

УДК 621.868.27

**А. В. ГАВРЮКОВ<sup>а</sup>, Г. А. КОНОНЫХИН<sup>а</sup>, А. В. ТРЕТЬЯК<sup>а</sup>, Б. Д. ГОЛОЛОБОВ<sup>б</sup>**<sup>а</sup> Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, <sup>б</sup> Дружковский жилищно-коммунальный колледж ДонНАСА

## **РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОПТИМИЗАЦИИ КОВША ОДНОКОВШОВОГО ПОГРУЗЧИКА**

Приведена математическая модель оптимизации ковша одноковшового погрузчика с ее практической реализацией в программном обеспечении MathCAD, применение которой позволит решить часть проблем наполняемости ковша при одноразовом его внедрении в штабель материала. Уменьшение количества внедрений повышает техническую производительность погрузчика, снижает его энергопотребление, увеличивает ходимость пневмошин.

**математическая модель, оптимизация, одноковшовый погрузчик, ковш**

### **ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ**

Анализ опыта работы одноковшовых погрузчиков показал, что процесс заполнения ковша машины может повторяться несколько раз при однократной загрузке. Уменьшение количества внедрений машины для полной наполняемости ковша позволяет сократить длительность рабочего цикла и число нагружений элементов трансмиссии ходовой части машины, определяющей ресурс ее работы. Сокращение длительности рабочего цикла повышает техническую производительность одноковшового погрузчика и снижает его энергопотребление, увеличивает ходимость пневмошин.

### **АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ**

В работе [1] приведены исследования, касающиеся разработки эффективного рабочего оборудования одноковшового погрузчика для разбирания завалов на основании определения размеров обломков разрушенных строений. Вопросы оптимизации являются одними из основных при проектировании новых машин [2–4]. В работе [5] указывается, что при разработке полезных ископаемых с известным параметром угла естественного откоса штабеля  $\alpha$  одноразовое внедрение ковша при заполнении возможно, если в качестве целевой функции при оптимизации ковша принять зависимость  $K_3 = \frac{B \cdot S}{V} = \frac{B}{2Y} [R^2 (\alpha_1 + \alpha_2) + h(l - R \cdot \cos(\alpha_2))]$ , где  $K_3$  – коэффициент заполнения ковша,  $B$  – ширина ковша,  $V$  – объем ковша,  $S$  – площадь сечения попадаемого в ковш материала, ограниченная горизонтальной линией почвы, углом естественного откоса штабеля  $\alpha$  и траекторией описываемой кромкой ковша при черпании  $R$  (радиус черпания),  $\alpha_1$  – угол между горизонталью и отрезком прямой, проведенной от точки закрепления ковша на стреле к краю зубьев ковша при заглублении в штабель,  $\alpha_2$  – угол между горизонталью и отрезком прямой, проведенной от точки закрепления ковша на стреле к краю зубьев ковша при выглублении из штабеля во время поворота ковша,  $h$  – высота закрепления ковша на стреле относительно поверхности, на которой он находится,  $l$  – расстояние от точки закрепления ковша на стреле до края зубьев ковша при внедрении в штабель по горизонтали.

Анализ исследований показал, что при разработке оптимизированных параметров ковша применимы различные методы решения поставленной задачи.

### **ЦЕЛИ**

Разработать математическую модель оптимизации параметров ковша при одноразовом его наполнении, дать решение математической модели в программном обеспечении MathCAD.

© А. В. Гаврюков, Г. А. Кононыхин, А. В. Третьяк, Б. Д. Гололобов, 2013

### ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

Для повышения эффективности работы погрузчика необходимо обеспечить условие, при котором попадающий в ковш объем материала после одноразового внедрения был равен или больше геометрического объема ковша.

Выразим вышесказанное математически

$$K_3 \geq \frac{S \cdot B}{V}, \quad (1)$$

где  $S$  – площадь сечения попадаемого в ковш материала, ограниченная горизонтальной линией почвы, углом естественного откоса штабеля  $\alpha$  и траекторией, описываемой кромкой ковша при черпании  $R$ .

