

Бурый Григорий Геннадьевич¹, канд. техн. наук, доцент, **Потеряев Илья Константинович**¹, канд. техн. наук, доцент, **Скобелев Станислав Борисович**², канд. техн. наук, доцент, **Ковалевский Валерий Федорович**², кандидат. техн. наук, доцент

¹Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 644080, г. Омск, пр. Мира 5

²Омский государственный технический университет, 644050, г. Омск, пр. Мира 11

E-mail: buryu1989@bk.ru

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОПАНИЯ ГРУНТА СФЕРИЧЕСКИМ КОВШОМ

Аннотация: в статье описана актуальность повышения производительности одноковшового гидравлического экскаватора. Описана конструкция предлагаемого ковша. Представлена схема сил действующих на рассматриваемый ковш в процессе копания. Предложена математическая модель процесса копания сферическим ковшом, а также приняты допущения к ней. Описаны зависимости для нахождения параметров математической модели. Представлено решение математической модели с целью определения зависимости скорости грунта и ковша от силы гидропривода. Описан алгоритм подбора силы гидропривода при копании грунта ковшом предлагаемой конструкции.

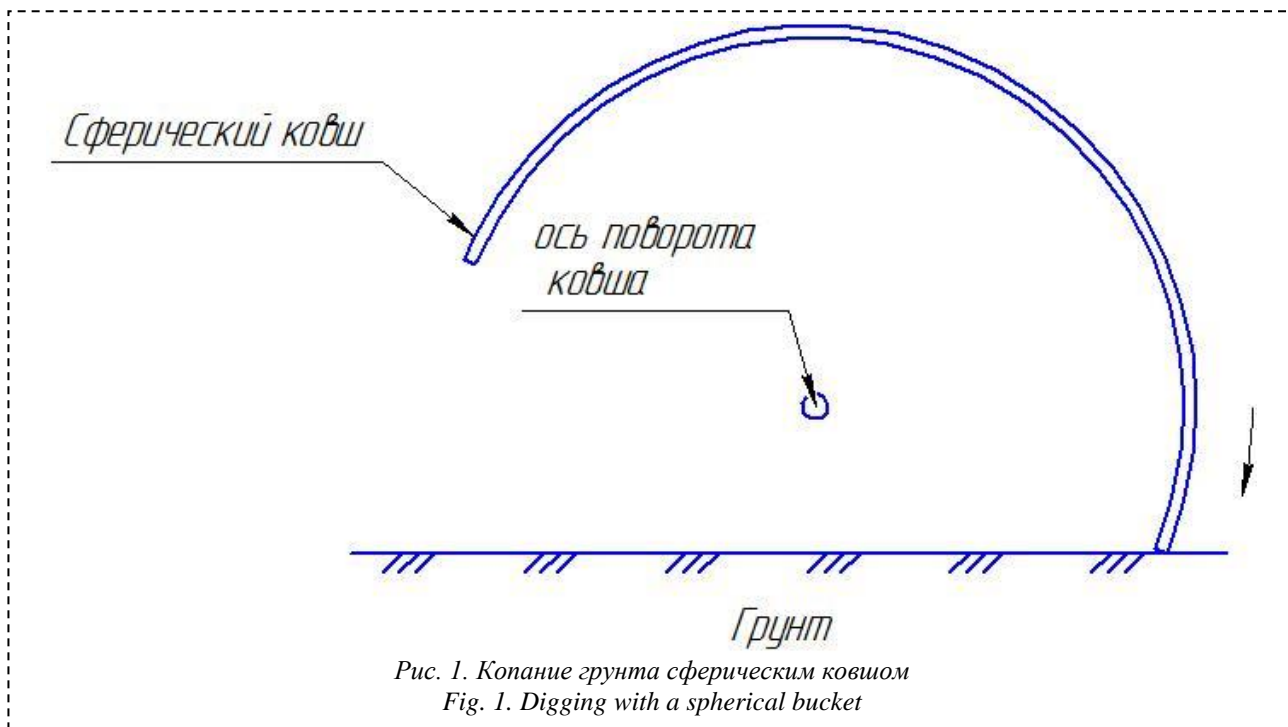
Ключевые слова: сила, ковш, экскаватор, грунт, копание, реологическая модель, математическое описание, масса, алгоритм.

Информация о статье: принята 20 августа 2020 г.

