

# МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.12737/24018

Романович А.А., д-р техн. наук, проф.,  
Воронов В.П., канд. техн. наук, проф.,  
Мещеряков С.А., инженер

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова  
Апухтина И.В., асс.  
Белгородский государственный университет

## АГРЕГАТ ДЛЯ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ДАВЛЕНИЕМ И ДЕЗАГРЕГАЦИИ СПРЕССОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ\*

AlexejRom@yandex.ru

В статье приводится описание конструкции опытно-промышленной установки ПВИ включающей в себя загрузочный бункер, установленные на раме конические валки и дезагломерирующее устройство, которое состоит из дополнительных валков, имеющих обратную основным валкам конусность позволяет совместить в себе процессы измельчения и дезагрегации спрессованных материалов. Теоретически изучено осуществление направленного движения спрессованного в пластины материала от основных к дополнительным валкам дезагломерирующего устройства. Представлен анализ графической зависимости построенной по полученным уравнениям для линейного размера зоны захвата дезагрегирующими валками пластин спрессованного материала. Сделан вывод, что интенсивное изменение угла находится на интервале от нуля до 0,25 метра, что должно быть учтено при конструировании пресс-валкового измельчителя с устройством для дезагломерации материалов.

**Ключевые слова:** пресс-валковый измельчитель, спрессованный материал, направленное движение.

**Введение.** В последние годы при измельчении материалов различной прочности во многих отраслях промышленности широко используются пресс-валковые измельчители (ПВИ), работающие по различным технологическим схемам. Анализ научно-технической литературы [1–3] показывает, что при измельчении известняка, клинкера, шлаков, извести, кварца, углей, рудных материалов ПВИ используется как в открытом, так и в замкнутом цикле измельчения, при этом достигается снижение удельных энергозатрат в различных помольных комплексах на 20–40 % и повышение его производительности на 15–40 %.

Проведенный анализ структуры материалов, измельченных в ПВИ показал, что в нем осуществляется значительная часть процесса их помола. Однако обработанный давлением между валками материал имеет товарную форму в виде спрессованных пластин, поэтому для последующего его эффективного помола необходимы как минимум два различных силовых воздействия, что достаточно сложно создать в одном агрегате.

За рубежом широкое распространение получили технологические помольные схемы, включающие в себя ПВИ, молотковую дробилку или первую камеру шаровой мельницы, исполь-

зуемые для дезагломерации спрессованных пластин [4–7]. Реализация таких схем позволяет повысить производительность на 30 % и на 15–18 % снизить удельный расход электроэнергии. Однако применение дополнительного агрегата для дезагломерации спрессованного материала влечет за собой повышение затрат на его содержание и эксплуатацию, а первой камеры мельницы для разрыхления агломерата без мелющих тел или с небольшим их количеством приводит к не эффективному использованию объема и возможности помольного агрегата [8–10].

**Методология:** Рациональное решение данной проблемы заключается в разработке и создании пресс-валкового агрегата совмещающего в себя процессы измельчения материалов давлением и эффективного разрушения спрессованных пластин.

**Основная часть.** Проведенный анализ измельченного в ПВИ с коническими валками материала позволил установить, что он представляет собой спрессованные пластины, имеющие анизотропную текстуру с максимальной прочностью в направлении приложения усилия измельчения (рис.1), что требует особых условий его деагломерации и помола.

Проведенные экспериментальные исследования по изучению влияния давления измельче-

ния на их величину усилий дезагломерации спрессованных пластин (рис. 2), позволили установить, что с увеличением давления прессования возрастает не только степень измельчен-



Рис. 1. Форма клинкера, предварительно деформированного в ПВИ

Так, например, при измельчении клинкера давлением равным 240 МПа, усилия необходимые на дезагломерацию спрессованных пластин при их приложении в направлении прессования материала равны  $P_{\text{дез прод}} = 22$  МПа, а в перпендикулярном –  $P_{\text{дез попер}} = 2,5$  МПа, что существенно ниже. Это свидетельствует о том, что для эффективного разрушения измельченных и спрессованных в пластины в ПВИ материалов целесообразно прилагать усилия в направлении перпендикулярном силовому воздействию.

