний интерес [4, 5].

Кроме того, стоит отметить, что гидросистемы современных экскаваторов становятся более продвинутыми, производители переходят от гидромеханических систем к электрогидравлическим. Благодаря этому повышаются функциональные возможности гидросистем и возможности автоматизировать различные функции. Расширяются

возможности выбора режимов работы и регулировок систем экскаватора, а значит, и возможности повышения производительности и экономичности работы машин [6].

Наиболее полное представление о характеристиках землеройной машины как объекта управления дает исследование адекватных математических моделей, в основе которых лежит обобщенная экспериментальная информация о рабочем процессе одноковшового экскаватора и априорных знаниях об устройстве и параметрах исследуемой машины [7].

### Основная часть

При проведении исследований использовался одноковшовый экскаватор модель Hitachi Zaxis 180LCN с гидравлической системой управления [5].

В таблице 1 представлены технические характеристики машины.

Табл. 1 Техническая характеристика экскаватора Hitachi Zaxis 180LCN[5]

Параметр	Значение
Снаряжённая масса, кг	18 300
Давление на грунт, кПа	48
Основной поток гидравлики, л/мин	2×191
Глубина копания (максимальная), м	6,12
Усилие копания на ковше, кН	122
Мощность двигателя, кВт	90,2
Рабочее давление в гидравлической системе, МПа	34,3
Усилие копания на рукояти, кН	105
Объем ковша, м <sup>3</sup>	0,8
Скорость поворота платформы, мин <sup>-1</sup>	14,1

Проведенные полевые исследования позволили получить данные о рабочем процессе экскаватора, которые в дальнейшем будут использованы для формирования управляющих воздействий на рабочее оборудование экскаватора (рукоять, стрела, ковш).

Сбор и обработка данных производилась с помощью разработанного программно-аппаратного комплекса, в состав которого входят: 6 инерциальных датчиков (IMU) WitMotion WT901BLECL, стереокамера Stereolabs ZED 2i с встроенными инерциальными датчиками (IMU), лидар (лазерный дальномер) Livox Mid-70 [8].

Результатом проведенных исследований стали данные о полном цикле копания траншеи, который включает в себя: подъем рабочего органа, опускание рабочего органа перед заглублиением ковша, копание грунта и поворот рабочего органа в исходное положение с разгрузкой ковша. Общее время цикла составило 18 секунд.

Наибольший интерес из всего цикла представляет третья операция – копание грунта. Именно эта операция, в свою очередь, включающая в себя внедрение ковша в грунт, набор грунта в ковш и поворот наполненного ковша происходит в интервале времени 10:10:12 – 10:10:18 и представлена на рисунке 1.

Дан подробный анализ основной операции всего цикла копания траншеи – копание грунта. Эта операция, в свою очередь, включает в себя порядок таких операций как внедрение ковша в грунт, набор грунта в ковш и поворот наполненного ковша.

После выбора необходимо положения рабочего оборудования, согласно установленным ограничениям, для разработки траншеи, оператор заглубляет ковш. Положение стрелы меняется с -50 до -52 град. При этом положение рукояти не изменяется. Ковш меняет свой угол в интервале 109-122 град. Непосредственно операция копания грунта показывает следующие угловые изменения: стрела -52 ÷ -60 град., рукоять 31 ÷ 22 град., ковш 122 ÷ 128 град. Для перемещения извлеченного грунта ковш менял свое положение с 128 до 118 град.

На рисунке 2 представлена расчетная схема для определения угловых положений элементов рабочего оборудования одноковшового экскаватора [9].

