

Научная статья
УДК 621.879.064
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-688-698>

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОПАНИЯ ГРУНТА СФЕРИЧЕСКИМ КОВШОМ ЭКСКАВАТОРА

Г.Г. Бурый

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ),
г. Омск, Россия
buryu1989@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5008-9176>

АННОТАЦИЯ

Введение. В статье приведена новая конструкция ковша одноковшового гидравлического экскаватора, позволяющая увеличить производительность данных машин. Увеличение производительности достигается за счет установки ковшей большего объема без изменения характеристик гидропривода. Целью представленной работы является подбор объема сферического ковша для осуществления процесса копания. Задачей исследований является получение зависимостей скоростей ковша и грунта от параметров процесса копания. Подбор объема сферического ковша позволит определить, насколько он может быть увеличен по сравнению с объемом серийного ковша для осуществления процесса копания.

Материалы и методы. Процесс копания новым ковшом был рассмотрен в виде двухмассовой реологической модели Кельвина–Фойгта. Данная модель была описана системой дифференциальных уравнений второго порядка. В системе решалась задача Коши, что позволило определить общее решение уравнения, удовлетворяющего двум уравнениям системы. В итоге были определены производные от перемещений ковша и грунта, которые есть не что иное, как скорости ковша и грунта.

Результаты. Решение приведенной системы позволило получить зависимости скоростей ковша и масс грунта от параметров процесса копания. Осуществление процесса копания возможно при положительных значениях скоростей. При подстановке в зависимости параметров процесса при условии положительности скоростей можно определить объем сферического ковша.

Практическое значение. Для упрощения и применения на практике полученных зависимостей был составлен алгоритм для расчета объема сферического ковша. Представленный алгоритм может быть реализован в программе для ЭВМ.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: математическая модель, грунт, копание, экскаватор, ковш, дифференциальные уравнения, сила сопротивления копанию, сила гидроцилиндра, масса грунта, объема ковша

БЛАГОДАРНОСТЬ. Автор выражает благодарность рецензентам данной работы.

Статья поступила в редакцию 28.10.2021; одобрена после рецензирования 15.11.2021; принята к публикации 14.12.2021.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Бурый Г.Г. Математическая модель копания грунта сферическим ковшом экскаватора // Вестник СибАДИ. 2021. Т.18, № 6(82). С. 688-698. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-688-698>

© Бурый Г.Г., 2021



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-688-698>

MATHEMATICAL MODEL OF SOIL DIGGING SPHERICAL EXCAVATOR BUCKET

Grigoriy G. Buriy

Siberian State Automobile and Highway University, Omsk, Russia
buryy1989@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5008-9176>

ABSTRACT

Introduction. The article presents a new design of a bucket of a single bucket hydraulic excavator, which allows you to increase the performance of these machines. Increased efficiency is achieved due to the installation of buckets of larger volume without changing characteristics of hydraulic drive. The purpose of the presented work is to select the volume of the spherical ladle for the digging process. The task of research is to obtain the dependencies of ladle and soil speeds on the parameters of the digging process. Selecting the volume of the spherical ladle will determine how much it can be increased compared to the volume of the serial ladle to carry out the digging process.

Materials and methods. The process of digging a new bucket was considered in the form of a two-scale Kelvin-Voigt rheology model. This model was described by a system of second-order differential equations. The system solved the Cauchy problem, which made it possible to determine the general solution of the equation satisfying the two equations of the system. As a result, derivatives from ladle and soil movements were determined, which are nothing more than ladle and soil speeds.

Results. The solution of the above system made it possible to obtain dependencies of ladle speeds and soil masses on parameters of the digging process. The digging process is possible at positive speed values. When substituting depending on the process parameters under the condition of velocity positivity, you can determine the volume of the spherical ladle.

Practical significance. To simplify and put into practice the obtained dependencies, an algorithm was compiled to calculate the volume of the spherical ladle. The presented algorithm can be implemented in a computer program.

KEYWORDS: mathematical model, soil, digging, excavator, ladle, differential equations, force of resistance to digging, force of hydraulic cylinder, mass of soil, volume bucket.

The article was submitted 28.10.2021; approved after reviewing 15.11.2021; accepted for publication 14.12.2021.

The authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation: Buriy G. G. Mathematical model of soil digging spherical excavator bucket . The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2021; 18 (6): 688-698. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-688-698>

© Buriy G.G., 2021



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1. Рассмотрена конструкция нового ковша одноковшового гидравлического экскаватора. Приведено ее преимущество по сравнению с серийной версией.

2. Рассмотрена схема и модель процесса копания грунта новым ковшом.

3. Приведено решение модели процесса копания, представленное в виде системы дифференциальных уравнений второго порядка. Результатом решения стали зависимости скоростей ковша и грунта от параметров процесса.

4. Представлен алгоритм подбора объема нового ковша в соответствии с параметрами процесса копания.