С учетом полученных результатов исследований нами разработана опытно-промышленная конструкция ПВИ с устройством для дезагломе-

ности материала  $E_{\text{изм}}$ , но и прочность пластин. Причем для их разрушения в зависимости от направления требуются различные по величине усилия.

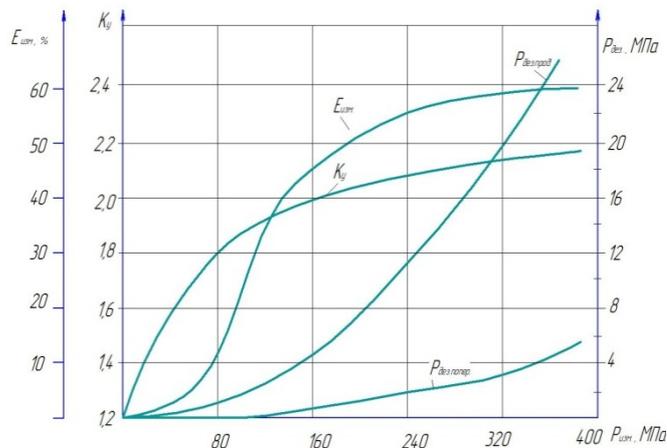


Рис. 2. Влияние давления измельчения клинкера на величину усилий дезагломерации его спрессованных

рации измельченных и спрессованных в ленту материалов. Данная конструкция позволяет совместить в себе процессы измельчения и дезагрегации спрессованных материалов в направлении их наименьшей прочности, и тем самым повысить эффективность от использования помольного агрегата (рис. 3).

Пресс-валковый измельчитель с устройством для дезагломерации включает в себя загрузочный бункер 1, установленные на раме конические валки 2 и дезагломерирующее устройство, которое состоит из дополнительных валков 3, имеющих конусность обратную основным валкам.

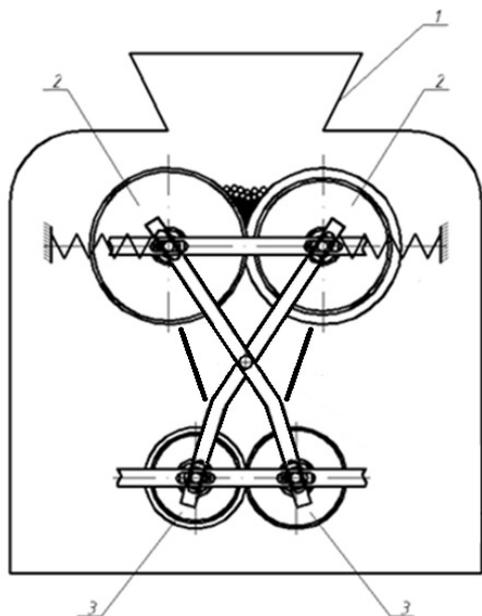


Рис. 3. Пресс-валковый измельчитель с устройством для дезагломерации материалов: а) схема, б) опытно-промышленная установка

Такая форма дополнительных и основных валков осуществляет противоположно направленное силовое воздействие на материал при его измельчении и дезагломерации спрессованных пластин, что позволяет их разрушить с меньшими энергозатратами. Однако для реализации данного процесса, должно осуществляться направленное движение спрессованного в пластины материала от основных к дополнительным валкам дезагломерирующего устройства.

Рассмотрим процесс поступления анизотропных пластин спрессованного материала к дополнительным валкам ПВИ рис.4.

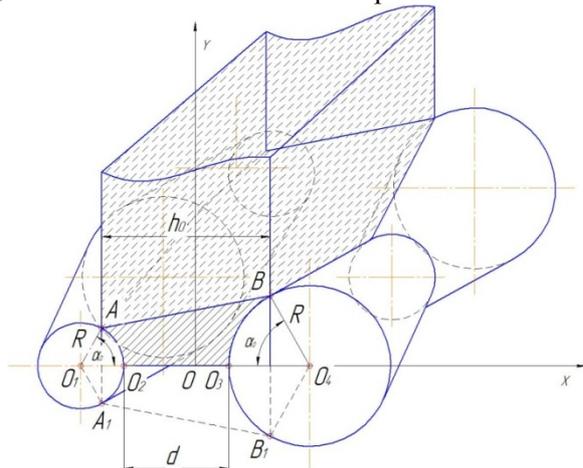


Рис. 4. Расчетная схема для определения площади разрушаемой пластины материала

Предположим, что движение пластин спрессованного материала в зону дезагрегации осуществляется с постоянством модуля скорости  $|\vec{V}|$ , а именно:

$$(\vec{V})^2 = V_0^2 = const, \quad (1)$$

где  $V_0$  – абсолютная величина скорости движения пластин спрессованного материала к зоне измельчения.