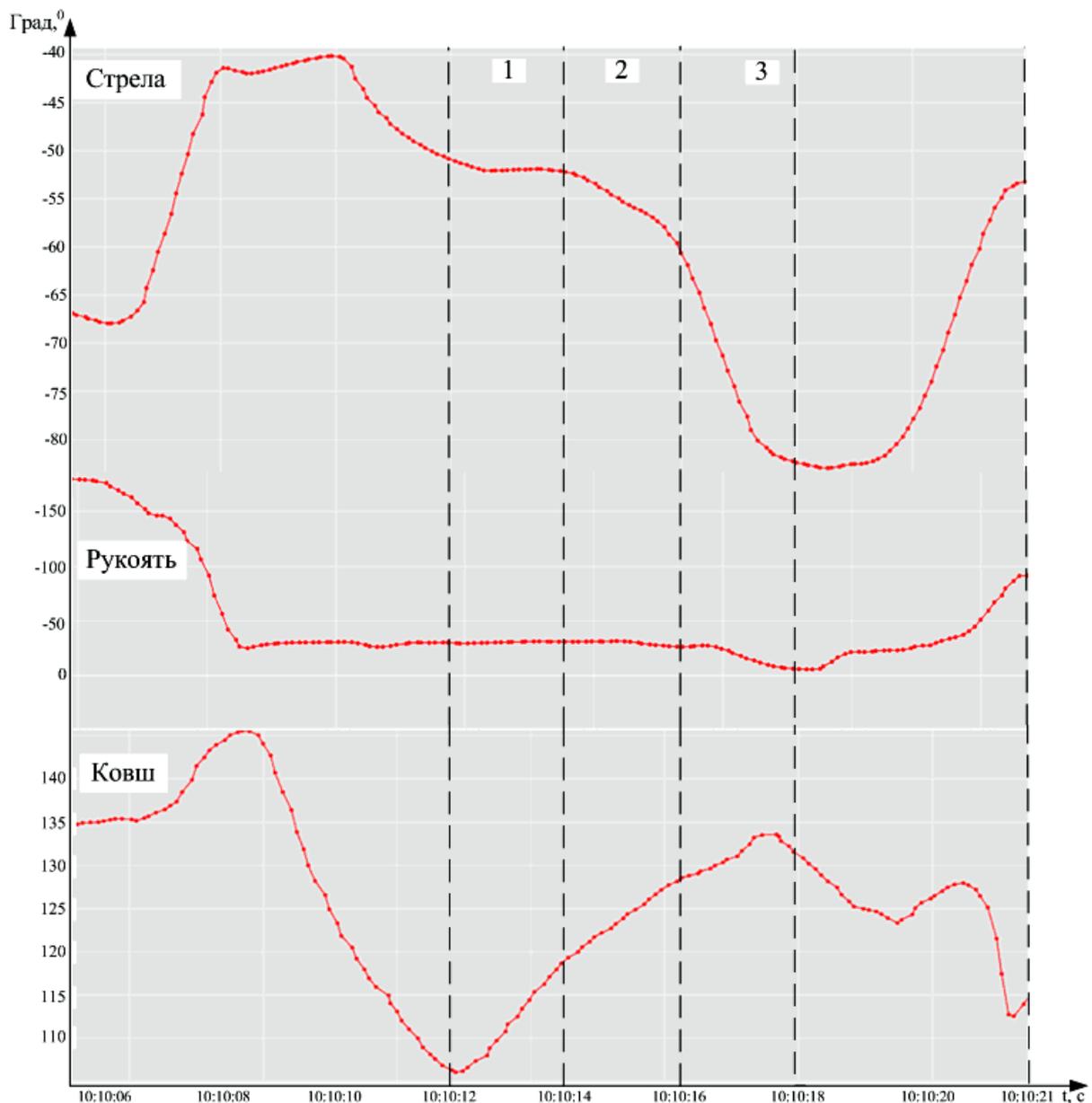


Рис. 1. Изменение углового положения рабочего оборудования в процессе копания грунта:  
 1 – внедрение ковша в грунт; 2 – набор грунта в ковш; 3 – поворот наполненного ковша

При управлении многосвязными механизмами в ходе планирования траектории движения и формирования управляющих воздействий на приводы, алгоритмы решения обратных задач кинематики позволяют определить законы и изменения во времени обобщенных координат, обеспечивающих требуемый закон движения по требуемой траектории [10].

Решая обратные задачи, получают программные значения обобщенных координат, которые обрабатываются приводом машины. Рабочее оборудование экскаватора можно представить трехзвенным механизмом. В этом случае координаты точки  $K$  последнего звена связаны с обобщенными координатами уравнениями [11, 12]:

$$x_k = [l_1 \cdot \cos \varphi_1 + l_2 \cdot \cos(\varphi_1 + \varphi_2) + l_3 \cdot \cos(\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3)], \quad (1)$$

$$y_k = [l_1 \cdot \sin \varphi_1 + l_2 \cdot \sin(\varphi_2 + \varphi_3) + l_3 \cdot \sin(\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3)], \quad (2)$$

$$z_k = [l_1 \cdot \cos \varphi_1 + l_2 \cdot \cos(\varphi_1 + \varphi_2) + l_3 \cdot \cos(\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3)] \quad (3)$$

