

Агапов Максим Евгеньевич, старший преподаватель, **Потеряев Илья Константинович**, кандидат. техн. наук, доцент

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

*E-mail: agapov_me@mail.ru

КОМПЛЕКСНЫЙ КРИТЕРИЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ЦЕПНОГО ТРАНШЕЙНОГО ЭКСКАВАТОРА

***Аннотация:** статья посвящена вопросу повышения эффективности землеройных машин путем объединения контуров управления различными процессами посредством формирования комплексного критерия, который позволяет оценить одновременное влияние разнообразных параметров на эффективность рабочего процесса землеройной машины на примере цепного траншейного экскаватора. Рассмотрен рабочий процесс цепного траншейного экскаватора с автоматизированным устройством управления положением рабочего органа в поперечной плоскости. Представлены контуры управления положением рабочего органа в поперечной плоскости и скоростью движения цепного траншейного экскаватора, соответствующий рассмотренному рабочему процессу. В результате рассматриваются факторы влияющие на эффективность рабочего процесса и обосновывается критерий эффективности, позволяющий определить оптимальные параметры устройства управления рабочим органом в поперечной плоскости. Результатом исследования стал анализ составленной имитационной модели рабочего процесса и проведенные теоретические исследования. Любая модель представляет собой своеобразную зависимость, представляющую выходного значения от поданного входного. Подтверждена необходимость совершенствования устройства управления положением рабочего органа в поперечной плоскости следует подтвердить путем сравнения значений выходных параметров исследуемой математической модели при без и с использованием устройства управления положением рабочего органа цепного траншейного экскаватора в поперечной плоскости.*

***Ключевые слова:** цепной траншейный экскаватор, комплексный критерий эффективности, исследование имитационной модели, математическая модель.*

***Информация о статье:** принята 17 февраля 2021 г.
DOI: 10.26730/1816-4528-2021-2-48-54*

Одним из основных направлений научных исследований строительной техники является повышение эффективности ее рабочего процесса (РП). В различных условиях во время проведения исследований необходимо выделить объективные показатели, по которым будет оцениваться эффективность РП рассматриваемой техники. Для этого выбирают и обосновывают критерий эффективности. Рассмотрим выбор критерия эффективности рабочего процесса на примере цепного траншейного экскаватора (ЦТЭ), который является землеройной машиной (ЗМ) непрерывного действия, оснащенной цепным рабочим органом. Цепные траншейные экскаваторы используются для выполнения работ по рытью траншей большой протяженностью за короткие сроки, что возможно с помощью постоянно движущейся цепи. Такой принцип действия РО позволяет, по сравнению с циклическим принципом выполнения работ одноковшовыми экскаваторами, сократить время производства траншеи. Для повышения эффективности такой машины необходимо использовать нестандартные способы, которые позволят максимально использовать особенности рассматриваемой техники [1, 2, 3].

Эффективность землеройной машины оценивается по величине, определяющей отношение затрат на производство единицы продукции к результатам работы [4, 5].

Эффективность можно оценить при помощи какого-нибудь критерия, выраженного численным значением или уравнением. Критерий эффективности формируется на основе характеристик ЦТЭ, влияющих на эффективность его РП [6, 7].

Использование классического подхода в оценке эффективности РП ЦТЭ с усовершенствованным УУ положением РО через приведенные удельные затраты является общим способом и не отражает в полной мере влияние на эффективность РП конкретных исследуемых параметров [8, 9, 10].

Цепной траншейный экскаватор выступает в роли инструмента реализации задуманного и соответственно к нему предъявляют определенные требования. Такие требования предъявляются не только к инструменту, но и к эффективности работы ЦТЭ, и к результату работы (траншеям). Эти требования могут позволить выбрать и обосновать критерий эффективности, в качестве которого выступают среднее квадратическое значение угла отклонения