Согласно расчетной схеме, представленной на рисунке 4, вектор скорости  $\vec{V}$ , будет иметь следующие компоненты:

$$\vec{V} = \{V_x, 0, V_z\}, \quad (2)$$

$$V_x = V_0 \sin \theta, \quad (3)$$

$$V_z = V_0 \cos \theta, \quad (4)$$

где  $\theta$  – угол между вектором скорости и положительном направлении оси «OZ» в плоскости «XOZ».

При движении частиц материала к зоне дезагрегации вдоль оси «OX» происходит изменение угла « $\theta$ »:

$$\theta = \theta(x). \quad (5)$$

$$\delta E = \rho \vartheta_0^2 H L_y \int_{-L_x}^{L_x} (-\cos \theta \cdot \sin \theta \cdot \delta \theta + \alpha \frac{d\theta}{dx} \cdot \delta(\frac{d\theta}{dx})) dx = \rho \vartheta_0^2 H L_y [-\int_{-L_x}^{L_x} \cos \theta \cdot \sin \theta \delta \theta \cdot dx + \alpha \int_{-L_x}^{L_x} \frac{d\theta}{dx} \cdot \delta(\frac{d\theta}{dx}) dx]. \quad (14)$$

Энергию движения анизотропных частиц материала в зону дезагрегации представим в следующем виде:

$$E = \iiint W \left( \theta, \frac{d\theta}{dx} \right) dV, \quad (6)$$

где  $W \left( \theta, \frac{d\theta}{dx} \right)$  – плотность энергии единицы объема движущихся анизотропных пластин спрессованного материала, которую можно записать в виде:

$$W \left( \theta, \frac{d\theta}{dy} \right) = W_1(\theta) + W_2 \left( \frac{d\theta}{dx} \right), \quad (7)$$

$$W_1(\theta) = \frac{\rho v_z^2}{2}, \quad (8)$$

$$W_2 \left( \frac{d\theta}{dx} \right) = \frac{\alpha \rho v_0^2}{2} \left( \frac{d\theta}{dx} \right)^2, \quad (9)$$

где  $\rho$  – плотность частицы материала.

Соотношение (8) представляет плотность кинетической энергии движения спрессованных пластин материала вдоль оси «OZ», а (9) представляет собой плотность энергии связанной с поворотом вектора скорости движения пластин вдоль оси «OX». Как следует из (9) данное значение плотности энергии пропорционально квадрату производной их вектора скорости.

Величину коэффициента пропорциональности « $\alpha$ » (и его смысл определим позже).

Постановка (7) в (6) с учетом (8) и (9) приводит к следующему результату:

$$E = \iiint \left\{ \frac{\rho v_0^2}{2} \cos^2 \theta + \frac{\alpha \rho v_0^2}{2} \left( \frac{d\theta}{dx} \right)^2 \right\} dV. \quad (10)$$

Для выполнения конкретного расчета введем декартовую трехмерную систему координат «XOY» с центром в точке «O» (рис. 4). В качестве элементарного объема в выбранной системе координат, будет служить соотношение:

$$dV = dx dy dz. \quad (11)$$

Подстановка (11) в (10) приводит к следующему соотношению:

$$E = \frac{\rho \vartheta_0^2}{2} \int_{-L_x}^{L_x} dx \int_0^{L_y} dy \int_0^H \{ \cos^2 \theta + \alpha \left( \frac{d\theta}{dx} \right)^2 \} dz \quad (12)$$