DOI: 10.26730/1816-4528-2020-4-53-58

На сегодняшний день строительство и ремонт инженерных сооружений невозможно представить без специальной техники. Одной из самых распространенных строительных машин является одноковшовый гидравлический экскаватор. На эксплуатацию данных машин в процессе строительства выделяются значительные средства. Одним из способов снижения расходов является

увеличение производительности данных машин. Производительность данных машин зависит от множества факторов таких как объем зачерпываемого грунта, объем выгружаемого грунта, использование машины по времени и другие. В работе будет рассмотрена конструкция ковша в теории позволяющая повысить объем зачерпываемого грунта без изменений характеристик его



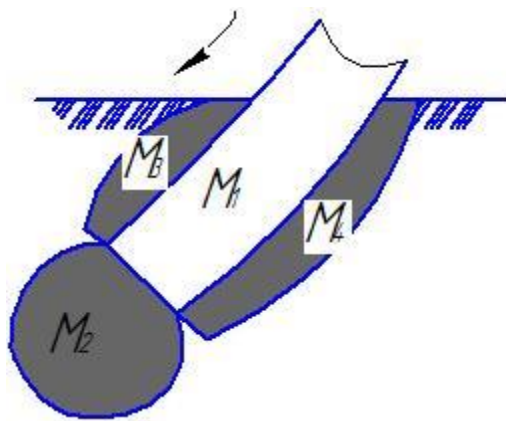


Рис. 2. Заглубление сферического ковша
Fig. 2. Deepening the spherical bucket

гидропривода [1, 4]. Однако чтобы проверить данную гипотезу необходимо математически описать процесс копания новым ковшом. Целью работы является составление алгоритма подбора силы гидропривода для копания грунта ковшом новой конструкции. Задачей исследований является получение функциональной зависимости скорости копания от силы гидропривода ковша новой конструкции.

Конструкция предлагаемого ковша отличается сферической формой от серийных образцов. В процессе копания данный ковш поворачивается вокруг собственной оси, что в теории позволяет сократить силы сопротивления копанию рис. 1.

Форма ковша должна сократить силы сопротивления копанию, что позволит увеличить объем ковша без изменения характеристик его гидропривода. Для того чтобы проверить данное

утверждение опишем математически процесс копания грунта данным ковшом. При заглублении в грунт ковш взаимодействует с массами представленными на рис. 2.

На рис. 2 представлены следующие обозначения: M_1 – масса ковша сферической формы, кг; M_3 – масса грунта внутри ковша, кг; M_4 – масса грунта снаружи ковша, кг; M_2 – масса грунта перед кромкой ковша, кг [15].

Анализ работ проф. Зеленина А.Н. [3, 5] по взаимодействию различных рабочих органов дорожных машин с грунтом позволил построить схему сил действующих на сферический ковш в процессе копания рис. 3. При составлении математической модели на основе данной схемы были приняты следующие допущения:

- 1) система грунт массой M_2 и ковш с сосредоточенными параметрами;
- 2) массы грунта M_3 и M_4 не деформируются;
- 3) ковш копает горизонтальную поверхность грунта;
- 4) отсутствуют перемещения масс грунта M_3 и M_4 ;
- 5) на поверхности контакта ковша с грунтом массой M_2 трение отсутствует;
- 6) максимальная толщина копания равна g ;
- 7) ковш принимается как абсолютно жесткое тело;
- 8) грунт массой M_2 и ковш имеют одинаковое перемещение;
- 9) грунт представляется упруговязкопластичной однородно-сжимаемой средой.

На рис. 3 приведены обозначения параметров: M_2, M_3 и M_4 – массы грунта; F_4 – нормальная сила от грунта массой M_4 на ковш; K_3 – касательная сила от грунта массой M_3 к ковшу; K_4 – касательная

сила от грунта массой M_4 к ковшу; P_3 – вес грунта массой M_3 ; P_2 – вес грунта массой M_2 ; P_1 – вес ковша, H ; λ – угол поворота сферического ковша, град; F_2 – нормальная сила от внешнего грунта на грунт массой M_2 ; K_2 – касательная сила от внешнего грунта к грунту массой M_2 ; B – толщина стенки ковша, м; r – внутренний радиус ковша, м; F – сила создаваемая гидrocилиндром поворота ковша, H [7-11].

В дальнейших расчетах рассмотрим силы, которые действуют на ковш и грунт в направлении поворота. Масса грунта M_2 под кромкой ковша будет деформироваться до уплотненного состояния и перемещаться вместе с ковшом. Так как присутствует перемещение двух масс рассмотрим реологическую модель взаимодействия ковша массой M_1 с грунтом массой M_2 . Данная модель приведена в работах проф. Баловнева В.И. рис. 4 [2].