Определим площадь сечения попадаемого в ковш материала, ограниченную горизонтальной линией почвы, углом естественного откоса штабеля и траекторией, описываемой кромкой ковша при черпании (рис. 1):

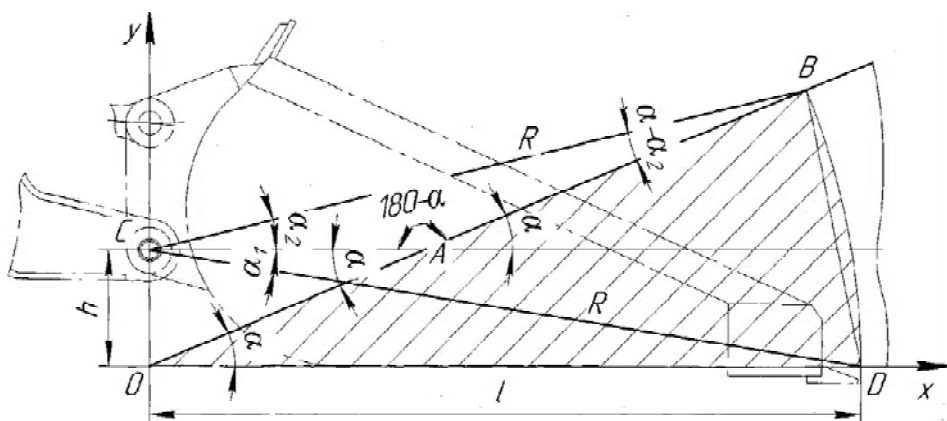


Рисунок 1 – Расчетная схема к определению площади сечения попадаемого в ковш материала при черпании.

$$S = S_{\Delta OBD} + S_{\text{сеч. } D\tilde{B} BD}. \quad (2)$$

$$CD = R = \sqrt{h^2 + l^2}. \quad (3)$$

Отсюда

$$l^2 = R^2 - h^2. \quad (4)$$

Из точки  $C$  проведем прямую параллельную оси  $Ox$ .

Обозначим  $\angle BSA = \alpha_2$ ,  $\angle ACD = \alpha_1$ .

Из прямоугольного треугольника  $OCA$  найдем катет  $CA$

$$CA = CO \cdot \text{ctg}(\alpha) = h \cdot \text{ctg}(\alpha). \quad (5)$$

Из треугольника  $CBA$  по теореме синусов находим

$$\frac{CB}{\sin(180 - \alpha)} = \frac{CA}{\sin(\alpha - \alpha_2)}. \quad (6)$$

Откуда

$$\frac{R}{\sin(\alpha)} = \frac{h \cdot \text{ctg}(\alpha)}{\sin(\alpha - \alpha_2)} \quad (7)$$

$$\sin(\alpha - \alpha_2) = \frac{h \cdot \cos(\alpha)}{R} \quad (8)$$

$$\alpha_2 = \alpha - \arcsin \frac{h \cdot \cos(\alpha)}{R} \quad (9)$$

Подставим (3) в (9)

$$\alpha_2 = \alpha - \arcsin \frac{h \cdot \cos(\alpha)}{\sqrt{h^2 + l^2}}. \quad (10)$$

Из прямоугольного треугольника  $ОСД$

$$\operatorname{tg}(\alpha_1) = \frac{h}{l}, \quad (11)$$

$$\alpha_1 = \operatorname{arctg}\left(\frac{h}{l}\right), \quad (12)$$

$$\angle BCD = \alpha_1 + \alpha_2. \quad (13)$$

Подставив (10), (12) в (13) получим

$$\alpha_1 + \alpha_2 = \operatorname{arctg} \frac{h}{l} + \alpha - \arcsin \frac{h \cdot \cos(\alpha)}{\sqrt{h^2 + l^2}}. \quad (14)$$

Площадь сегмента  $D\overset{\sim}{B}BD$  найдем по формуле (уравнение площади сегмента)

$$S_{\text{сег.}} = \frac{1}{2} R^2 [(\alpha_1 + \alpha_2) - \sin(\alpha_1 + \alpha_2)]. \quad (15)$$

Подставим уравнения (3), (14) в уравнение (15)

$$S_{\text{сег.}} = \frac{1}{2} (h^2 + l^2) \left[ \alpha + \operatorname{arctan}\left(\frac{h}{l}\right) - \arcsin \frac{h \cdot \cos(\alpha)}{\sqrt{h^2 + l^2}} - \sin \left( \alpha + \operatorname{arctan}\left(\frac{h}{l}\right) - \arcsin \frac{h \cdot \cos(\alpha)}{\sqrt{h^2 + l^2}} \right) \right]. \quad (16)$$

Найдем координаты точки  $B$  из пересечения прямой  $OB$ , уравнение которой  $y = x \cdot \operatorname{tg}(\alpha)$  и окружности радиуса  $R$  с центром в точке  $C(0; h)$ , уравнение которой  $x^2 + (y - h)^2 = R^2$ .