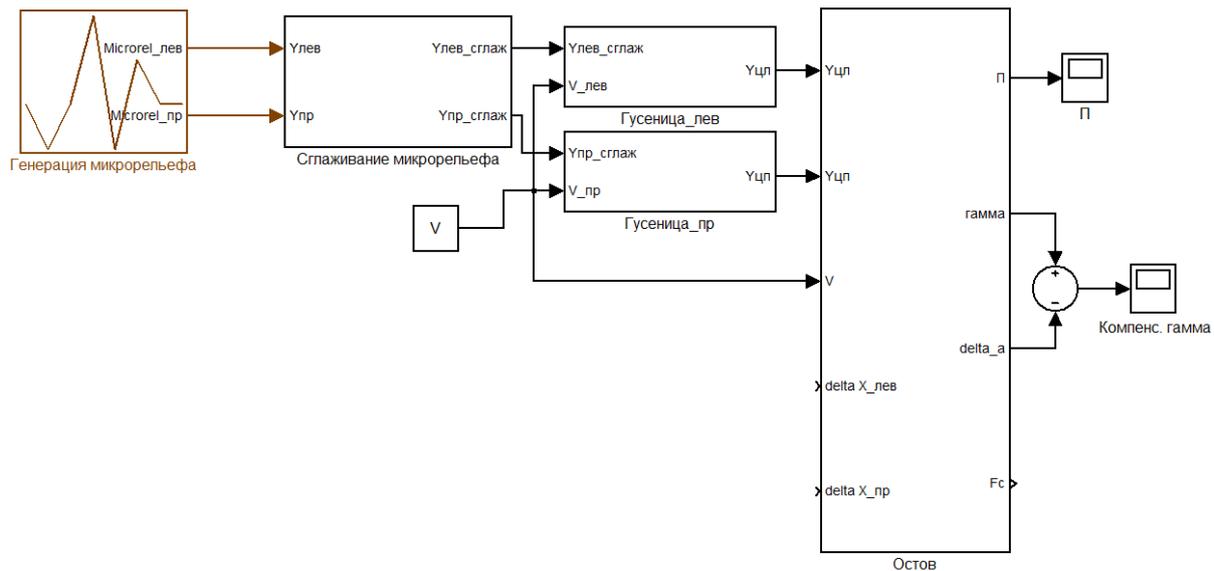


Рис. 1. Структурная схема разработанной имитационной модели РП ЦТЭ без УУ положением РО, выполненная в программе MATLAB Simulink
 Fig. 1. Block diagram of the developed RP simulation model DSP without CU by position RO, executed in MATLAB Simulink

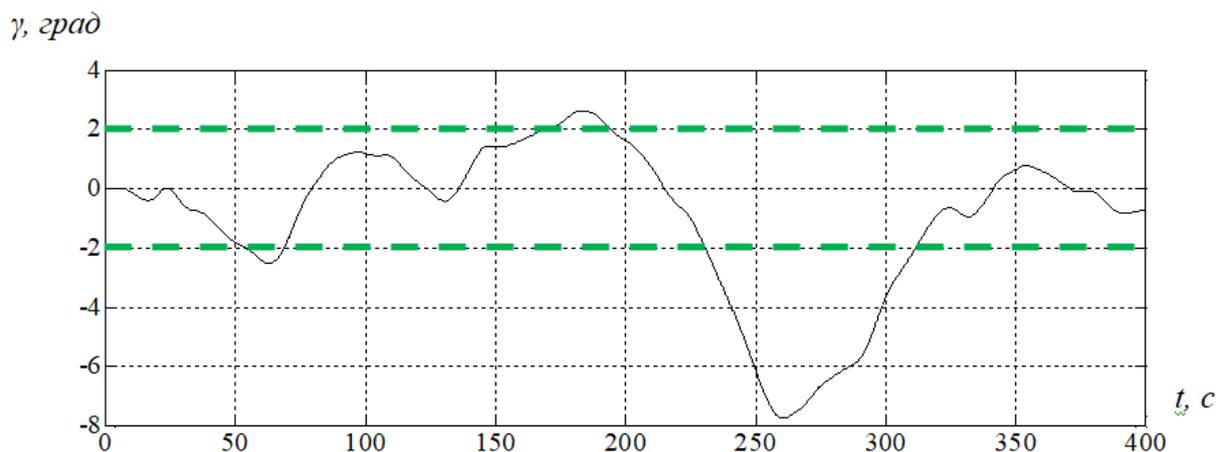


Рис. 2. Значение угла отклонения РО ЦТЭ без устройства управления положением рабочего органа
 Fig. 2. The value of the deflection angle of the RO TsTE without a device for controlling the position of the working body

РО ЦТЭ от вертикального положения ($\gamma_{ср}$, град) и производительность ЦТЭ (Π , $м^3/ч$) [11, 12, 13].