ВВЕДЕНИЕ

Разработка грунта на сегодняшний день является востребованной операцией в сфере строительства и эксплуатации инженерных сооружений, а также при добыче полезных ископаемых. Основной машиной для проведения данной операции является одноковшовый гидравлический экскаватор. Для выполнения соответствующих операций, будь то строительство здания или разработка карьера, используется определенное количество данных машин. Количество используемых одноковшовых гидравлических экскаваторов напрямую зависит от производительности данных машин, которая зависит от объема ковша. Для возможности установки на экскаватор ковша

большого объема была разработана его новая конструкция, названная «сферической» по форме конструкции. Целью представленной работы является подбор объема сферического ковша для осуществления процесса копания. Объектом исследования в работе является процесс копания грунта сферическим ковшом. Предметом исследования в работе является математическое описание процесса копания грунта сферическим ковшом. Задачей исследований является получение зависимостей скоростей ковша и грунта от параметров процесса копания.

Рассмотрим конструкцию сферического ковша (рисунок 1).

Ось поворота ковша крепится к рукояти, сама же сферическая конструкция поворачивается вокруг оси гидроцилиндром поворота ковша. Траектория движения сферической конструкции позволяет снизить значение силы сопротивления копанию по сравнению с силой сопротивления, действующей на ковши стандартных конструкций. Снижение сил сопротивления копанию позволит использовать ковши большего объема при неизменных характеристиках гидропривода, что приведет к изъятию большего объема грунта за цикл работы экскаватора. Для подтверждения гипотезы о сокращении сил сопротивления копанию грунта сферическим ковшом необходимо математическое исследование данного процесса, итогом которого должна стать зависимость скорости копания грунта сферическим ковшом от известных параметров [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8].

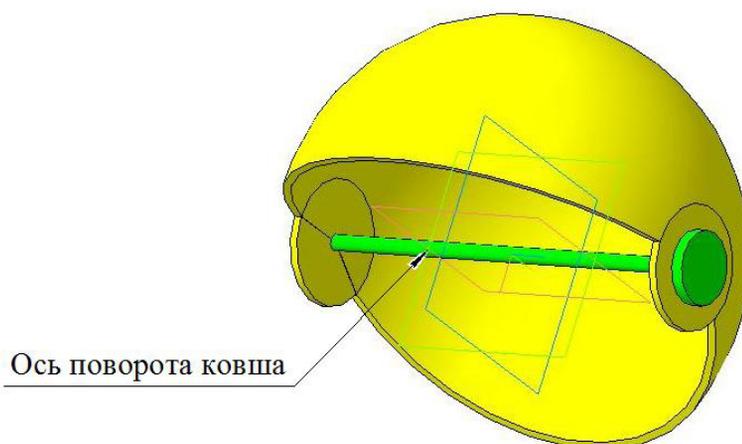


Рисунок 1 – Ковш сферической формы

Figure 1 – Spherical bucket

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Рассмотрим в разрезе расчётную схему процесса внедрения сферического ковша в грунт, представленную на рисунке 2.

На рисунке 2 приведены обозначения следующих параметров: m_1 – масса сферического ковша, кг; m_2 – масса грунта, перемещающегося перед кромкой ковша, кг; m_3 – масса грунта, перемещающегося за счет сил трения, кг; F_1 – сила гидроцилиндра поворота ковша, Н; F_2 – сила сопротивления грунта массой m_2 , Н; F_3 – сила сопротивления грунта массой m_3 , Н; h_3 – толщина массы грунта m_3 , м; R – внутренний радиус ковша, м; B – толщина стенки ковша, м; φ – угол поворота ковша, рад.

Массу грунта m_3 можно определить по формуле

$$m_3 = \rho \cdot \varphi \cdot 0,67 \cdot \left(2h_3^3 + 6R^2h_3 + 3B^2h_3 + 3Bh_3^2 + 6RBh_3 \right), \quad (1)$$

где ρ – плотность грунта, кг/м³; φ – угол поворота ковша, рад; R – внутренний радиус ковша, м; h_3 – толщина бокового грунта, м; B – толщина стенки ковша, м.

Объем нового ковша определим по формуле

$$V = 2,1 \cdot R^3. \quad (2)$$

Процесс копания на рисунке 2 представляет собой вовлечение в движение с ковшом масс грунта m_2 , m_3 , определение которых будет являться задачей дальнейших исследований. Изучение силы F_2 планируется в последующих исследованиях, сила F_2 постоянна. Сила F_3 – параметр, изменяющийся во времени, изучение которого планируется в последующих исследованиях. Сила гидроцилиндра поворота ковша F_1 затрачивается на преодоление силы F_3 сопротивления грунта массой m_3 , силы F_2 сопротивления грунта массой m_2 [9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17].