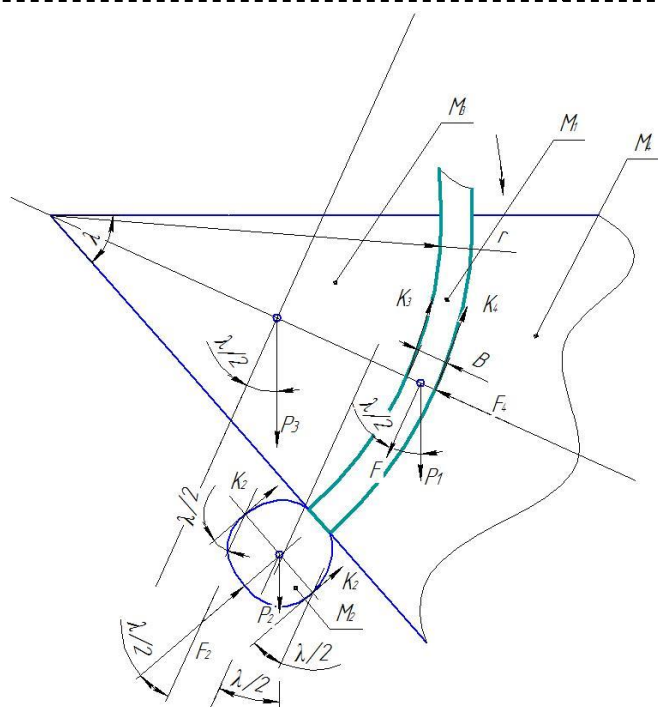


Рис. 3. Силы, действующие на сферический ковш в процессе копания
Fig. 3. Figure: 3. Forces acting on a spherical bucket during digging

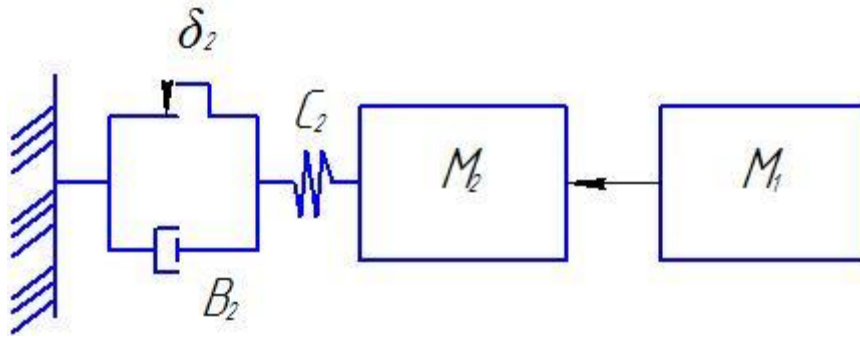


Рис. 4. Реологическая модель копания грунта массой M_2 сферическим ковшом
 Fig. 4. Rheological model of excavation of soil with a mass of M_2 with a spherical bucket

Представленные обозначения на рисунке 4: C_2 – коэффициент характеризующий жесткость грунта, Н/м; B_2 – коэффициент характеризующий вязкость грунта, Н·с/м; δ_2 – коэффициент характеризующий пластичность грунта, Н/м; M_1 – масса ковша сферической формы, кг; M_2 – масса грунта перед кромкой ковша, кг. Полную деформацию грунта обозначим коэффициентом $\eta_2 = C_2 + \delta_2$.

Коэффициент C_2 характеризует упругую (обратимую) деформацию грунта, а коэффициент δ_2 необратимую деформацию грунта. Коэффициент B_2 характеризует скорость деформирования грунта.

Математическую модель процесса взаимодействия массы ковша M_1 с грунтом массой M_2 можно описать системой дифференциальных уравнений (1) и (2)

$$\begin{cases} M_1 \cdot \ddot{x} = -K_3 - K_4 + (P_1 + P_3) \cos \frac{\omega t}{2} + F; \\ M_2 \cdot \ddot{x} + \frac{(B_2 \cdot \dot{x} + \delta_2 \cdot x) \cdot C_2 \cdot x}{B_2 \cdot x + \eta_2 \cdot x} = (P_2 - F_2 - K_2) \cdot \cos \frac{\omega t}{2}, \end{cases} \quad (1,2)$$

где x – перемещение грунта массой M_2 и ковша, м; t – время, с; ω – угловая скорость ковша ($\varphi = \omega t$), рад/с; F – сила гидроцилиндра поворота ковша, Н; M_1 – масса ковша, кг; M_2 – масса грунта перед кромкой ковша, кг [12,13].