С учетом вышесказанного целевыми функциями обозначенного критерия эффективности РП ЦТЭ послужат функции [1]:

$$\begin{cases} \gamma_{ср} \rightarrow 0; \\ \Pi \rightarrow \max. \end{cases} \quad (1)$$

В роли переменных установленных целевых функций выбраны скорость изменения угла наклона РО в поперечной плоскости ($V_{угла}$, град/с) и линейная скорость движения ЦТЭ (V , м/с) как параметры, значительно влияющие на рабочий процесс ЦТЭ.

Из выбранных целевых функций производительность (Π , $м^3/ч$) определяет объем извлеченного грунта за единицу времени и зависит от скорости пе-

ремещения машины (V , м/с), при этом среднее квадратическое значение угла отклонения РО от вертикального положения в поперечной плоскости ($\gamma_{ср}$, град) зависит от скорости изменения угла наклона РО в поперечной плоскости ($V_{угла}$, град/с). Можно установить простую зависимость между этими параметрами, которая выражена в следующем: чем больше V , тем больше Π , и чем больше $V_{угла}$, тем меньше $\gamma_{ср}$. Определение оптимальных значений выбранных параметров позволит повысить эффективность РП ЦТЭ.

Одновременного достижения лучших значений выбранных целевых функций, поэтому необходимо записать соотношение между ними, что приведет к большему эффекту [1, 14]. В результате предложена обобщенная целевая функция комплексного критерия

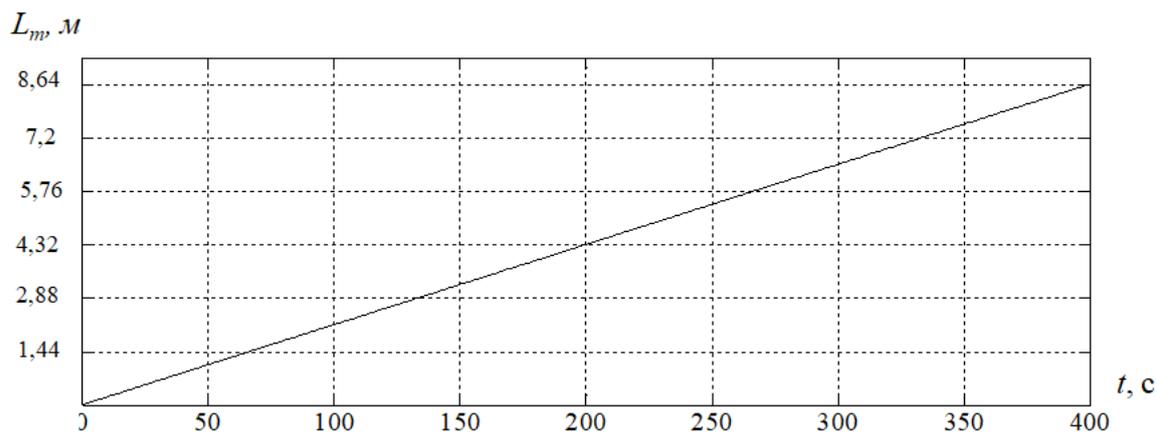


Рис. 3. Длина траншеи, разработанной ЦТЭ без устройства управления положением рабочего органа
 Fig. 3. The length of the trench developed by the CTE without a device for controlling the position of the working body

эффективности, представляющая собой сумму соотношений между целевыми функциями γ_{cp} и Π и их лучших значений [1]:

$$\frac{\Pi(V_{угла}, V)}{\Pi'(V_{угла}, V)} + \frac{\gamma_{cp}'(V_{угла}, V)}{\gamma_{cp}(V_{угла}, V)} \rightarrow \max, \quad (2)$$

где $\Pi(V_{угла}, V)$ – целевая функция зависимости производительности от выбранных переменных; $\Pi'(V_{угла}, V)$ – лучшее значение зависимости производительности от переменных целевых функций; $\gamma_{cp}(V_{угла}, V)$ – целевая функция зависимости среднего квадратического значения угла отклонения РО от выбранных переменных; $\gamma_{cp}'(V_{угла}, V)$ – наилучшее значение зависимости среднего квадратического значения угла отклонения РО от переменных целевых функций.