где  $l_1$  – расстояние между точками соединения стрелы на платформе экскаватора и местом соединения стрелы с рукоятью, м;  $l_2$  – расстояние между точками соединения стрелы с рукоятью и местом соединения рукояти и ковша, м;  $l_3$  – расстояние между точкой соединения

рукояти и ковша и режущей кромкой ковша, м;  $\varphi_1$  – угол между осью  $X_1$  и отрезком  $O_1O_2$ , град;  $\varphi_2$  – угол между осью  $X_2$  и отрезком  $O_2O_3$ , град;  $\varphi_3$  – угол между осью  $X_3$  и отрезком  $O_2O_3$ , град;  $\beta$  – угол между кромкой ковша экскаватора и осью  $X_0$ ;  $\alpha$  – угол между стороной  $O_1O_2$  и гипотенузой  $S$ ;  $\theta$  – угол между осью  $X_1$  и гипотенузой  $S$ .

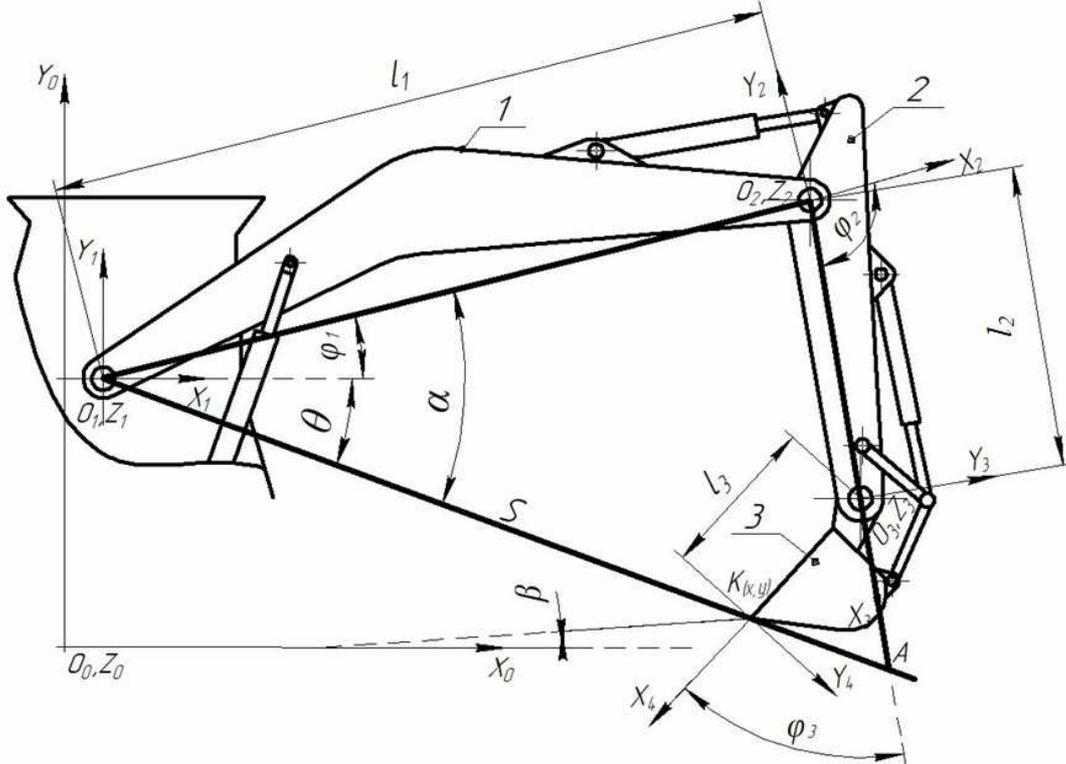


Рис. 2. Схема для определения угловых положений элементов оборудования экскаватора: 1 – стрела; 2 – рукоять; 3 – ковш