При составлении расчетной схемы, показанной на рисунке 2, были приняты следующие допущения:

- 1) массы $m_1 + m_2$, m_3 являются элементами с сосредоточенными параметрами;
- 2) ковш внедряется в горизонтальную поверхность грунта;
- 3) максимальная толщина копания равна R ;
- 4) масса $m_1 + m_2$ принимается как абсолютно жесткое тело;
- 5) силы F_1 и F_2 неизменны на протяжении процесса внедрения;
- 6) масса $m_1 + m_2$ неизменна на протяжении процесса внедрения;

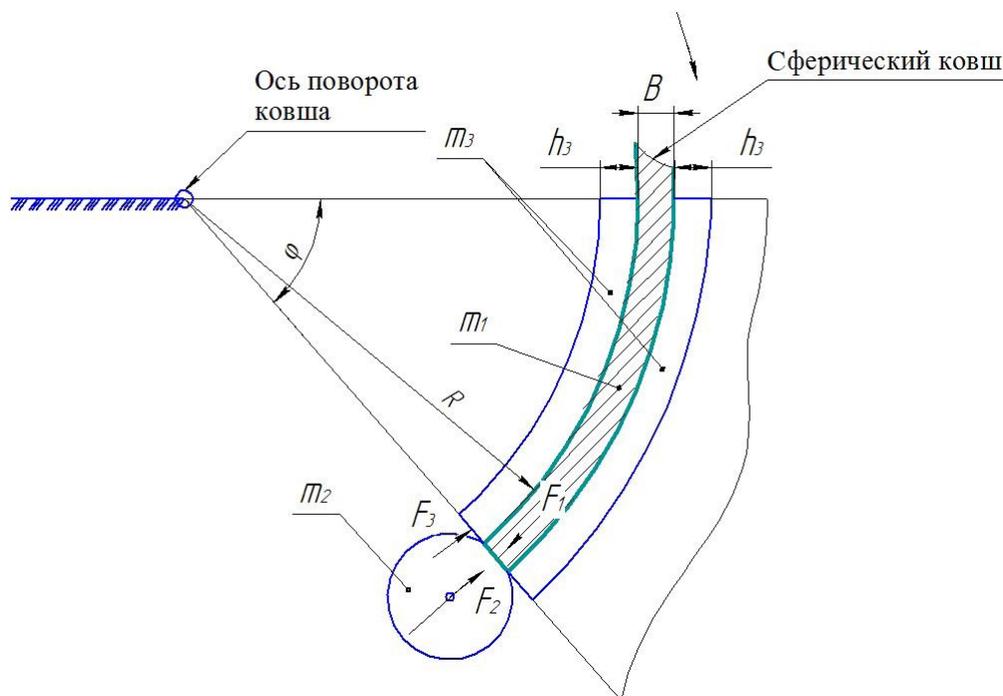


Рисунок 2 – Расчётная схема процесса копания грунта сферическим ковшом

Figure 2 – Calculation diagram of soil digging process by spherical bucket

7) масса грунта m_3 представляется упруго-вязкой однородно-сжимаемой средой. Математическое описание процесса внедрения ковша в грунт рассмотрим в виде реологической модели Кельвина–Фойгта, представленной на рисунке 3.

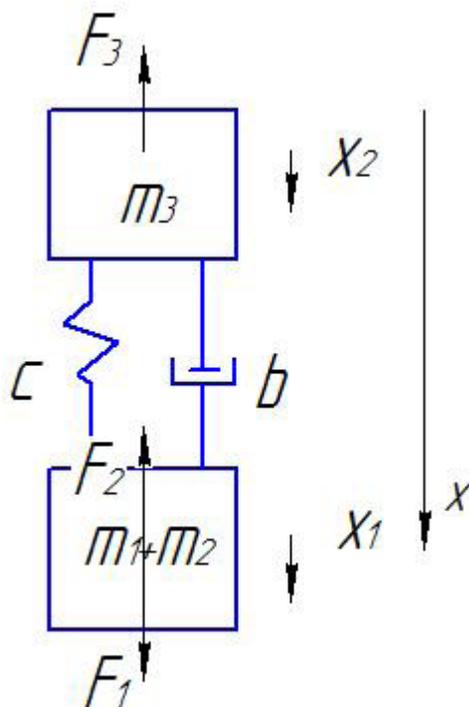


Рисунок 3 – Реологическая модель процесса внедрения ковша в грунт

Figure 3 – Rheological model of ladle introduction into soil

На рисунке 3, помимо масс m_1+m_2 и m_3 , представлены следующие обозначения: x_1 – перемещения грунта массой m_1+m_2 , м; x_2 – перемещения грунта массой m_3 , м; b – коэффициент вязкого трения грунта, Н·с/м; c – коэффициент жесткости грунта, Н/м; t – время, с.

Опишем системой уравнений (3) и (4) процесс копания грунта сферическим ковшом¹ [18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25]:

$$\left\{ \begin{array}{l} (m_1 + m_2) \cdot \ddot{x}_1 + b \cdot (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + c \cdot (x_1 - x_2) = F_1 - F_2 \\ m_3 \cdot \ddot{x}_2 + b \cdot (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + c \cdot (x_2 - x_1) = -F_3 \end{array} \right. \quad (3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} (m_1 + m_2) \cdot \ddot{x}_1 + b \cdot (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + c \cdot (x_1 - x_2) = F_1 - F_2 \\ m_3 \cdot \ddot{x}_2 + b \cdot (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + c \cdot (x_2 - x_1) = -F_3 \end{array} \right. \quad (4)$$

Сложим левые и правые части уравнений (3) и (4) и определим \ddot{x}_1 :

$$\ddot{x}_1 = \frac{-m_3 \cdot \ddot{x}_2 + F_1 - F_2 - F_3}{(m_1 + m_2)} \quad (5)$$

Проинтегрируем выражение (5) по времени t и получим выражения (6) и (7):