Сами переменные обобщенной целевой функции (2) зависят от технической возможности реализации конструктивных элементов конструкции, УУ и конкретных частей ГП. Граничные значения переменных полученной целевой функции необходимо записать в виде неравенств [1, 15]:

$$\begin{cases} V_{угла\min} < V_{угла} \leq V_{угла\max}; \\ V_{\min} < V \leq V_{\max}. \end{cases} \quad (3)$$

Результатом исследования стала составленная имитационная модель рабочего процесса и проведенные теоретические исследования. Любая модель представляет собой своеобразную зависимость, представляющую выходного значения от поданного входного. В работе входным параметром являются скорость перемещения машины (V , м/с) и среднее квадратическое значение угла отклонения РО от вертикального положения в поперечной плоскости (γ_{cp} , град), а выходными параметрами являются угол отклонения РО от гравитационной вертикали (γ) и производительность ЦТЭ (Π). Необходимость совершенствования УУ положением РО в поперечной плоскости следует подтвердить путем сравнения

значений выходных параметров исследуемой математической модели при без и с использованием УУ положением РО ЦТЭ в поперечной плоскости.

Чтобы исследовать РП ЦТЭ без УУ положением РО в поперечной плоскости и скоростью движения ЦТЭ, использована соответствующая имитационная модель без УУ (рис. 1), выполненная в программном продукте MATLAB. Во время исследования скорость движения ЦТЭ V была зафиксирована и равна 0,03 м/с.

В результате исследования имитационной модели РП ЦТЭ без УУ положением РО и скоростью движения ЦТЭ получены графически представленные зависимости изменения величины угла отклонения РО в поперечной плоскости γ и длины выкопанной траншеи L_m за время моделирования (рис. 2, 3). Рассмотрев полученные графики, определено, что РО ЦТЭ отклоняется от вертикального положения значительно ($\gamma_{cp} = 1,42$ град). Максимальное значение отклонения РО от вертикального положения в поперечной плоскости составляет 7,8 град, такое отклонение превышает допустимые значения и результатом станет траншея, неудовлетворяющая требованиям проектной документации, СНиП и СП.

График изменение длины отрытой траншеи L_m за время моделирования говорит о линейной зависимости, которая получена в следствие того, что ЦТЭ без устройства управления перемещается с постоянной скоростью. С учетом заданных геометрических размеров траншеи (глубины и ширины), рассчитана производительность ЦТЭ за время моделирования, которую можно записать, как количество извлеченного грунта за время моделирования ($\Pi = 77,76$ м³/ч).