Механизм движения сферического ковша описывается уравнением (1), движение массы грунта M_2 описывается уравнением (2).

Касательную силу K_3 определим из веса грунта P_3 определив значение перпендикулярной силы на внутреннюю поверхность ковша учитывая угол трения грунта по стали по формуле (3)

$$K_3 = P_3 \cdot \sin \frac{\omega t}{2} \cdot t g \mu, \quad (3)$$

где μ – угол трения грунта по стали (может изменяться в диапазоне 18-25° в зависимости от категории грунта) [2].

Вес грунта P_3 найдем по формуле (4)

$$P_3 = \gamma \cdot \frac{2}{3} r^3 \cdot \omega \cdot t \cdot g, \quad (4)$$

где γ – плотность грунта, кг/м³.

Вес P_1 найдем по формуле (5)

$$P_1 = M_1 \cdot g. \quad (5)$$

Силы K_2 , K_4 и F_2 зависят от бокового давления грунта. Для определения бокового давления

грунта используется прибор стабилومتر включающий аэростатический манометр (капиллярную трубку) [6]. Боковое давление грунта находится по формуле (6)

$$\sigma_6 = \sigma_0 (h_0/h_i - 1), \quad (6)$$

где σ_0 – атмосферное давление, Па; h_0 – начальная высота столбика воздуха при атмосферном давлении, м; h_i – конечная высота столбика воздуха, м.

Касательные силы K_2 и K_4 зависят от касательного напряжения возникающего при трении грунта по грунту определяемого по зависимости $\tau = \sigma_6 \cdot t g \psi$, где ψ – угол трения грунта по грунту (изменяется в диапазоне 23-29° в зависимости от категории грунта) [2].

Касательную силу K_4 найдем по формуле (7)

$$K_4 = \sigma_6 \cdot t g \mu \cdot 2\phi (r + B)^2. \quad (7)$$

Силы K_2 и F_2 находятся как произведение напряжений на площадь S грунта массой M_2 . Касательную силу K_2 найдем по формуле (8), нормальную силу F_2 определим по формуле (9)

$$K_2 = \sigma_6 \cdot t g \psi \cdot S; \quad (8)$$

$$F_2 = \sigma_6 \cdot S. \quad (9)$$

Площадь S грунта массой M_2 на данный момент слабо изучена. В процессе давления кромки ковша на грунт образуется уплотненное ядро массой M_2 . В зоне данной массы деформации равномерны, также около 80% всей деформации приходится именно на данную зону. Проф. Иванов Н.Н. назвал данную зону «активной» [14]. Известна формула (10) для определения глубины «активной» зоны грунта

$$H = f \cdot B \cdot \frac{w}{w_0} \left(1 - e^{-q \frac{\sigma_{пов}}{\sigma_{пр}}} \right), \quad (10)$$

где f и q – эмпирические коэффициенты, в нашем случае скорость уплотнения небольшая поэтому $f=2$, при копании связных грунтов коэффициент $q=3,65$; B – толщина стенки ковша, см; w_0 и w – оптимальная влажность и текущая влажность грунта, %; $\sigma_{пр}$ – предел прочности грунта, МПа; $\sigma_{пов}$ – поверхностное напряжение, МПа.

Ограничить «активную» зону массой M_2 по бокам можно линиями равных напряжений, данные линии известны и хорошо описаны, однако для ограничения ими массы M_2 необходимо проводить экспериментальное подтверждение.

Определим массу M_2 по формуле (11)