¹Тарасик В.П. Математическое моделирование технических систем/ В.П. Тарасик. Мн.: Дизайн ПРО, 2004. 640 с.

$$\dot{x}_1 = \frac{-m_3 \cdot \dot{x}_2 + F_1 \cdot t - F_2 \cdot t - F_3 \cdot t + C_1}{(m_1 + m_2)} ; \quad (6)$$

$$x_1 = \frac{-m_3 \cdot x_2 + 0,5 \cdot F_1 \cdot t^2 - 0,5 \cdot F_2 \cdot t^2 - 0,5 \cdot F_3 \cdot t^2 + C_1 \cdot t + C_2}{(m_1 + m_2)} . \quad (7)$$

Подставляя в выражения (6) и (7) начальные условия при $t=0$, $x_1(0) = 0$, $x_2(0) = 0$, $\dot{x}_1(0) = 0$, $\dot{x}_2(0) = 0$, получим, что $C_1=0$, $C_2=0$.

Подставим выражения (5), (6) и (7) в уравнение (3), получим

$$\begin{aligned} & -m_3 \cdot \ddot{x}_2 - F_3 + b \cdot \left(-\frac{m_3 \cdot \dot{x}_2}{(m_1 + m_2)} - \dot{x}_2 \right) + b \cdot \left(\frac{F_1 \cdot t - F_2 \cdot t - F_3 \cdot t + C_1}{(m_1 + m_2)} \right) + \\ & + c \cdot \left(\frac{-m_3 \cdot x_2}{(m_1 + m_2)} - x_2 \right) + \\ & + c \cdot \left(\frac{0,5 \cdot F_1 \cdot t^2 - 0,5 \cdot F_2 \cdot t^2 - 0,5 \cdot F_3 \cdot t^2 + C_1 \cdot t + C_2}{(m_1 + m_2)} \right) = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} & -m_3 \cdot \ddot{x}_2 - b \cdot \dot{x}_2 \cdot \left(\frac{m_3 + m_1 + m_2}{(m_1 + m_2)} \right) - c \cdot x_2 \cdot \left(\frac{m_3 + m_1 + m_2}{(m_1 + m_2)} \right) \\ & = -b \cdot \left(\frac{F_1 \cdot t - F_2 \cdot t - F_3 \cdot t + C_1}{(m_1 + m_2)} \right) - c \cdot \left(\frac{0,5 \cdot F_1 \cdot t^2 - 0,5 \cdot F_2 \cdot t^2 - 0,5 \cdot F_3 \cdot t^2 + C_1 \cdot t + C_2}{(m_1 + m_2)} \right) + F_3 \end{aligned} \quad (9)$$

Полное решение уравнения (9) будет складываться из общего решения x_2^0 , описывающего свободные колебания системы и частного решения x_2^* , которое описывает вынужденные колебания системы.

Определим общее решение для однородного уравнения

$$-m_3 \cdot \ddot{x}_2 - b \cdot \dot{x}_2 \cdot \left(\frac{m_3 + m_1 + m_2}{(m_1 + m_2)} \right) - c \cdot x_2 \cdot \left(\frac{m_3 + m_1 + m_2}{(m_1 + m_2)} \right) = 0 . \quad (10)$$

Приведем уравнение (10) к характеристическому виду где z корень уравнения

$$A \cdot z^2 + B \cdot z + C = 0 ; \quad (11)$$

$$A = -m_3 ; \quad (12)$$

$$B = -b \cdot \left(\frac{m_3 + m_1 + m_2}{(m_1 + m_2)} \right) ; \quad (13)$$

$$C = -c \cdot \left(\frac{m_3 + m_1 + m_2}{(m_1 + m_2)} \right). \quad (14)$$

Получим следующие корни уравнения (11):

$$z_1 = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}; \quad (15)$$

$$z_2 = \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}. \quad (16)$$

Общее решение уравнения (9) запишем в виде

$$x_2^0 = U_1 \cdot e^{z_1 \cdot t} + U_2 \cdot e^{z_2 \cdot t}. \quad (17)$$

Для определения постоянных U_1 и U_2 продифференцируем выражение (17):

$$\dot{x}_2^0 = z_1 \cdot U_1 \cdot e^{z_1 \cdot t} + z_2 \cdot U_2 \cdot e^{z_2 \cdot t}. \quad (18)$$

Подставим в выражения (17) и (18) начальные условия $x_2(0)=0$; $\dot{x}_2(0)=0$ таким образом, получим что $U_1=0$, $U_2=0$. Таким образом, общее решение уравнения (9) равно 0.