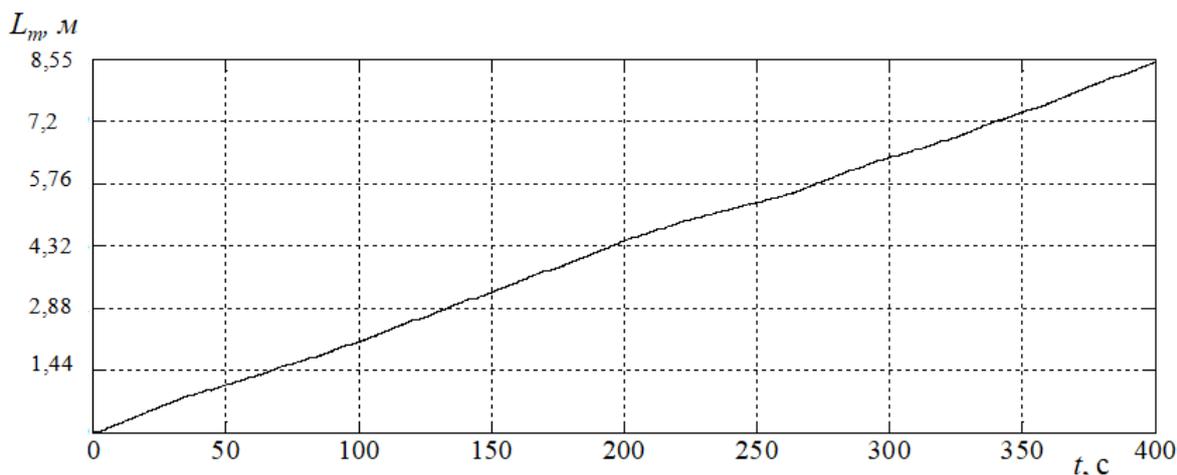


Рис. 6. Изменение длины траншеи, вырытой ЦТЭ, оснащенным УУ положением рабочего органа
 Fig. 6. Changing the length of the trench dug by the CHP, equipped with the control unit position of the working body

ставило 1,174 град. Геометрические параметры разработанной траншеи соответствуют требованиям проектной документации, СНиП и СП. Во время выполнении работ по принятому допущению глубина и ширина траншеи не изменяются и длина разработанной траншеи L_m за время моделирования дает представление о производительности ЦТЭ ($P=76,95 \text{ м}^3/\text{ч}$).

В результате использования усовершенствованного УУ получены результаты, удовлетворяющие требованиям проектной и технической документации.

Заключение.

Рассмотренные в статье исследования показывают возможность совмещения различных контуров управления, что положительно влияет на эффективность рабочего процесса землеройной машины. Для такого объединения можно комплексный критерий, который позволит одновременно учитывать влияние различных параметров на эффективность рабочего процесса ЦТЭ. Такой принцип способствует расширению возможности усовершенствования землеройных машин и строительной техники в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агапов, М. Е. Обеспечение точности геометрических размеров траншеи при строительстве трубопроводных объектов / М. Е. Агапов, В. В. Михеев, С. В. Савельев // Динамика систем, механизмов и машин. – 2019. - № 1. – С. 3-11. - URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41296202>.
2. Щербаков, В. С. Научные основы повышения точности работ, выполняемых землеройно-транспортными машинами : дис. ... д-ра техн. наук : 05.05.04 / В. С. Щербаков ; СибАДИ. – Омск, 2000. – 416 с.
3. Щербаков, В. С. Совершенствование системы управления рабочим органом цепного траншейного экскаватора : монография / В. С.

Щербаков, Р. Ю. Сухарев ; СибАДИ. - Омск : СибАДИ, 2011. – 149 с. URL: <https://lib.sibadi.org/katalog/epd303/>.

4. Lateral soil-pipeline interaction in sand back-fill: Effect of trench dimensions(Article) / Y. K. Chaloulos, G. D. Bouckovalas, S. D. Zervos, A. L. Zampas // Computers and Geotechnics. National Technical University of Athens. Zografou (Greece). - 2015. –Vol. 69, no. September 01. – Pp. 442-451.

5. Blouin, S., Hemami, A., Lipsett, M. Review of resistive force models for earthmoving processes / S. Blouin, A. Hemami, M. Lipsett // Journal of Aerospace Engineering. – 2001. - no. 814 (3). – Pp. 102-111.

6. Белов, А. И. Модернизация рабочего оборудования цепного траншейного экскаватора / А. И. Белов, Н. С. Черненко, Д. А. Гринь // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2017. – С. 2556-2563.

7. Титенко, В. В. Повышение производительности автогрейдера, выполняющего планировочные работы, совершенствованием системы управления : дис. ... канд. техн. наук : 05.05.04 / В. В. Титенко ; СибАДИ. - Омск : СибАДИ, 1997. – 172 с.

8. Устинов, А. В. Совершенствование скребкового грунтоборщника с целью повышения производительности бесковшового цепного траншекопателя : дис. ... канд.техн.наук / А. В. Устинов ; ТГАСУ. – Томск : ТГАСУ, 2006. – 168 с.

9. Чепелев, Н. И. Методика расчета оборудования цепного траншейного экскаватора, подтверждающая его безопасность / Н. И. Чепелев, С. Н. Орловский, А. Ю. Щекин // Современные проблемы землеустройства, кадастров и природообустройства. Материалы Национальной научной конференции. – 2019. – С. 308-313.