Интегрирование выражения (12) по переменным «z» и «y» приводит к следующему соотношению:

$$E = \frac{\rho \vartheta_0^2 H L_y}{2} \int_{-L_x}^{L_x} \{ \cos^2 \theta + \alpha \left( \frac{d\theta}{dx} \right)^2 \} dx. \quad (13)$$

На основании соотношения (13) найдем функциональную зависимость (5), которая отвечала минимальному значению функционала (13) Для этого вычислим вариацию от (13):

Во втором интеграле выражения (14) произ-

$$\alpha \int_{-Lx}^{Lx} \frac{d\theta}{dx} \cdot \delta \left( \frac{d\theta}{dx} \right) dx = \alpha \int_{-Lx}^{Lx} \frac{d\theta}{dx} \cdot \frac{d}{dx} (\delta\theta) \cdot dx = \alpha \left\{ \frac{d\theta}{dx} \cdot \delta\theta \int_0^L - \int_{-Lx}^{Lx} \frac{d\theta}{dx^2} \delta\theta \cdot dx \right\} \quad (15)$$

Если учесть обращение в нуль вне интегрального слагаемого в (15) на верхнем и нижнем пределах, тогда (15) применяет вид:

$$\alpha \int_{-Lx}^{Lx} \frac{d\theta}{dx} \cdot \delta \left( \frac{d\theta}{dx} \right) dx = -\alpha \int_{-Lx}^{Lx} \frac{d^2\theta}{dx^2} \delta\theta dx. \quad (16)$$

Подстановка (16) в (14) приводит к следующему результату:

$$\delta E = \rho\theta_0^2 HL_y \int_{-Lx}^{Lx} (-\sin\theta \cos\theta - \alpha \frac{d^2\theta}{dx^2}) \delta\theta \cdot dx. \quad (17)$$

Минимальному значению энергии (17) соответствует равенство:

$$\delta E = 0. \quad (18)$$

Применение соотношения (18) к (17) позволяет получить следующее дифференциальное уравнение:

$$\alpha \frac{d^2\theta}{dx^2} + \sin\theta \cdot \cos\theta = 0. \quad (19)$$

Искомое решение уравнения (19) должно удовлетворять следующим граничным условиям:

$$\text{при } x = \pm L_x, \frac{d\theta}{dx} = 0, \theta = \frac{\pi}{2}, \quad (20)$$

$$\text{при } x = 0 \theta = \pi. \quad (21)$$

Умножим каждый элемент уравнения (19) на величину  $\frac{d\theta}{dx}$ :

$$\alpha \frac{d^2\theta}{dx^2} \cdot \frac{d\theta}{dx} + \sin\theta \cdot \cos\theta \cdot \frac{d\theta}{dx} = 0. \quad (22)$$

В результате несложных математических преобразований уравнение (22) можно привести к следующему виду:

$$\int \frac{d\theta}{\cos\theta} = - \int \frac{d(\frac{\pi}{2}-\theta)}{\sin(\frac{\pi}{2}-\theta)} = - \int \frac{d(\frac{\pi}{2}-\theta)}{2 \sin(\frac{\pi}{4}-\frac{\theta}{2}) \cos(\frac{\pi}{4}-\frac{\theta}{2})} = - \int \frac{d(\frac{\pi}{4}-\frac{\theta}{2})}{\sin(\frac{\pi}{4}-\frac{\theta}{2}) \cos(\frac{\pi}{4}-\frac{\theta}{2})} = - \int \frac{d(\frac{\pi}{4}-\frac{\theta}{2})}{\cos^2(\frac{\pi}{4}-\frac{\theta}{2})} = - \int \frac{d(\text{tg}(\frac{\pi}{4}-\frac{\theta}{2}))}{\text{tg}(\frac{\pi}{4}-\frac{\theta}{2})} = - \ln \left| \text{tg} \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\theta}{2} \right) \right|. \quad (30)$$

Подстановка (30) в (29) приводит к следующему результату:

$$- \ln \left| \text{tg} \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\theta}{2} \right) \right| = \pm \frac{x}{\sqrt{\alpha}} + C_2. \quad (31)$$