$$M_2 = \gamma \cdot \omega \cdot t \cdot r \cdot S. \quad (11)$$

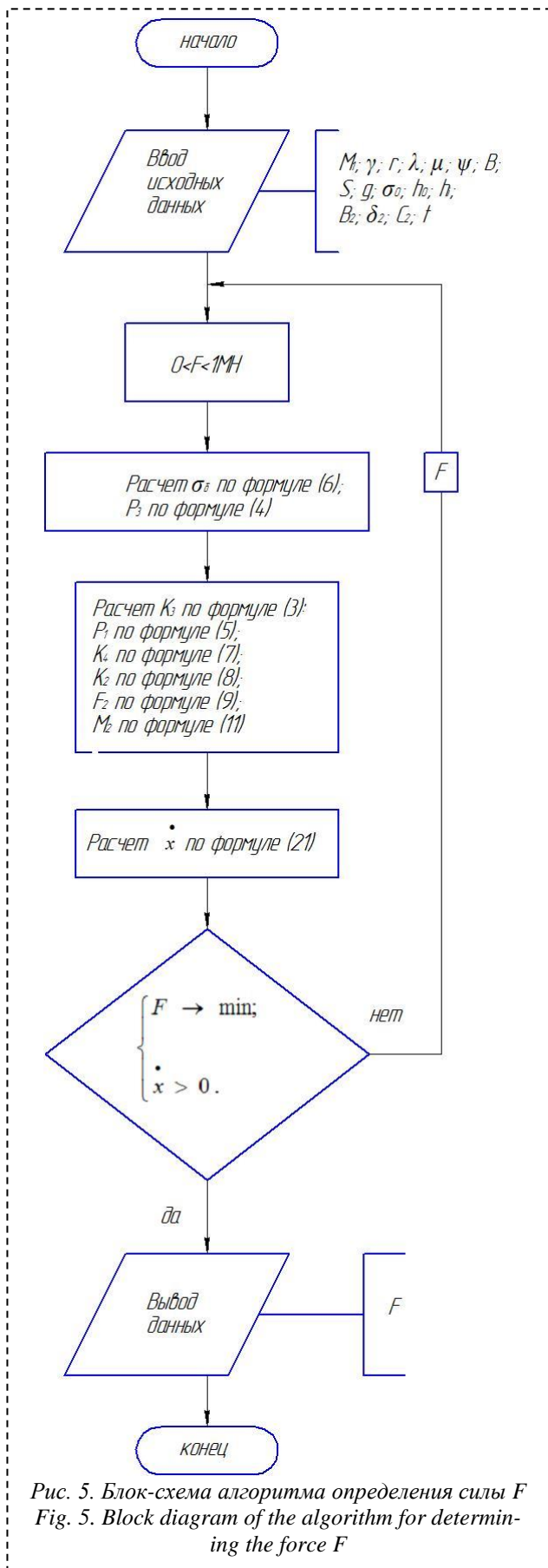


Рис. 5. Блок-схема алгоритма определения силы F
 Fig. 5. Block diagram of the algorithm for determining the force F

Система уравнений (1) и (2) отображает взаимодействие двух масс, ее решением является перемещение этих масс, а также его производные по времени. Рассчитав зависимость скорости \dot{x} от

параметров грунта и ковша можно задать такие параметры, при которых сила F будет минимальна, а скорость $\dot{x} > 0$, при этих условиях процесс копания будет возможен при минимальных характеристиках гидропривода.

Из уравнения (1) найдем ускорение \ddot{x}

$$\ddot{x} = -\frac{K_3}{M_1} - \frac{K_4}{M_1} + \frac{(P_1+P_3)}{M_1} \cos \frac{\omega t}{2} + \frac{F}{M_1}. \quad (12)$$

Продифференцируем формулу (12)

$$\ddot{\dot{x}} = -\frac{(P_1+P_3)}{M_1} \cdot \frac{\omega}{2} \cdot \sin \frac{\omega t}{2}. \quad (13)$$

Продифференцируем по времени уравнение (2)

$$M_2 \cdot \ddot{\dot{x}} + \frac{(B_2 \cdot \ddot{x} + \delta_2 \cdot \dot{x}) \cdot C_2 \cdot \dot{x}}{B_2 \cdot \dot{x} + \eta_2 \cdot x} = -(P_2 - F_2 - K_2) \cdot \frac{\omega}{2} \cdot \sin \frac{\omega t}{2}. \quad (14)$$

из формулы (14) определим \dot{x} , для упрощения вычислений примем $(P_2 - F_2 - K_2) \cdot \frac{\omega}{2} \cdot \sin \frac{\omega t}{2} = A$ далее проведем расчет

$$(B_2 \cdot \ddot{x} + \delta_2 \cdot \dot{x}) \cdot C_2 \cdot \dot{x} = -A \cdot B_2 \cdot \ddot{x} - M_2 \cdot \ddot{\dot{x}} \cdot B_2 \cdot \dot{x} - A \cdot \eta_2 \cdot \dot{x} - M_2 \cdot \ddot{x} \cdot \eta_2 \cdot \dot{x}; \quad (15)$$

$$(B_2 \cdot \ddot{x} + \delta_2 \cdot \dot{x}) \cdot C_2 \cdot \dot{x} + M_2 \cdot \ddot{x} \cdot \eta_2 \cdot \dot{x} + A \cdot \eta_2 \cdot \dot{x} = -A \cdot B_2 \cdot \ddot{x} - M_2 \cdot \ddot{\dot{x}} \cdot B_2 \cdot \dot{x}; \quad (16)$$

$$C_2 \cdot \delta_2 \cdot \dot{x}^2 + (C_2 \cdot B_2 \cdot \ddot{x} + M_2 \cdot \ddot{x} \cdot \eta_2 + A \cdot \eta_2) \cdot \dot{x} = -A \cdot B_2 \cdot \ddot{x} - M_2 \cdot \ddot{\dot{x}} \cdot B_2 \cdot \dot{x}; \quad (17)$$

