

DOI: 10.12737/article\_5a27cb897eed69.52407990

<sup>1</sup>Гавриленко А.В., канд. техн. наук, асс.,  
<sup>1</sup>Богданов В.С., д-р техн. наук, проф.,  
<sup>1</sup>Лозовая С.Ю., д-р техн. наук, проф.,  
<sup>1</sup>Фадин Ю.М., канд. техн. наук, проф.,  
<sup>1</sup>Кулаков Л.С., магистрант,  
<sup>1</sup>Гавшин А.П., студент,

<sup>2</sup>Тюфанова Ю.В., специалист по оборудованию

<sup>1</sup>Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

<sup>2</sup>ООО «Объединенные кондитеры»

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОСНОВНЫХ ФАКТОРОВ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ПНЕВМОКАМЕРНОГО НАСОСА\*

andrej.402@mail.ru

Производительность пневмокамерного насоса зависит от таких факторов, как время разгрузки, давление в камере насоса, высота расположения разгрузочной трубы от днища камеры, диаметр разгрузочной трубы, угол раскрытия конфузора, высота расположения аэрационного устройства от днища камеры, количество сопел аэрационного устройства и другие, но основными являются такие как давление в камере насоса –  $P$ , высота расположения разгрузочной трубы от днища камеры –  $h_{rt}$ , высота расположения аэрационного устройства от днища камеры –  $h_a$ . В статье рассмотрено влияние основных факторов на время разгрузки камеры насоса, выбраны диапазоны их варьирования. Получены уравнения регрессии времени разгрузки камеры насоса и производительности насоса при фиксированных значениях давления в камере насоса, высоты расположения разгрузочной трубы от днища камеры, высоты расположения аэрационного устройства от днища камеры.

**Ключевые слова:** сжатый воздух, пневмокамерный насос, сыпучий материал, мультисопловое аэрационное устройство, псевдооживление, производительность насоса, время разгрузки камеры.

В ходе реализации и обработки результатов экспериментов получено уравнение регрессии  $G_y(\tau_r) = f(P_{изб}; h_{rt}; h_a)$ , которое показывает изменение времени выгрузки порции материала (цемента) 50 кг и секундной производительности в зависимости от основных факторов.

$$\tau_r = 7,5 - 3,3x_1 + 3,7x_2 + 0,8x_3 + 0,8x_1x_3 + 0,3x_2x_3 + 1,2x_1^2 + 5,6x_2^2 + 1,6x_3^2. \quad (1)$$

Анализируя уравнения регрессии (1) определим значимость факторов (рис. 1): избыточное давление  $P_{изб} = 42\%$ ; высота расположения разгрузочной трубы от днища камеры  $h_{rt} = 47\%$ ; высота расположения аэрационного устройства от днища камеры  $h_a = 11\%$ .

Наибольшее влияние на величину времени разгрузки оказывает фактор (высота расположения разгрузочной трубы от днища камеры  $h_{rt} = 47\%$ ), а наименьшее значение фактор  $x_3$  (высота расположения аэрационного устройства от днища камеры  $h_a = 10\%$ ), которое почти в 5 раз меньше [1–4].

Уравнение регрессии времени разгрузки  $\tau_r$  порции материала в кодированном виде имеет вид

Влияние фактора  $x_1$  (избыточное давление  $P_{изб} = 42\%$ ) примерно равно влиянию фактора  $x_2$ , и примерно в 4 раза больше влияния фактора  $x_3$ . Отрицательный знак при факторе  $x_1$  показывает, что с его увеличением значение времени разгрузки уменьшается. Положительный знак при коэффициентах факторов  $x_2$  и  $x_3$  показывает на то, что при их повышении время разгрузки увеличивается. Значение коэффициента при члене уравнения совместного влияния  $x_1x_2$  указывает на то, что было полностью охвачено факторное пространство данных членов.

Уравнение регрессии в декодированном виде имеет вид

$$\tau_r = 177,5 - 102P - 1,3h_{rt} - 2,7h_a + 0,4Ph_a + 0,002 h_{rt}h_a + 1,2P^2 + 5,6 h_{rt}^2 + 1,6 h_a^2. \quad (2)$$

С помощью программного пакета получена поверхность, на которой любая точка показывает, при каких значениях факторов можно получить минимальное время разгрузки  $\tau_r = 6$  с, а именно при сочетании значений избыточного

давления, высот расположения разгрузочной трубы от днища камеры и аэрационного устройства в интервалах 1,2–1,5 атм., 34–59 мм и 40–59 мм соответственно. Геометрические пара-