10. Жерновая, Н. А. Модернизация рабочего оборудования цепного траншейного экскаватора

на базе МТЗ 92П с целью увеличения его долговечности / Н. А. Жерновая, М. А. Романович // Образование. Наука. Производство. Материалы X Международного молодежного форума с международным участием. – 2018. – С. 1084-1086.

11. Yu Du. Virtual operator modeling method for excavator trenching / Yu Duan, Michael C. Dorneicha, Brian Steward // Automation in Construction. – 2016. – Р. 14-25. – <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.06.013>.

12. Han, S. Intelligent Agricultural Machinery and Field Robots / S. Han, B. L. Steward, L. Tang // In Precision Agriculture Technology for Crop Farming (Q. Zhang, Q., Ed.). CRC Press. – 2015. <http://dx.doi.org/10.1201/b19336-6>.

13. Шабалин А. Н. Модель взаимодействия гусеничного движителя с грунтом для моделирования дорожных и строительных машин Matlab

SimMechanics / А. Н. Шабалин. - Текст : непосредственный // Механизация строительства. - 2013. - № 9 (831). - С. 38-40. - URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21006890>.

14. Сухарев Р. Ю. Система автоматизации проектирования устройства управления гидрообъемной трансмиссией цепного траншейного экскаватора : монография / Р. Ю. Сухарев, М. В. Суковин ; СибАДИ. - Омск : СибАДИ, 2014. - 120 с. - URL: <https://lib.sibadi.org/katalog/ed2204>.

15. Щербаков, В. С. Методы управления комплектом машин трубоукладочной колонны : монография / В. С. Щербаков, А. Н. Шабалин, М. С. Корытов. – Омск : СибАДИ, 2014. – 152 с. - ISBN 978-5-93204-678-4

Maksim E. Agapov, Senior Lecturer, **Илья К. Потеряев**¹, C. Sc. in Engineering, Associate Professor
Siberian State Automobile and Highway University, Russia, 644080, Omsk, pr. Mira 5

*E-mail: agapov_me@mail.ru

COMPREHENSIVE CRITERION OF WORKING PROCESS EFFICIENCY CHAIN TRANCH EXCAVATOR

Abstract: *the article is devoted to the issue of increasing the efficiency of earth-moving machines by combining the control loops of various processes through the formation of a complex criterion that allows one to evaluate the simultaneous influence of various parameters on the efficiency of the working process of an earth-moving machine using the example of a chain trench excavator. The working process of a chain trench excavator with an automated device for controlling the position of the working body in the transverse plane is considered. The contours of control of the position of the working body in the transverse plane and the speed of movement of the chain trench excavator corresponding to the considered work process are presented. As a result, the factors influencing the efficiency of the working process are considered and the efficiency criterion is substantiated, which makes it possible to determine the optimal parameters of the operating body control device in the transverse plane. The result of the research was the analysis of the compiled simulation model of the working process and the theoretical research carried out. Any model is a kind of dependence representing the output value on the input input. The need to improve the device for controlling the position of the working body in the transverse plane has been confirmed; it should be confirmed by comparing the values of the output parameters of the investigated mathematical model with and without using the device for controlling the position of the working body of a chain trench excavator in the transverse plane.*

Keywords: *chain trench excavator, complex performance criterion, simulation model study, mathematical model.*

Article info: received February 17, 2021
DOI: 10.26730/1816-4528-2021-2-48-54

REFERENCES

1. Agapov, M. E. Ensuring the accuracy of the geometrical dimensions of the trench during the construction of pipeline facilities. / M. E. Agapov, V. V. Miheev, S. V. Savel'ev // Dinamika sistem, mekhanizm i mashin. – 2019. – № 1. – 3-11 p. - URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41296202>.

2. SHCHerbakov, V. S. Scientific basis for increasing the accuracy of work performed by earth-

moving machines : dis. ... d-ra tekhn. nauk : 05.05.04 / V. S. SHCHerbakov ; SibADI. – Omsk, 2000. – 416 p.

3. SHCHerbakov, V. S. Improvement of the control system of the working body of the chain trench excavator : monograph / V. S. SHCHerbakov, R. YU. Suharev ; SibADI. – Omsk : SibADI, 2011. – 149 p. URL: <https://lib.sibadi.org/katalog/epd303/>.