Левую часть уравнения (17) приведем к виду $a^2 + 2ab + b^2$,

где $a = \sqrt{C_2 \cdot \delta_2} \cdot \dot{x}$; $b = \frac{1}{2\sqrt{C_2 \cdot \delta_2}} \cdot (C_2 \cdot B_2 \cdot \ddot{x} + M_2 \cdot \ddot{x} \cdot \eta_2 + A \cdot \eta_2)$

После преобразований уравнение (17) примет вид

$$C_2 \cdot \delta_2 \cdot \dot{x}^2 + 2 \cdot \frac{1}{2 \cdot \sqrt{C_2 \cdot \delta_2}} \cdot (C_2 \cdot B_2 \cdot \ddot{x} + M_2 \cdot \ddot{x} \cdot \eta_2 + A \cdot \eta_2) \cdot \sqrt{C_2 \cdot \delta_2} \cdot \dot{x} + \frac{1}{4C_2 \cdot \delta_2} \cdot (C_2 \cdot B_2 \cdot \ddot{x} + M_2 \cdot \ddot{x} \cdot \eta_2 + A \cdot \eta_2)^2 = -A \cdot B_2 \cdot \ddot{x} - M_2 \cdot \ddot{\dot{x}} \cdot B_2 \cdot \dot{x} + \frac{1}{4C_2 \cdot \delta_2} \cdot (C_2 \cdot B_2 \cdot \ddot{x} + M_2 \cdot \ddot{x} \cdot \eta_2 + A \cdot \eta_2)^2. \quad (18)$$

Левую часть уравнения (18) приведем к виду $(a + b)^2$

Для окончательного определения \dot{x} подставим в уравнение (21) взамен \ddot{x} и $\ddot{\dot{x}}$ выражения (12) и (13) соответственно [13].

Полученную зависимость (21) можно применить для определения минимальной силы F при реализации процесса копания сферическим ковшом. Блок-схема алгоритма определения силы F представлена на рис. 5.

$$\left(\sqrt{C_2 \cdot \delta_2} \cdot \dot{x} + \frac{1}{2\sqrt{C_2 \cdot \delta_2}} \cdot (C_2 \cdot B_2 \cdot \ddot{x} + M_2 \cdot \ddot{x} \cdot \eta_2 + A \cdot \eta_2) \right)^2 = -A \cdot B_2 \cdot \ddot{x} - M_2 \cdot \ddot{x} \cdot B_2 \cdot \ddot{x} + \frac{1}{4C_2 \cdot \delta_2} \cdot (C_2 \cdot B_2 \cdot \ddot{x} + M_2 \cdot \ddot{x} \cdot \eta_2 + A \cdot \eta_2)^2. \quad (19)$$

Извлечем квадратный корень из обеих частей уравнения (19)

$$\sqrt{C_2 \cdot \delta_2} \cdot \dot{x} + \frac{1}{2\sqrt{C_2 \cdot \delta_2}} \cdot (C_2 \cdot B_2 \cdot \ddot{x} + M_2 \cdot \ddot{x} \cdot \eta_2 + A \cdot \eta_2) = \sqrt{-A \cdot B_2 \cdot \ddot{x} - M_2 \cdot \ddot{x} \cdot B_2 \cdot \ddot{x} + \frac{1}{4C_2 \cdot \delta_2} \cdot (C_2 \cdot B_2 \cdot \ddot{x} + M_2 \cdot \ddot{x} \cdot \eta_2 + A \cdot \eta_2)^2}. \quad (20)$$

Выразим из выражения (20) \dot{x}

$$\dot{x} = \sqrt{\frac{-A \cdot B_2 \cdot \ddot{x} - M_2 \cdot \ddot{x} \cdot B_2 \cdot \ddot{x} + \frac{1}{4C_2 \cdot \delta_2} \cdot (C_2 \cdot B_2 \cdot \ddot{x} + M_2 \cdot \ddot{x} \cdot \eta_2 + A \cdot \eta_2)^2}{C_2 \cdot \delta_2}} - \frac{1}{2 \cdot C_2 \cdot \delta_2} \cdot (C_2 \cdot B_2 \cdot \ddot{x} + M_2 \cdot \ddot{x} \cdot \eta_2 + A \cdot \eta_2). \quad (21)$$