Применение граничного условия (21) к соотношению (31) приводит к соотношению:

$$C_2 = 0. \quad (32)$$

Постановка (32) в (31) приводит к равенству:

$$\text{tg} \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\theta}{2} \right) = \exp \left( \mp \frac{x}{\sqrt{\alpha}} \right). \quad (33)$$

На основании (33) коэффициент «α» имеет размерность квадрата длины, а величина  $\sqrt{\alpha}$  в (33) определяет зону наиболее интенсивного

ведем интегрирование по частям:

$$\frac{d}{dx} \left[ \alpha \left( \frac{d\theta}{dx} \right)^2 + \sin^2\theta \right] = 0. \quad (23)$$

Интегрирование соотношения (23) приводит к следующему результату:

$$\alpha \left( \frac{d\theta}{dx} \right)^2 + \sin^2\theta = C_1. \quad (24)$$

Для нахождения постоянной интегрирования «C<sub>1</sub>» применим (20) к соотношению (24) в результате находим, что:

$$C_1 = 1. \quad (25)$$

Постановка (25) в (24) позволяет получить следующее соотношение:

$$\alpha \left( \frac{d\theta}{dx} \right)^2 = \cos^2\theta. \quad (26)$$

На основании (26) находим, что:

$$\sqrt{\alpha} \frac{d\theta}{dx} = \pm \cos\alpha. \quad (27)$$

Выражение (27) представляет собой дифференциальное уравнение с разделяющимися переменными. Разделение переменных приводит к следующему уравнению:

$$\frac{d\theta}{\cos\theta} = \pm \frac{dx}{\sqrt{\alpha}}. \quad (28)$$

Интегрирование уравнения (28) приводит к следующему соотношению:

$$\int \frac{d\theta}{\cos\theta} = \pm \frac{x}{\sqrt{\alpha}} + C_2. \quad (29)$$

Вычисление интеграла в выражении (29) позволяет получить следующее соотношение:

изменения угла «θ». Поэтому в качестве величины «α» можно принять следующие равенство:

$$\alpha = \Delta^2, \quad (34)$$

где Δ – линейный размер зоны захвата валками частиц материала.

Разрешая уравнения (33) относительно угла «θ» с учетом (34) можно получить следующие аналитические выражения определяющие изменение угла поворота вектора скорости пластин спрессованного материала при их движении к дополнительным валкам ПВИ:

$$\theta(x) = \frac{\pi}{2} - 2 \arctg \left( e^{\frac{-x}{\Delta}} \right), \text{ если } x \geq 0, \quad (35)$$

и

$$\theta(x) = \frac{\pi}{2} - 2 \arctg \left( e^{\frac{x}{\Delta}} \right), \text{ если } x \leq 0. \quad (36)$$

На рисунке 5 приведена графическая зависимость соотношения (35) и (36) для линейного размера зоны захвата дезагрегирующими валками пластин спрессованного материала  $\Delta = 0,25$

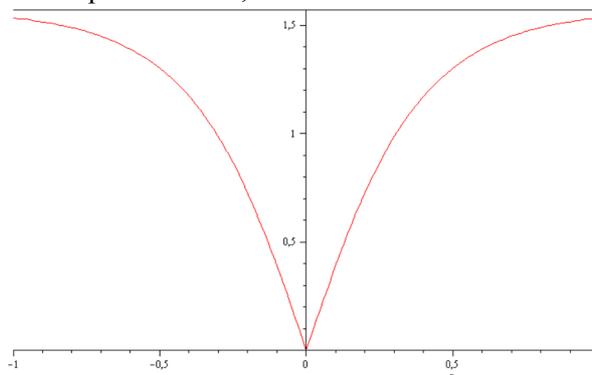


Рис. 5. График изменения направления движения материала к дезагломерирующим валкам агрегата

Таким образом, разработана опытно-промышленная конструкция ПВИ включающая в себя загрузочный бункер, установленные на раме конические валки и дезагломерирующее устройство, которое состоит из дополнительных валков, имеющих обратную основным валкам конусность, позволяет совместить в себе процессы измельчения и дезагрегации спрессованных материалов. Создавая тем самым, силовое воздействие в направлении наименьшей прочности спрессованных пластин, что позволяет повысить эффективность от использования агрегата. Анализ графической зависимости построенной по полученным уравнениям (35) и (36) для линейного размера зоны захвата дезагрегирующими валками пластин спрессованного материала, представленной на рисунке 5, позволил сделать вывод, что интенсивное изменение угла  $\theta(x)$  происходит на интервале от нуля до 0,25 метра. Это должно быть учтено при конструировании пресс-валкового измельчителя с устройством для дезагломерации материалов.