Подберем частное решение уравнения (9) и запишем его в виде выражения (19) с коэффициентами M , N и L :

$$x_2^* = Mt^2 + Nt + L. \quad (19)$$

Найдем производные выражения (19):

$$\dot{x}_2 = 2Mt + N; \quad (20)$$

$$\ddot{x}_2 = 2M. \quad (21)$$

Подставим выражения (19), (20) и (21) в уравнение (9) и получим

$$\begin{aligned} & -m_3 \cdot 2M - b \cdot 2Mt \cdot \left(\frac{m_3 + m_1 + m_2}{(m_1 + m_2)} \right) - b \cdot N \cdot \left(\frac{m_3 + m_1 + m_2}{(m_1 + m_2)} \right) - \\ & - c \cdot Mt^2 \cdot \left(\frac{m_3 + m_1 + m_2}{(m_1 + m_2)} \right) - \\ & - c \cdot Nt \cdot \left(\frac{m_3 + m_1 + m_2}{(m_1 + m_2)} \right) - c \cdot L \cdot \left(\frac{m_3 + m_1 + m_2}{(m_1 + m_2)} \right) \\ & = -b \cdot \left(\frac{F_1 \cdot t - F_2 \cdot t - F_3 \cdot t + C_1}{(m_1 + m_2)} \right) - \\ & - c \cdot \left(\frac{0,5 \cdot F_1 \cdot t^2 - 0,5 \cdot F_2 \cdot t^2 - 0,5 \cdot F_3 \cdot t^2 + C_1 \cdot t + C_2}{(m_1 + m_2)} \right) + F_3 \end{aligned} \quad (22)$$

Преобразуем уравнение (22):

$$\begin{aligned}
 & -c \cdot M \cdot \left(\frac{m_3 + m_1 + m_2}{(m_1 + m_2)} \right) \cdot t^2 - (2b \cdot M + c \cdot N) \cdot \left(\frac{m_3 + m_1 + m_2}{(m_1 + m_2)} \right) \cdot t - \\
 & -m_3 \cdot 2M - c \cdot L \cdot \left(\frac{m_3 + m_1 + m_2}{(m_1 + m_2)} \right) - b \cdot N \cdot \left(\frac{m_3 + m_1 + m_2}{(m_1 + m_2)} \right) \quad (23) \\
 & = -\frac{0,5 \cdot c \cdot (F_1 - F_2 - F_3)}{m_1 + m_2} \cdot t^2 - \frac{(b \cdot (F_1 - F_2 + F_3) + c \cdot C_1)}{m_1 + m_2} \cdot t - \frac{(b \cdot C_1 + c \cdot C_2)}{m_1 + m_2} + F_3
 \end{aligned}$$

Неизвестные коэффициенты M, N и L удовлетворяют системе уравнений

$$\left\{ \begin{aligned}
 & -c \cdot M \cdot \left(\frac{m_3 + m_1 + m_2}{(m_1 + m_2)} \right) = -\frac{0,5 \cdot c \cdot (F_1 - F_2 - F_3)}{m_1 + m_2} \quad (24)
 \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned}
 & -(2b \cdot M + c \cdot N) \cdot \left(\frac{m_3 + m_1 + m_2}{(m_1 + m_2)} \right) = -\frac{(b \cdot (F_1 - F_2 + F_3) + c \cdot C_1)}{m_1 + m_2} \quad (25)
 \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned}
 & -m_3 \cdot 2M - c \cdot L \cdot \left(\frac{m_3 + m_1 + m_2}{(m_1 + m_2)} \right) - b \cdot N \cdot \left(\frac{m_3 + m_1 + m_2}{(m_1 + m_2)} \right) = -\frac{(b \cdot C_1 + c \cdot C_2)}{m_1 + m_2} + F_3 \quad (26)
 \end{aligned} \right.$$

Из уравнения (24) определим M:

$$M = \frac{0,5 \cdot (F_1 - F_2 - F_3)}{m_1 + m_2 + m_3} \quad (27)$$

Подставим выражение (27) в уравнение (25) и определим N:

$$N = \frac{C_1}{m_1 + m_2 + m_3} \quad (28)$$

Подставим выражения (27) и (28) в уравнение (26) и определим L:

$$L = \frac{C_2}{m_1 + m_2 + m_3} - \frac{F_3 \cdot (m_1 + m_2)}{c \cdot (m_1 + m_2 + m_3)} - \frac{m_3 \cdot (F_1 - F_2 - F_3) \cdot (m_1 + m_2)}{c \cdot (m_1 + m_2 + m_3)^2} \quad (29)$$

Таким образом, частное решение уравнения (9) запишем в виде

$$\begin{aligned}
 x_2^* = & \frac{0,5 \cdot (F_1 - F_2 - F_3)}{m_1 + m_2 + m_3} t^2 + \frac{C_1}{m_1 + m_2 + m_3} t + \frac{C_2}{m_1 + m_2 + m_3} - \\
 & - \frac{F_3 \cdot (m_1 + m_2)}{c \cdot (m_1 + m_2 + m_3)} - \frac{m_3 \cdot (F_1 - F_2 - F_3) \cdot (m_1 + m_2)}{c \cdot (m_1 + m_2 + m_3)^2} \quad (30)
 \end{aligned}$$

Запишем полное решение уравнения (9)

$$x_2 = \frac{0,5 \cdot (F_1 - F_2 - F_3)}{m_1 + m_2 + m_3} t^2 - \frac{F_3 \cdot (m_1 + m_2)}{c \cdot (m_1 + m_2 + m_3)} - \frac{m_3 \cdot (F_1 - F_2 - F_3) \cdot (m_1 + m_2)}{c \cdot (m_1 + m_2 + m_3)^2} \quad (31)$$

Чтобы найти скорость массы грунта m_3 , продифференцируем выражение (31) по времени

$$\dot{x}_2 = \frac{F_1 - F_2 - F_3}{m_1 + m_2 + m_3} \cdot t \quad (32)$$

Подставляя выражение (32) в выражение (6), получим скорость масс $m_1 + m_2$:

$$\dot{x}_1 = \frac{(1 - m_3) \cdot (F_1 - F_2 - F_3) \cdot t}{(m_1 + m_2) \cdot (m_1 + m_2 + m_3)} \quad (32)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ

Полученные зависимости (32) и (33) можно применить для определения объема V нового ковша при реализации процесса копания сферическим ковшом. Блок-схема алгоритма определения объема V представлена на рисунке 4.