метры регулируются конструктивно, т.к. это заложено при конструировании и изготовлении лабораторной установки, а избыточное давление влияет на расход воздуха, а следовательно на энергозатраты процесса транспортирования, то можно предположить, что целесообразно использовать значения факторов в точке А (рис. 2), выбирая минимальное значение давления:  $P_{изб} = 1,2$  атм.,  $h_{rt} \approx 55$  мм,  $h_a \approx 55$  мм, но это не означает, что при названных параметрах получим макси-

мальную производительность. Анализируя результаты экспериментов при  $P_{изб} = 1,5$  атм.,  $h_{rt} \approx 55$  мм,  $h_a \approx 55$  мм время разгрузки  $\tau_r = 6$  с, производительность равна  $G_y = 8,3$  кг/с, но непонятно какая производительность при давлении  $P_{изб} = 1,2$  атм. Поэтому необходимо рассмотреть влияние основных факторов на секундную производительность, как одного из основных технико-экономических показателей работы любого устройства.

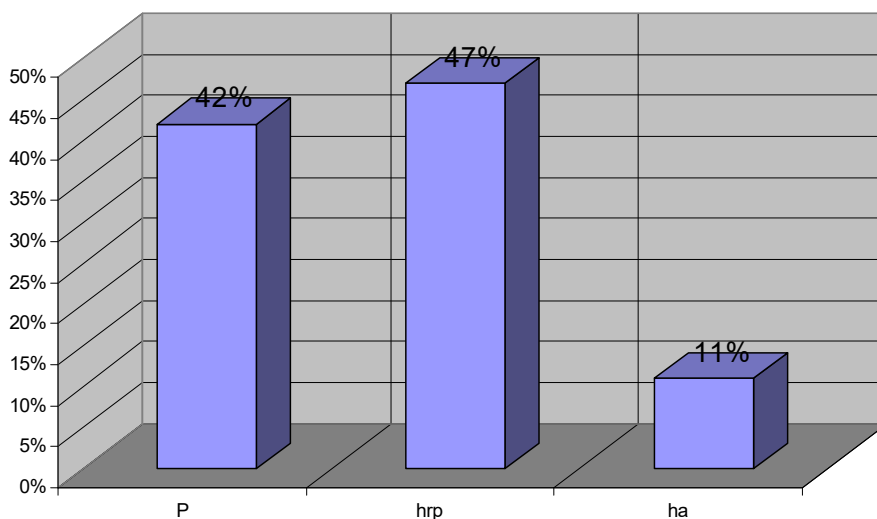


Рис. 1. Значимость основных факторов при времени разгрузки

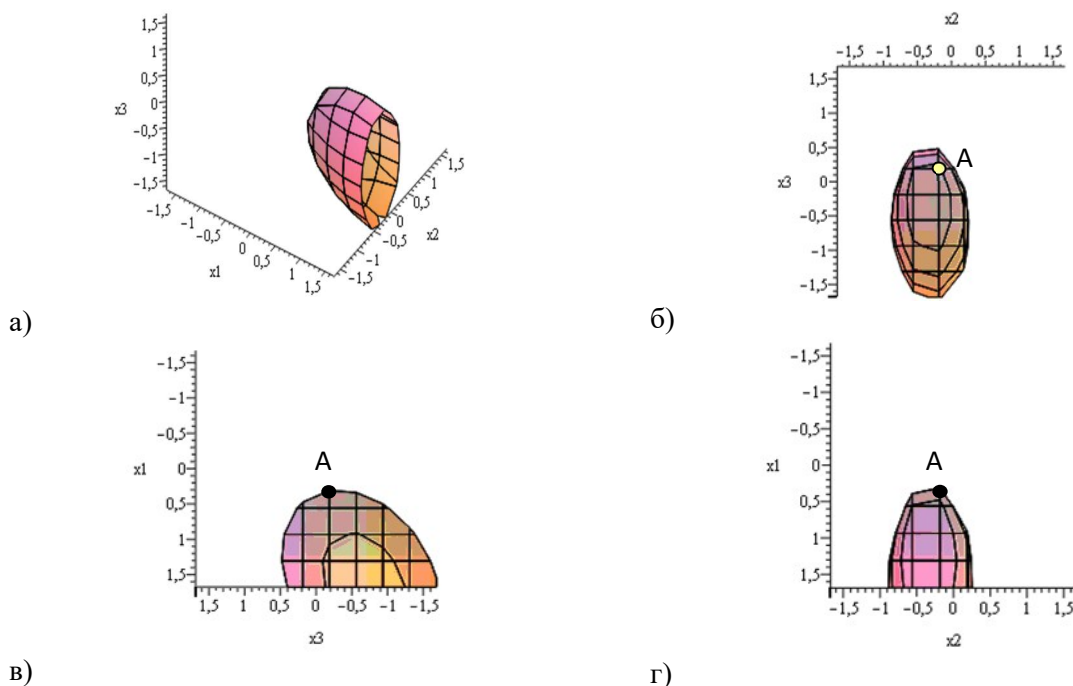


Рис. 2. Графические структуры, отображающие минимальную фиксированную величину времени разгрузки  $\tau_r = 6$  с от основных факторов:

а) 3х мерное изображение, б) проекция на ось  $x_1$ , в) проекция на ось  $x_2$ , г) проекция на ось  $x_3$

Уравнение регрессии секундной производительности  $G_y$  в кодированном виде имеет вид