Заключение

Алгоритм, блок-схема которого представлена на рис. 5, заключается в следующем: изначально в программу предполагается введение исходных данных, далее задается диапазон силы F из которого программа берет различные значения. Далее по зависимостям представленным в работе определяются параметры математической модели, значения которых подставляются в зависимость

для определения скорости \dot{x} . Затем если выполняются условия о том, что значение силы F минимально а скорость $\dot{x} > 0$, программа выводит

искомую силу F. Определение силы F по данному алгоритму позволит подтвердить предположение об уменьшении сил сопротивления копанью грунта сферическим ковшем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент 2656286 Российская Федерация, МПК E02F 3/28. Ковш экскаватора сферический

/ Бурый Г.Г.; заявитель и патентообладатель Бурый Г.Г.

2. Баловнев, В.И. Моделирование процессов взаимодействия со средой рабочих органов дорожно-строительных машин / В.И. Баловнев. - М.: Высшая школа, 1981.- 335 с.

3. Зеленин, А.Н. Машины для земляных работ / А.Н. Зеленин, В.И. Баловнев, И.П. Керов. - М.: Машиностроение, 1975. - 423 с.

4. Кузнецова В.Н., Завьялов А.М. Оптимизация формы рабочих органов землеройных машин. Омск: ОмГПУ, 2008. 183 с.

5. Зеленин А.Н., Павлов В.П., Агароник М.Я., Королев А.В., Перлов А.С. Исследование разработки грунта гидравлическими экскаваторами // Строительные и дорожные машины. 1976. № 10. С. 9 – 11.

6. Сорокина Г.В. Рекомендации по методам определения коэффициентов бокового давления и поперечного расширения глинистых грунтов. - М.: Ордена трудового красного знамени научно-исследовательский институт оснований и подземных сооружений им. Н.М. Герсеванова Госстрой СССР, 1978. - 31 с.

7. Ананин В.Г. Результаты экспериментальных исследований и моделирования рабочего оборудования одноковшового экскаватора // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2013. № 1 (38). С. 205-213.

8. Кузнецова В.Н., Савинкин В.В. Анализ эффективности работы одноковшового экскаватора // Вестник СибАДИ. 2014. №6. С. 26 – 33.

9. Павлов В.П., Абрамов А.Н. Рекомендации по выбору параметров экскаваторных ковшей // Транспортное строительство. 1984. № 7. С. 35 – 36.

10. Тарасов В.Н., Коваленко М.В. Механика копания грунтов, основанная на теории предельных касательных напряжений // Строительные и дорожные машины. 2003. № 7. С.38 – 43.

11. 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.

12. Тарасов В.Н., Коваленко М.В. Механика копания грунтов ковшем гидравлического экскаватора // Строительные и дорожные машины. 2003. №8. С. 41-45.

13. Шипачев В.С. Курс высшей математики: учеб. / под ред. А.Н. Тихонова. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: ТК Велби, Изд-во Проспект, 2005. - 600 с.

14. Хархута, Н. Я. Прочность, устойчивость и уплотнение грунтов земляного полотна автомобильных дорог/ Н. Я. Хархута, Ю.М. Васильев. - М.: Транспорт, 1975. - 288с.

15. Sinclair R. Hydraulic Excavators: Quarrying & Mining Applications. London, Sinclair Publishing, 2011. 388 p.

Gregory G. Buryy¹, C. Sc. in Engineering, Associate Professor, **Ilya K. Poteryaev**¹, C. Sc. in Engineering, Associate Professor, **Stanislav B. Skobelev**², C. Sc. in Engineering, Associate Professor, **Valeriy F. Kovalevskiy**², C. Sc. in Engineering, Associate Professor

¹Siberian State Automobile and Highway University, Russia, 644080, Omsk, pr. Mira 5

²Omsk State Technical University, Russia, 644050, Omsk, pr. Mira 11

MATHEMATICAL MODELING OF THE SOIL DIGGING PROCESS WITH A SPHERICAL BUCKET

Abstract: *the article describes the relevance of increasing the performance of a single-bucket hydraulic excavator. The design of the proposed bucket is described. The diagram of the forces acting on the considered bucket during digging is presented. A mathematical model of the digging process with a spherical bucket is proposed, and assumptions are made to it. Dependencies for finding the parameters of the mathematical model are described. The solution of a mathematical model is presented in order to determine the dependence of the speed of the soil and bucket on the force of the hydraulic drive. An algorithm for selecting the force of the hydraulic drive when digging the soil with a bucket of the proposed design is described.*