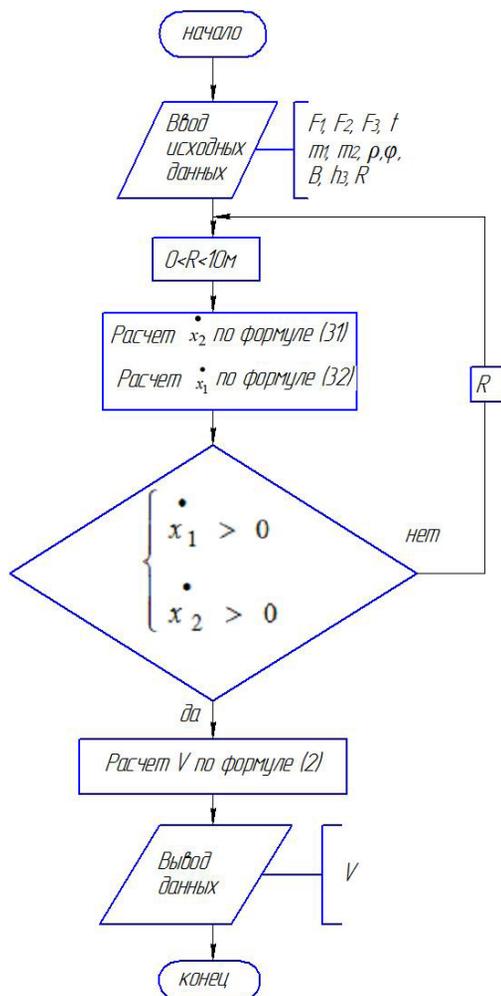


Рисунок 4 – Блок-схема алгоритма определения объема V

Figure 4 – Flowchart for volume determination V

Суть работы с алгоритмом, блок-схема которого представлена на рисунке 4, заключается в следующем: задаются исходные данные, в том числе и радиус ковша R , по которым

рассчитываются значения скоростей \dot{x}_1 и \dot{x}_2 . Затем при соблюдении условий положитель-

ных значений \dot{x}_1 и \dot{x}_2 правильно подобранный радиус R подставляется в формулу для определения объема нового ковша V . Если условия не выполнены, тогда в формулы подставляется другое значение R из диапазона от 0 до 10 м, до тех пор пока условия не будут выполнены и не будет подобран радиус R . При невыполнении условий расчет проводится повторно, до тех пор пока условия не будут выполнены. Данный алгоритм для практического применения может быть реализован в программе для ЭВМ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный в работе алгоритм расчета оптимального объема сферического ковша может быть использован на практике следующим образом. В организации присутствует экскаватор с серийным ковшом. Изначально известна сила F_1 , создаваемая гидроцилиндром поворота ковша, а также другие параметры процесса. Определение некоторых из них планируется в дальнейших исследованиях, а именно F_2 , F_3 , m_2 , h_3 . Принимается фиксированная толщина B ковша, значение его радиуса R , по которым рассчитывается его масса m_1 . Плотность грунта ρ принимается для наиболее тяжело разрабатываемого грунта. Угол поворота ковша ϕ принимается менее 90° , так как именно при таких его значениях силы сопротивления копанию максимальны. Алгоритм позволит подобрать объем сферического ковша, который будет больше, чем у серийного ковша. Сферический ковш с рассчитанным объемом можно будет установить на рассматриваемый экскаватор, что повысит производительность машины.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лукашук О.А. Закономерности формирования режимных параметров главных механизмов карьерного экскаватора в процессе экскавации горных пород // Горное оборудование и электромеханика. 2019. № 3 (143). С. 14–17.
2. Баловнев В.И., Данилов Р.Г., Улитич О.Ю. Исследование управляемых ножевых систем землеройно-транспортных машин // Строительные и дорожные машины. 2017. № 2. С. 12–15.