4. Lateral soil-pipeline interaction in sand backfill: Effect of trench dimensions (Article) / Y. K. Chaloulos, G. D. Bouckovalas, S. D. Zervos, A. L. Zampas // *Computers and Geotechnics*. National Technical University of Athens. Zografou (Greece). – 2015. – Vol. 69, no. September 01. – Pp. 442-451.
5. Blouin, S., Hemami, A., Lipsett, M. Review of resistive force models for earthmoving processes / S. Blouin, A. Hemami, M. Lipsett // *Journal of Aerospace Engineering*. – 2001. – no. 814 (3). – Pp. 102-111.
6. Belov, A. I. Modernization of the working equipment of the chain trench excavator / A. I. Belov, N. S. CHernenko, D. A. Grin' // *Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferenciya molodyh uchenyh BGTU im. V. G. SHuhova*. – 2017. – Pp. 2556-2563.
7. Titenko, V. V. Improving the performance of the grader performing grading work by improving the control system : dis. ... kand. tekhn. nauk : 05.05.04 / V. V. Titenko ; SibADI. - Omsk : SibADI, 1997. – 172 p.
8. Ustinov, A. V. Improvement of the scraper soil plow to increase the productivity of the bucket chain trencher : dis. ... kand. tekhn. nauk / A. V. Ustinov ; TGASU. – Tomsk : TGASU, 2006. – 168 p.
9. CHepelev, N. I. Methodology for calculating the equipment of a chain trench excavator, confirming its safety / N. I. CHepelev, S. N. Orlovskij, A. YU. SHCHekin // *Sovremennye problemy zemleustrojstva, kadastron i prirodobustrojstva. Materialy Nacional'noj nauchnoj konferencii*. – 2019. – Pp. 308-313.
10. ZHernovaya, N. A. Modernization of the working equipment of a chain trench excavator

Библиографическое описание статьи

Агапов М.Е., Потеряев И.К. Комплексный критерий эффективности рабочего процесса цепного траншейного экскаватора // *Горное оборудование и электромеханика* – 2021. – № 2 (154). – С. 48-54.

based on MTZ 92P in order to increase its durability / N. A. ZHernovaya, M. A. Romanovich // *Obrazovanie. Nauka. Proizvodstvo. Materialy X Mezhdunarodnogo molodezhnogo foruma s mezhdunarodnym uchastiem*. – 2018. – Pp. 1084-1086.

11. Yu Du. Virtual operator modeling method for excavator trenching / Yu Dua, Michael C. Dorneicha, Brian Steward // *Automation in Construction*. – 2016. – P. 14-25. – <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.06.013>.

12. Han, S. Intelligent Agricultural Machinery and Field Robots / S. Han, B. L. Steward, L. Tang // *In Precision Agriculture Technology for Crop Farming (Q. Zhang, Q., Ed.)*. CRC Press. – 2015. <http://dx.doi.org/10.1201/b19336-6>.

13. SHabalin A. N. Model of the interaction of a tracked propeller with the ground for modeling road and construction vehicles Matlab SimMechanics / A. N. SHabalin. - Tekst : neposredstvennyj // *Mekhanizaciya stroitel'stva*. - 2013. - № 9 (831). - Pp. 38-40. - URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21006890>.

14. Suharev R. YU. Design Automation System for Hydrostatic Transmission Control Device of Chain Trench Excavator: Monograph / R. YU. Suharev, M. V. Sukovin ; SibADI. - Omsk : SibADI, 2014. – 120 p. – URL: <https://lib.sibadi.org/katalog/ed2204>.

15. SHCHerbakov, V. S. Methods for managing a set of pipe-laying machines: monograph / V. S. SHCHerbakov, A. N. SHabalin, M. S. Korytov. – Omsk : SibADI, 2014. – 152 p. - ISBN 978-5-93204-678-4

Reference to article

Agapov M.E., Poteryaev I.K. Comprehensive criterion of working process efficiency chain trench excavator. *Mining Equipment and Electromechanics*, 2021, no.2 (154), pp. 48-54.