*\*Работа выполнена в рамках Программы стратегического развития БГТУ им. В.Г. Шухова на 2012–2016 годы.*

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шонерт К., Кноблах О. Измельчение цемента в валковом измельчителе в постели материала // *Zement-kalk gips* 1986. Т.37. №1 р.1–9.
2. Романович А.А., Орехова Т.Н., Мещеряков С.А., Прокопенко В.С. Технология получения минеральных добавок // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2015. №5. С. 188–192.
3. Romanovich A.A. Performance review and principal directions for development of a grinding

метра. Анализ поведения кривой, представленной, на рисунке 5 позволяет сделать вывод, что интенсивное изменение угла  $\theta(x)$  происходит на интервале от нуля до 0,25 метра.

equipment in cement factory // *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2014. Т. 9. № 1 С. 2367–2370.

4. Скобло Л.И. Дайджест по материалам журнала *Zement-Kalk-Gips* №12 1996г. и №3, №4 1997г. // *Цемент и его применение*. 1997. №3. С. 41–43.

5. Романович А.А., Воробьев Н.Д., Апухтина И.В. Определение усилия уплотнения материалов в валковом устройстве // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2016. № 7. С. 107–111.

6. Романович А.А. Исследование процесса предуплотнения анизотропных материалов в пресс-валковом измельчителе // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2011. № 11. С. 56–60.

7. Sevost'yanov V.V., Targonskii I.I., Romanovich A.A., Goncharov A.A. Energy saving milling aggregates with internal recycling of the milled materials // *Glass and Ceramics*. 1993. Т. 50. № 4. С. 180–184.

8. Маркворт Л., Венцель Д. Технология и оборудование для обогащения полезных ископаемых // *Горная промышленность*. 2005. 27–29.

9. Romanovich A.A., Bogdanov V.S., Romanovich L.G., Romanischin D.V. Determination of power mill spent on the creation of the longitudinal motion of the grinding load // *Journal of Applied Engineering Science*. 2015. Т. 13. № 3. С. 155–160.

10. Romanovich L.G., Romanovich M.A., Vybornova V.V., Riapukhina V.N. Small businesses is a sphere of innovation in the age of globalization // *Journal of Applied Engineering Science*. 2014. Т. 12. № 4. С. 297–301.

---

**Romanovich A.A., Voronov V.P., Meshcheryakov S.A., Apukhtina I.V.**  
**ASSEMBLY FOR GRINDING PRESSURE AND DISAGGREGATION**  
**PRESSED MATERIALS**

*The article describes the design of a pilot plant PVI includes a feed hopper mounted on the frame of the conical rolls and designersusa device, which consists of additional rolls with a reverse taper rolls the main. allows to combine the processes of comminution and disaggregation of compressed materials. We theoretically studied the implementation of directional movement pressed into the plate material from the main to the additional rolls desagglomeration device. Presents an analysis of the graphic curves constructed according to the obtained equations for the linear size of the capture zone dezagregarea rolls plates of pressed material. It is concluded that the intensive change of the angle is on the interval from zero to 0.25 meters, which should be taken into account when designing the press roller cutter device for desagglomeration materials.*

**Key words:** *press roller chopper, pressed material, directional movement.*

---

**Романович Алексей Алексеевич**, доктор технических наук, проф. кафедры подъемно-транспортных и дорожных машин.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

E-mail: AlexejRom@yandex.ru

**Воронов Виталий Павлович**, кандидат технических наук, проф. кафедры механическое оборудование и технология машиностроения.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Мещеряков Сергей Анатольевич**, инженер кафедры подъемно-транспортных и дорожных машин.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

E-mail: ms4488@mail.ru

**Апукhtина Инна Васильевна**, ассистент кафедры общей математики.

Белгородский государственный университет

Адрес: Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85.