Для этого решим совместно систему уравнений

$$\begin{cases} y = x \cdot \operatorname{tg}(\alpha) \\ x^2 + (y - h)^2 = R^2 \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} y = x \cdot \operatorname{tg}(\alpha) \\ x^2 + y^2 - 2y \cdot h + h^2 = R^2 \end{cases} \quad (18)$$

Преобразуем систему уравнение (18) и подставим в нее уравнение (4)

$$\begin{cases} y = x \cdot \operatorname{tg}(\alpha) \\ x^2 + y^2 - 2h \cdot y = l^2 \end{cases} \quad (19)$$

Решим систему уравнений относительно  $x$

$$x^2 + x^2 \operatorname{tg}^2 \alpha - 2h \cdot x \cdot \operatorname{tg}(\alpha) = l^2, \quad (20)$$

$$x^2 (1 + \operatorname{tg}^2 \alpha) - 2h \cdot x \cdot \operatorname{tg}(\alpha) = l^2, \quad (21)$$

$$\frac{1}{\cos^2 \alpha} = (1 + \operatorname{tg}^2 \alpha). \quad (22)$$

Подставим (22) в (21) и добавим в правую и левую часть уравнения (21)  $h^2 \sin^2 \alpha$  после чего преобразуем

$$\frac{x^2}{\cos^2 \alpha} - 2h \frac{x}{\cos(\alpha)} \sin(\alpha) + h^2 \sin^2 \alpha = l^2 + h^2 \sin^2 \alpha. \quad (23)$$

Преобразуем уравнение (23) и извлечем корень из правой и левой части

$$\left( \frac{x}{\cos(\alpha)} - h \cdot \sin(\alpha) \right)^2 = l^2 + h^2 \sin^2 \alpha, \quad (24)$$

$$\frac{x}{\cos(\alpha)} - h \cdot \sin(\alpha) = \sqrt{l^2 + h^2 \sin^2 \alpha}. \quad (25)$$

Преобразовав относительно  $x$  уравнение (25) получим уравнение координаты точки  $B$

$$x_B = \cos(\alpha) \cdot \left( h \cdot \sin(\alpha) + \sqrt{l^2 + h^2 \sin^2 \alpha} \right). \quad (26)$$

Подставив уравнение (26) в уравнение  $y = x \cdot \operatorname{tg}(\alpha)$  системы уравнений (19) и преобразовав, получим уравнение координаты точки  $B$  относительно  $y$

$$y_B = \sin(\alpha) \cdot \left( h \cdot \sin(\alpha) + \sqrt{l^2 + h^2 \sin^2 \alpha} \right). \quad (27)$$

Окончательно координаты точки  $B$  запишутся

$$\begin{cases} x_B = \cos(\alpha) \cdot (h \cdot \sin(\alpha) + \sqrt{l^2 + h^2 \sin^2 \alpha}) \\ y_B = \sin(\alpha) \cdot (h \cdot \sin(\alpha) + \sqrt{l^2 + h^2 \sin^2 \alpha}) \end{cases} \quad (28)$$

Расстояние между двумя точками выражается формулой

$$OB = \sqrt{(x_B - x_O)^2 + (y_B - y_O)^2} \quad (29)$$

Подставив уравнение (28) в уравнение (29) при  $x_O = 0$  и  $y_O = 0$  определим длину  $OB$

$$OB = \sqrt{\cos^2 \alpha \cdot (h \cdot \sin(\alpha) + \sqrt{l^2 + h^2 \sin^2 \alpha})^2 + \sin^2 \alpha \cdot (h \cdot \sin(\alpha) + \sqrt{l^2 + h^2 \sin^2 \alpha})^2} \quad (30)$$

После преобразований

$$OB = h \cdot \sin(\alpha) + \sqrt{l^2 + h^2 \sin^2 \alpha} \quad (31)$$

Площадь  $\triangle OBD$  равна

$$S_{\triangle OBD} = \frac{1}{2} OB \cdot OD \cdot \sin(\alpha) \quad (32)$$

Подставив (31) в (32) получим

$$S_{\triangle OBD} = \frac{1}{2} (h \cdot \sin(\alpha) + \sqrt{l^2 + h^2 \sin^2 \alpha}) \cdot l \cdot \sin(\alpha) \quad (33)$$