Если в систему уравнений ввести законы движения, то получим выражения:

$$\varphi_1(t) = \varphi_1 + \omega_1(t), \quad (4)$$

$$\varphi_2(t) = \varphi_2 + \omega_2(t), \quad (5)$$

$$\varphi_3(t) = \varphi_3 + \omega_3(t), \quad (6)$$

получим уравнения, описывающие закон изменения положения точки  $K$  на ковше экскаватора в базовой системе координат:

$$x_k(t) = [l_1 \cdot \cos \varphi_1(t) + l_2 \cdot \cos(\varphi_1(t) + \varphi_2(t)) + l_3 \cdot \cos(\varphi_1(t) + \varphi_2(t) + \varphi_3(t))], \quad (7)$$

$$y_k(t) = [l_1 \cdot \sin \varphi_1(t) + l_2 \cdot \sin(\varphi_1(t) + \varphi_2(t)) + l_3 \cdot \sin(\varphi_1(t) + \varphi_2(t) + \varphi_3(t))], \quad (8)$$

$$z_k(t) = [l_1 \cdot \cos \varphi_1(t) + l_2 \cdot \cos(\varphi_1(t) + \varphi_2(t)) + l_3 \cdot \cos(\varphi_1(t) + \varphi_2(t) + \varphi_3(t))], \quad (9)$$

Расчетные зависимости для определения необходимых углов для позиционирования рабочего оборудования (рис.1):

$$S = \sqrt{(K_x - O_{1x})^2 + (K_y - O_{1y})^2}, \quad (10)$$

где  $K_x$  – координата точки на ось  $X_0$ , м;  $K_y$  – координата точки на ось  $Y_0$ , м;  $O_{1x}$  – координата точки на ось  $X_0$ , м;  $O_{1y}$  – координата точки на ось  $Y_0$ , м.

$$Q = \arctg \frac{K_y - O_{1y}}{K_x - O_{1x}}, \quad (11)$$

$$\alpha = \arccos \frac{S^2 + l_1^2 - (l_2 + l_3)^2}{2 \cdot S \cdot l_1}, \quad (12)$$

$$\beta = \arctg \frac{K_y}{K_x}, \quad (13)$$

$$\varphi_1 = \alpha - Q, \quad (14)$$

$$\varphi_2 = \arccos \left[ \frac{1}{2 \cdot l_1 \cdot (l_2 + l_3)} \cdot (S^2 + y_k^2 + (l_1^2 - (l_2^2 + l_3^2)) - 2 \cdot y_k \cdot O_{ov}) \right], \quad (15)$$

### Заключение

Проведенные исследования позволили получить расчетные зависимости для определения необходимых координат и углов позиционирования рабочего оборудования одноковшового экскаватора. Полученные формулы в дальнейшем позволят определить требуемые угловые положения рабочего оборудования и будут использованы для разработки системы интеллектуального управления рабочим процессом экскаватора.

**Финансирование.** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №22-29-20055, <https://rscf.ru/project/22-29-20055/>

### Список литературы

1. Васильев В.И., Овсянников В.Е., Ширяева А.Н. Разработка модели обеспечения надежности водителей на основе процессного подхода // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2020. – №1(45). – С. 69-74.
2. Letopolsky A.B., Korchagin P.A., Teterina I.A., Demidenko A.I. Trencher equipment // E3S Web of Conferences. International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTMTE 2020. 2020, vol. 193, pp. 01047. DOI: 10.1051/e3sconf/202019301047.
3. Hongnian Yu, Yang Liu, Mohammed Shahidul Hasan. Review of modelling and remote control of excavators // International Journal of Advanced Mechatronic Systems. 2010, vol. 2, no. 1/2, pp. 68-80.
4. Малафеев С.И., Тихонов Ю.В. Интеллектуализация карьерного экскаватора // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – №11. – С. 107-115.
5. Шляховой В. Системы интеллектуального управления экскаваторов [Электронный ресурс] // Основные средства. – 2016. – №12. – Режим доступа: <https://os1.ru/articles?date=2016-12>.
6. Побегайло П.А. Рабочее оборудование одноковшового гидравлического экскаватора: о точности перемещения ковша // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – №11. – С. 113-117.
7. Denisova L.A., Meshcheryakov V.A., Karabtsov R.D. The control system simulation technology for optimization and determination of the feasible parameters domain // Journal of Physics: Conference Series. 2020, vol. 1441, pp. 012056. DOI: 10.1088/1742-6596/1441/1/012056.
8. Мещеряков В.А., Николаев Д.И. Информационные технологии в роботизированной спецтехнике: компетенции СибАДИ // Цифровизация и кибербезопасность: современная теория и практика: Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции. – Омск: СибАДИ, 2021. – С. 123-126.
9. Кобзов Д.Ю., Лапшин В.Л., Губанов В.Г., Жмуров В.В., Кобзова И.О. Экспериментальные исследования прогиба гидроцилиндра // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2020. – №4(68). – С. 18-32. – DOI: 10.26731/1813-9108.2020.4(68).18-32.
10. Богуславский А.А., Боровин Г.К., Карташев В.А. Павловский В.Е., Соколов С.М. Модели и алгоритмы для интеллектуальных систем управления. – М.: ИПМ им. М.В. Келдыша, 2019. – 228 с.
11. Mittal S.A. Survey on optimized implementation of deep learning models on the NVIDIA Jetson platform // Journal of Systems Architecture. 2019, vol. 97, pp. 428-442. DOI: 10.1016/j.sysarc.2019.01.011.
12. Терентьева А. Д. Повышение точности копания за счет внесения корректировок в систему управления рабочим механизмом одноковшового экскаватора // Механизация строительства. – 2018. – Т. 79, № 5-6. – С. 29-33.