3. 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. №5. С. 1-15.
4. 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. №3. С. 119-126.
5. 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. С. 103-112.
6. Xu G. High-gain observer-based sliding mode control for hydraulic excavators/ Xu G., Yu Z., Lu N., Lyu G.// *Harbin Gongcheng Daxue Xuebao*. 2021. T. 42. №6. С. 885-892.
7. Yu Y. Energy saving of hybrid hydraulic excavator with innovative powertrain/ Yu Y., Do T.C., Park Y., Ahn K.K.// *Energy Conversion and Management*. 2021. T. 244.
8. Dao H.V. High accuracy contouring control of an excavator for surface flattening tasks based on extended state observer and task coordinate frame approach/ Dao H.V., Nguyen D.G., Ahn K.K., Na S.// *Automation in Construction*. 2021. T. 130.
9. Бурый Г.Г., Потеряев И.К., Скобелев С.Б., Ковалевский В.Ф. Исследование сил сопротивления резанию на новой конструкции ковша гидравлического экскаватора // *Горное оборудование и электромеханика*. 2019. № 2 (142). С. 46–51.
10. Бурый Г.Г., Потеряев И.К., Скобелев С.Б., Ковалевский В.Ф. Сравнение процесса копания стандартным ковшом экскаватора и ковшом новой конструкции // *Горное оборудование и электромеханика*. 2020. № 1(147). С. 37–44.
11. Баловнев В.И., Данилов Р.Г., Улитич О.Ю. Стенд для исследования процессов взаимодействия со средой рабочих органов дорожно-строительных машин // *Строительные и дорожные машины*. 2020. № 8. С. 3–15.
12. Берестов Е.И. Влияние трения грунта по поверхности ножа на сопротивление резанию // *Строительные и дорожные машины*. 2010. № 11. С. 34–38.
13. Сёмкин Д.С. О влиянии скорости рабочего органа на силу сопротивления резанию грунта // *Вестник СибАДИ*. 2017. № 1. С. 37–43.
14. Николаев В.А. Анализ взаимодействия кромки лезвия консольного ножа с грунтом // *Вестник СибАДИ*. 2020. № 2. С. 172–181.
15. Тарасов М.А. Моделирование параметров функционирования выемочной машины с вибрационным воздействием на горные породы // *Устойчивое развитие горных территорий*. 2019. Т. 11, № 1(39). С. 85–97.
16. Трояновская И.П., Разношинская А.В., Козьминых В.А., Лещенко Е.А. Экспериментальные исследования процесса промышленного рыхления грунта // *Горный журнал*. 2021. № 5. С. 87–90.
17. Кузнецов И.С. Теоретические исследования процесса взаимодействия резца фрезерного рабочего оборудования экскаватора с грунтом // *Вестник СибАДИ*. 2021. Т. 18, № 1 (77). С. 42–50.
18. Константинов Ю.В. Методика расчёта сопротивления и момента сопротивления резанию почвы прямым пластинчатым ножом фрезы // *Тракторы и сельхозмашины*. 2019. № 5. С. 31–39.
19. Николаев В.А. Определение скорости цепей и размеров пласта грунта, отрезаемого ковшом агрегата для удаления верхнего слоя грунта с подстилающего слоя автодороги // *Вестник СибАДИ*. 2020. № 1. С. 32–43.
20. Николаев В.А. Затраты энергии на резание грунта ковшами агрегата непрерывного действия для формирования подстилающего слоя автодороги // *Вестник СибАДИ*. 2020. № 6. С. 676–688.
21. Шабанова Г.И., Савельев С.В., Бурый Г.Г. Математическое описание колебательной системы «вибрационный рабочий орган-грунт» // *Вестник СибАДИ*. 2013. №3 (31). С. 102–107.
23. Тарасик В.П. Физические основы процесса демпфирования колебаний в системе подвески автомобиля // *Вестник Белорусско-Российского университета*. 2019. № 1(62). С. 62–77.
24. Зеньков С.А., Минеев Д.А. Определение кинематических параметров ковша экскаватора // *Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство*. 2019. № 3. С. 30–33.
25. Tan N.D. Dynamic simulation of a hydraulic excavator to determine the joint reaction forces of boom, stick, bucket, and driving forges of hydraulic cylinders/ Tan N.D.// *Inzynieria Mineralna*. 2020. T. 1. №1. С. 131-137.

REFERENCES

1. Lukashuk O.A. Zakonomernosti formirovaniya rezhimnyh parametrov glavnyh mehanizmov kar'ernogo jekskavatora v processe jekskavacii gornyh porod [Patterns of formation of regime parameters of the main mechanisms of the quarry excavator in the process of excavation of rocks]//*Mining equipment and electromechanics*. 2019. 3 (143): 14-17.
2. Balovnev V.I., Danilov R.G., Ulitich O.Yu. Issledovanie upravlyaemyh nozhevyyh sistem zemlerojno-transportnyh mashin [Study of controlled knife systems of earth-moving vehicles]//*Construction and road machines*. 2017. 2: 12-15.
3. 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. 5: 1-15.
4. Choudhary B.S. Effect of blast induced rock fragmentation and muckpile angle on excavator performance in surface mines//*Mining of Mineral Deposits*. 2019. 3: 119-126.
5. 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. 112: 103-112.