Подставив уравнения (15) и (33) в уравнение (2) получим искомую площадь  $S$

$$S = \frac{1}{2} (h^2 + l^2) \left[ \alpha + \arctg \frac{h \cdot \cos(\alpha)}{\sqrt{l^2 + h^2}} - \sin \left( \alpha + \arctg \frac{h \cdot \cos(\alpha)}{\sqrt{l^2 + h^2}} \right) \right] + \frac{1}{2} (h \cdot \sin(\alpha) + \sqrt{l^2 + h^2 \sin^2 \alpha}) \cdot l \cdot \sin(\alpha) \quad (34)$$

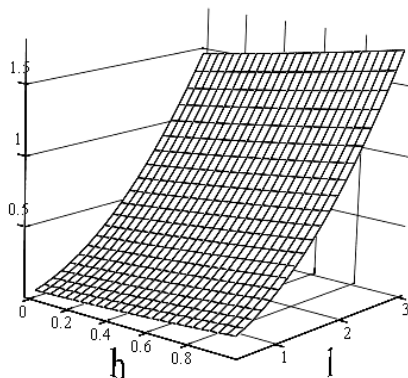
Отсюда коэффициент заполнения оптимизированного ковша одноковшового погрузчика

$$K_3 \geq \frac{B}{2V} \left\{ (h^2 + l^2) \left[ \alpha + \arctg \frac{h \cdot \cos(\alpha)}{\sqrt{l^2 + h^2}} - \sin \left( \alpha + \arctg \frac{h \cdot \cos(\alpha)}{\sqrt{l^2 + h^2}} \right) \right] + (h \cdot \sin(\alpha) + \sqrt{l^2 + h^2 \sin^2 \alpha}) \cdot l \cdot \sin(\alpha) \right\} \quad (35)$$

Зная высоту закрепления шарнира ковша  $h$  и угол естественного откоса разрабатываемого материала  $\alpha$  при заданных ширине ковша  $B$  и объеме ковша  $V$ , можно определить длину ковша  $l$  для интересующего нас коэффициента заполнения  $K_3$ .

Задавшись начальными условиями, можно определить коэффициент заполнения ковша погрузчика, выполнив расчет при помощи программного пакета MathCAD (рис. 2).

$$\begin{aligned} l &:= 0.1, 1.4..2.8 \quad \alpha := \pi \cdot \frac{30}{180} \quad B := 2.5 \quad V := 4 \quad h := 0.1, 0.4..0.8 \\ S(h, l) &:= 0.5 \cdot (h^2 + l^2) \cdot \left( \alpha + \operatorname{atan} \left( \frac{h}{l} \right) - \operatorname{asin} \left( \frac{h \cdot \cos(\alpha)}{\sqrt{h^2 + l^2}} \right) - \sin \left( \alpha + \operatorname{atan} \left( \frac{h}{l} \right) - \operatorname{asin} \left( \frac{h \cdot \cos(\alpha)}{\sqrt{h^2 + l^2}} \right) \right) \right) + \\ &+ 0.5 \cdot [h \cdot \sin(\alpha) + \sqrt{l^2 + h^2 \cdot (\sin(\alpha))^2}] \cdot l \cdot \sin(\alpha) \\ K3(h, l) &:= \frac{B \cdot S(h, l)}{V} \end{aligned}$$



**Рисунок 2** – График изменения коэффициента заполнения ковша погрузчика в зависимости от параметров длины ковша  $l$  и точки его закрепления  $h$ .

## ВЫВОДЫ

Разработана математическая модель процесса заполнения ковша погрузчика при его внедрении в материал, позволяющая определить оптимальные параметры ковша. Приведен пример реализации расчета при помощи программного пакета MathCAD.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хмара, Л. А. Використання навантажувачів для розбирання завалів зруйнованих будівель [Текст] / Л. А. Хмара, С. В. Шатов // Сб. науч. тр. «Интенсификация рабочих процессов строительных и дорожных машин. Серия: Подъемно-транспортные, строительные и дорожные машины и оборудование». – Днепропетровск : ПГПСА, 2010. – № 57. – С. 258–265.
2. Кунву, Ли. Основы САПР (CAD/CAM/CAE) [Текст] / Ли Кунву. – СПб. : Питер, 2004. – 560 с.
3. Дементьев, Ю. В. САПР в автомобиле и тракторостроении [Текст] : Учебник для студ. высш. учеб. заведений / Ю. В. Дементьев, Ю. С. Щетинин; Под общ. ред. В. М. Шарипова. – М. : Издательский центр «Академия», 2004. – 224 с.
4. Норенко, И. П. Автоматизированное проектирование [Текст] / И. П. Норенко. – М. : Машиностроение, 2000. – 188 с.
5. Семенченко, А. К. Теоретические основы анализа и синтеза горных машин и процесса их восстановления как динамических систем [Текст] / А. К. Семенченко, В. М. Кравченко, О. Е. Шабаев. – Донецк : РВА ДонНТУ, 2002. – 302 с.