Keywords: *force, bucket, excavator, soil, digging, rheological model, mathematical description, mass, algorithm.*

Article info: received August 20, 2020

DOI: 10.26730/1816-4528-2020-4-53-58

REFERENCES

1. Patent 2656286 Rossijskaja Federacija, MPK E02F 3/28. Kovsh jekskavatora sfericheskij / Buryj G.G.; zajavitel' i patentoobladatel' Buryj G.G. (rus)

2. Balovnev, V.I. Modelirovanie processov vzaimodejstvija so sredoj rabochih organov dorozhno-stroitel'nyh mashin / V.I. Balovnev. – M.: Vysshaja shkola, 1981. – 335 p. (rus)

3. Zelenin, A.N. Mashiny dlja zemljanyh rabot / A.N. Zelenin, V.I. Balovnev, I.P. Kerov. – M.: Mashinostroenie, 1975. – 424 p. (rus)

4. Kuznecova V.N., Zav'jalov A.M. Optimizacija formy rabochih organov zemlerojnyh mashin. Omsk: OmGPU, 2008. 183 p.

5. Zelenin A.N., Pavlov V.P., Agaronik M.Ja., Korolev A.V., Perlov A.S. Issledovanie razrabotki grunta gidravlicheskim jekskavatorami // Stroitel'nye i dorozhnye mashiny. 1976. № 10. Pp. 9 – 11. (rus)

6. Sorokina G.V. Rekomendacii po metodam opredelenija koeficientov bokovogo davlenija i poperechnogo rasshirenija glinistyh gruntov. – M.: Ordena trudovogo krasnogo znamenija nauchno-issledovatel'skij institut osnovanij i podzemnyh sooruzhenij im. N.M. Gersevanova Gosstroj USSR, 1978. – 31 p.

7. Ananin V.G. Rezul'taty jeksperimental'nyh issledovanij i modelirovanija rabocheho oborudovanija odnokovshovogo jekskavatora // Vestnik Tomskogo gosudarstven-nogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. 2013. № 1 (38). Pp. 205–213. (rus)

8. Kuznecova V.N., Savinkin V.V. Analiz jeffektivnosti raboty odnokovshovogo jekskavatora // Vestnik SibADI. 2014. № 6. S. 26 – 33. (rus)

9. Pavlov V.P., Abramov A.N. Rekomendacii po vyboru parametrov jekskavator-nyh kovshej // Transportnoe stroitel'stvo. 1984. № 7. Pp. 35–36. (rus)

10. Tarasov V.N., Kovalenko M.V. Mehanika kopanija gruntov, osnovannaja na teorii predel'nyh kasatel'nyh naprjazhenij // Stroitel'nye i dorozhnye mashiny. 2003. № 7. Pp. 38–43. (rus)

11. Kuznecova V.N., Savinkin V.V. Obespechenie jenergojeffektivnosti razrabotki grunta za schet optimizacii uglov pozicionirovanija rabocheho oborudovanija jekskavatora // Stroitel'nye i dorozhnye mashiny. 2015. № 3. Pp. 44–47. (rus)

12. Tarasov V.N., Kovalenko M.V. Mehanika kopanija gruntov, osnovannaja na teorii predel'nyh kasatel'nyh naprjazhenij // Stroitel'nye i dorozhnye mashiny. 2003. № 7. Pp. 38–43. (rus)

13. Shipachev V.S. Kurs vysshej matematiki: uceb. / pod red. A.N. Tihonova. – 2-e izd., pererab. i dop. – M.: TK Velbi, Izd-vo Prospekt, 2005. – 600 p.

14. Harhuta, N. Ja. Prochnost', ustojchivost' i uplotnenie gruntov zemljanogo polotna avtomobil'nyh dorog/ N. Ja. Harhuta, Ju.M. Vasil'ev. – M.: Transport, 1975. – 288 p.

15. Sinclair R. Hydraulic Excavators: Quarrying & Mining Applications. London, Sinclair Publishing, 2011. – 388 p.

Библиографическое описание статьи

Бурый Г.Г., Потеряев И.К., Скобелев С.Б., Ковалевский В.Ф. Математическое моделирование процесса копания грунта сферическим ковшом // Горное оборудование и электромеханика – 2020. – № 4 (150). – С. 53-58.

Reference to article

Buryy G.G., Poteryaev I.K., Skobelev S.B., Kovalevskiy V.F. Mathematical modeling of the soil digging process with a spherical bucket. Mining Equipment and Electromechanics, 2020, no.4 (150), pp. 53-58.