6. Xu G. High-gain observer-based sliding mode control for hydraulic excavators/ Xu G., Yu Z., Lu N., Lyu G.// *Harbin Gongcheng Daxue Xuebao*. 2021. 6: 885-892.
7. Yu Y. Energy saving of hybrid hydraulic excavator with innovative powertrain/ Yu Y., Do T.C., Park Y., Ahn K.K.// *Energy Conversion and Management*. 2021. 244.
8. Dao H.V. High accuracy contouring control of an excavator for surface flattening tasks based on extended state observer and task coordinate frame approach/ Dao H.V., Nguyen D.G., Ahn K.K., Na S.// *Automation in Construction*. 2021. 130.
9. Buriy G.G., Poteryaev I.K., Skobelev S.B., Kovalevsky V.F. Issledovanie sil soprotivleniya rezaniju na novoj konstrukcii kovsha gidravlicheskogo jekskavatora [Study of the forces of resistance to cutting on the new structure of the ladle of a hydraulic excavator]// *Mining equipment and electromechanics*. 2019. 2: 46-51.
10. Buriy G.G., Poteryaev I.K., Skobelev S.B., Kovalevsky V.F. Sravnenie processa kopanija standartnym kovshom jekskavatora i kovshom novoj konstrukcii [Comparison of the digging process with a standard excavator bucket and a new design bucket]// *Mining equipment and electromechanics*. 2020. 1: 37-44.
11. Balovnev V.I., Danilov R.G., Ulitich O.Yu. Stend dlja issledovanija processov vzaimodejstvija so sredoj rabochih organov dorozhno-stroitel'nyh mashin [Stand for research of processes of interaction with the environment of working bodies of road construction machines]// *Construction and road machines*. 2020. 8: 3-15.
12. Berestov E.I. Vlijanie trenija grunta po poverhnosti nozha na soprotivlenie rezaniju [Influence of soil friction on the knife surface on cutting resistance]// *Construction and road machines*. 2010. 11: 34-38.
13. Semkin D.S. O vlijanii skorosti rabocheho organa na silu soprotivleniya rezaniju grunta [On the influence of the speed of the working body on the strength of resistance to cutting of the ground]// *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2017. 1. : 37-43. (In Russ.)
14. Nikolaev V.A. Analiz vzaimodejstvija kromki lezvija konsol'nogo nozha s gruntom [Analysis of the interaction of the blade edge of the cantilever knife with the ground]// *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020. 2: 172-181. (In Russ.)
15. Tarasov M.A. Modelirovanie parametrov funkcionirovanija vyemochnoj mashiny s vibracionnym vozdejstviem na gornye porody [Modeling of parameters of the extraction machine functioning with vibration impact on rocks]// *Sustainable development of mountain areas*. 2019. 1: 85-97.
16. Troyanovskaya I.P., Raznoshinskaya A.V., Kozminykh V.A., Leshchenko E.A. Jekspierimental'nye issledovanija processa promyshlennogo ryhlenija grunta [Experimental studies of the process of industrial tillage of soil]// *Mining journal*. 2021. 5: 87-90.
17. Kuznetsov I.S. Teoreticheskie issledovanija processa vzaimodejstvija rezca frezernogo rabochego oborudovanija jekskavatora s gruntom [Theoretical studies of the process of interaction of the cutter of the milling working equipment of the excavator with the soil]// *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021. 1: 42-50.
18. Konstantinov Yu.V. Metodika raschjota soprotivlenija i momenta soprotivlenija rezaniju pochvy prjamym plastinchatym nozhom frezy [Methodology for calculating the resistance and moment of resistance to cutting the soil with a straight plate cutter]// *Tractors and agricultural machines*. 2019. 5: 31-39. (In Russ.)
19. Nikolaev V.A. Opređenje skorosti cepej i razmerov plasta grunta, otrezaemogo kovshom agregata dlja udalenija verhnego sloja grunta s podstila-jushhego sloja avtodorogi [Determination of the speed of the chains and dimensions of the soil formation cut off by the bucket of the unit to remove the upper layer of soil from the underlying layer of the highway]// *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020. 1 : 32-43. (In Russ.)
20. Nikolaev V.A. Zatraty jenerгии na rezanie grunta kovshami agregata nepreryvnogo dejstvija dlja formirovanija podstilajushhego sloja avtodorogi [Energy costs for cutting the soil with buckets of a continuous unit to form the underlying layer of the highway]// *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020. 6: 676-688. (In Russ.)
21. Shabanova G.I., Savelyev S.V., Buriy G.G. Matematicheskoe opisanie kolebatel'noj sistemy «vibracionnyj rabochij organ-grunt» [Mathematical description of the oscillatory system "vibrational working organ-soil"]// *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2013. 3: 102-107. (In Russ.)
22. Tarasik V.P. Fizicheskie osnovy processa dempfirovanija kolebanij v sisteme podveski avtomobilja [The physical foundations of the process of damping oscillations in the suspension system of the car]// *Bulletin of the Belarusian-Russian University*. 2019. 1 : 62-77.
23. Zenkov S.A., Mineev D.A. Opređenje kinematicheskikh parametrov kovsha jekskavatora [Determination of kinematic parameters of the excavator ladle]// *Transport, mining and construction engineering: science and production*. 2019. 3: 30-33. (In Russ.)
24. Tan N.D. Dynamic simulation of a hydraulic excavator to determine the joint reaction forces of boom, stick, bucket, and driving forges of hydraulic cylinders/ Tan N.D.// *Inzynieria Mineralna*. 2020. 1. : 131-137.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Бурый Григорий Геннадьевич – канд. техн. наук., доц. кафедры «Автомобили и энергетические установки».

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Grigoriy G. Buriy, Cand. of Sci., Associate Professor, the Automobiles and Energy Systems Department