Получено 17.10.2013

### О. В. ГАВРЮКОВ <sup>a</sup>, Г. А. КОНОНИХИН <sup>a</sup>, А. В. ТРЕТ'ЯК <sup>a</sup>, Б. Д. ГОЛОЛОБОВ <sup>b</sup> РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ОПТИМІЗАЦІЇ КОВША ОДНОКІВШЕВОГО НАВАНТАЖУВАЧА

<sup>a</sup> Донбаська національна академія будівництва і архітектури, <sup>b</sup> Дружківський житлово-комунальний коледж ДонНАБА

Наведено математичну модель оптимізації ковша одноківшевого навантажувача з її практичною реалізацією в програмному забезпеченні MathCAD, застосування якої дозволить вирішити частину проблем наповнюваності ковша при одноразовому його заглибленні в штабель матеріалу. Зменшення кількості заглиблень підвищує технічну продуктивність навантажувача, знижує його енергоспоживання, збільшує ходимість пневмошин.

**математична модель, оптимізація, одноківшевий навантажувач, ковш**

### ALEXANDER GAVRYUKOV <sup>a</sup>, GENNADY KONONYKHIN <sup>a</sup>, ANDREY TRETJAK <sup>a</sup>, BORIS GOLOLOBOV <sup>b</sup> DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODEL OF OPTIMIZATION SINGLE BUCKET TRUCK

<sup>a</sup> Donbas National Academy of Building and Architecture, <sup>b</sup> Druzhkivka Housing and Communal College DonNACEA

Mathematical model of optimization of the bucket single bucket loader with its practical implementation in the software, MathCAD application will solve part of the problems of filling the bucket with the single and its introduction into the pile of material has been given. Reducing the number of implementations improves the technical performance truck, reduces power consumption and increases the need tire.

**mathematical model, optimization, single bucket loader, bucket**

**Гаврюков Олександр Володимирович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри підйомно-транспортних, будівельних, дорожніх машин та обладнання Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: розвиток теорії стрічкових трубчастих конвеєрів.

**Кононихин Геннадій Анатолійович** – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри вищої математики та інформатики Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: математичний аналіз будівельних машин.

**Трет'як Андрій Валерійович** – асистент кафедри підйомно-транспортних, будівельних, дорожніх машин та обладнання Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: розвиток теорії стрічкових конвеєрів зі змінною довжиною транспортування.

**Гололобов Борис Дмитрович** – директор Дружківського житлово-комунального коледжу ДонНАБА. Наукові інтереси: питання оптимізації машин при їх проектуванні.

**Гаврюков Александр Владимирович** – кандидат технических наук, доцент кафедры подъемно-транспортных, строительных, дорожных машин и оборудования Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: развитие теории ленточных трубчатых конвейеров.

**Кононыхин Геннадий Анатольевич** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры высшей математики и информатики Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: математический анализ строительных машин.

**Третьяк Андрей Валерьевич** – ассистент кафедры подъемно-транспортных, строительных, дорожных машин и оборудования Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: развитие теории ленточных конвейеров с изменяющейся длиной транспортирования.

**Гололобов Борис Дмитриевич** – директор Дружковского жилищно-коммунального колледжа ДонНАСА. Научные интересы: вопросы оптимизации машин при их проектировании.

**Gavryukov Alexander** – PhD (Eng.), associate professor, Lifting Transport, Building, Road Machines and Equipment Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: the development of the theory of tubular belt conveyors.

**Kononykhin Gennady** – PhD. of physic-mathematical sciences, associate professor, Higher Mathematics and Computer Science Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: mathematical analysis of construction machinery.

**Tretjak Andrey** – Assistant Professor, Lifting Transport, Building, Road Machines and Equipment Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: the development of the theory of belt conveyors with a varying length transportation.

**Gololobov Boris** – a director of the Druzhkivka Housing and Communal College of DonNACEA. Scientific interests: fighting icing in the Donbas.