### References

1. Vasiliev V.I., Ovsyannikov V.E., Shiryayeva A.N. Development of a model for ensuring the reliability of drivers based on a process approach // Bulletin of the Ural State University of Communications. 2020, no. 1(45), pp. 69-74.
2. Letopolsky A.B., Korchagin P.A., Teterina I.A., Demidenko A.I. Trencher equipment // E3S Web of Conferences. International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTMTE 2020. 2020, vol. 193, pp. 01047. DOI: 10.1051/e3sconf/202019301047.
3. Hongnian Yu, Yang Liu, Mohammed Shahidul Hasan. Review of modelling and remote control of excavators // International Journal of Advanced Mechatronic Systems. 2010, vol. 2, no. 1/2, pp. 68-80.
4. Malafeev S.I., Tikhonov Yu.V. Intellectualization of a mining excavator // Mining information and analytical bulletin. 2015, no. 11, pp. 107-115.
5. Shlyakhovoy V. Intelligent control systems for excavators [Electronic resource] // Fixed assets. 2016, no. 12. Access mode: <https://os1.ru/articles?date=2016-12>.
6. Pobegailo P.A. Working equipment of a single-bucket hydraulic excavator: on the accuracy of bucket movement // Mining Information and Analytical Bulletin. 2017, no. 11, pp. 113-117.

7. Denisova L.A., Meshcheryakov V.A., Karabtsov R.D. The control system simulation technology for optimization and determination of the feasible parameters domain // Journal of Physics: Conference Series. 2020, vol. 1441, pp. 012056. DOI: 10.1088/1742-6596/1441/1/012056.
8. Meshcheryakov V.A., Nikolaev D.I. Information technologies in robotic special equipment: SibADI competencies // Digitalization and cybersecurity: modern theory and practice: Collection of scientific papers of the International Scientific and Practical Conference. – Omsk: SibADI, 2021. – P. 123-126.
9. Kobzov D.Yu., Lapshin V.L., Gubanov V.G. Zhmurov V.V., Kobzova I.O. Experimental studies of hydraulic cylinder deflection // Modern technologies. System analysis. Modeling. 2020, no. 4(68), pp. 18-32. DOI: 10.26731/1813-9108.2020.4(68).18-32.
10. Boguslavsky A.A., Borovin G.K., Kartashev V.A. Pavlovsky V.E., Sokolov S.M. Models and algorithms for intelligent control systems. – M.: IPM n.a. M.V. Keldysh, 2019. – 228 p.
11. Mittal S.A. Survey on optimized implementation of deep learning models on the NVIDIA Jetson platform // Journal of Systems Architecture. 2019, vol. 97, pp. 428-442. DOI: 10.1016/j.sysarc.2019.01.011.
12. Terentyeva A.D. Increasing the accuracy of digging by making adjustments to the control system of the working mechanism of a single-bucket excavator // Construction Mechanization. 2018, vol. 79, no. 5-6, pp. 29-33.

*Сведения об авторах:*

*Information about authors:*

<b>Летопольский Антон Борисович</b> – кандидат технических наук, доцент	<b>Letopolsky Anton Borisovich</b> – candidate of technical sciences, associate professor
<b>Мешеряков Виталий Александрович</b> – доктор технических наук, профессор	<b>Meshcheryakov Vitalii Aleksandrovich</b> – doctor of technical sciences, professor
<b>Тетерина Ирина Алексеевна</b> – кандидат технических наук, старший научный сотрудник	<b>Teterina Irina Alekseevna</b> – candidate of technical sciences, senior researcher
<b>Николаев Данил Игоревич</b> – студент iateterina@mail.ru	<b>Nikolaev Danil Igorevich</b> – student

Получена 17.03.2023