$$G_y = 6,6 + 1,4x_1 - 0,8x_2 - 0,4x_3 - 0,56x_1x_2 - 0,4x_1x_3 + 0,2x_2x_3 + 0,34x_1^2 - 1,6x_2^2 - 0,8x_3^2. \quad (3)$$

Анализируя уравнения регрессии (3), определим значимость факторов (рис. 3). Наибольшее влияние на величину производительности оказывает фактор  $x_1$  (избыточное давление  $P_{изб} = 54\%$ ), а знак «+» показывает на то, что при его увеличе-

нии увеличивается функция отклика. Отрицательный знак при коэффициентах факторов  $x_2$  и  $x_3$  показывает на то, что при их повышении производительность уменьшится. Значимость факторов  $x_2$  и  $x_3$  равны 31% и 15%, что меньше влияния фактора  $x_1$  в 1,7 и 3,6 раз соответственно.

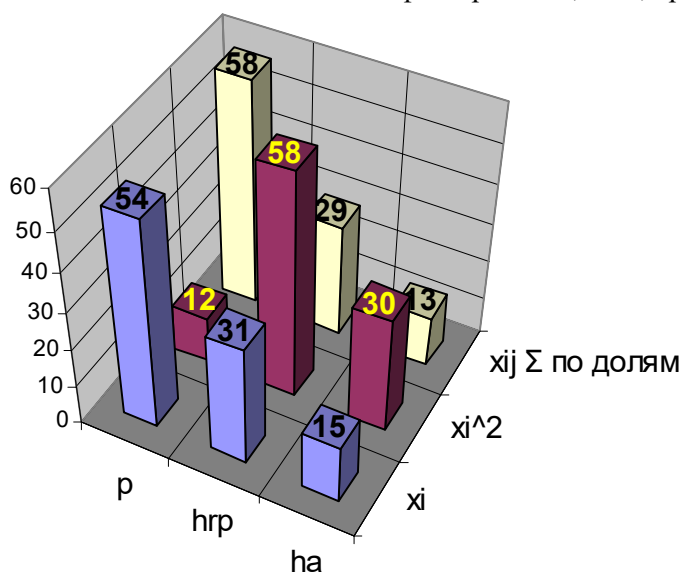


Рис. 3. Значимость основных факторов для секундной производительности:

■  $x_i$  -  $x_1$  ( $P_{изб}$ ) = 54%;  $x_2$  ( $h_{r1}$ ) = 31% ;  $x_3$  ( $h_a$ ) = 15% ;

■  $x_i^2$  -  $x_1$  ( $P_{изб}$ ) = 12%;  $x_2$  ( $h_{r1}$ ) = 58% ;  $x_3$  ( $h_a$ ) = 30% ;

□  $x_{ij} \Sigma$  по долям -  $x_1$  ( $P_{изб}$ ) = 58%;  $x_2$  ( $h_{r1}$ ) = 29% ;  $x_3$  ( $h_a$ ) = 13%

Так как значимость фактора  $x_3$  относительно мала, то для упрощения анализа влияния факторов на производительность принимаем значение высоты расположения аэрационного устройства

от днища камеры равным  $h_a = 55$  мм значению основного (нулевого) уровня варьирования.

Уравнение регрессии в декодированном виде имеет вид

$$G_y = -65,8 + 3P + 0,5h_{r1} + 1,2h_a - 0,12Ph_{r1} - 0,21Ph_a + 0,001 h_{r1}h_a + 7,71P^2 - 0,004h_{r1}^2 - 0,01h_a^2. \quad (4)$$

Используя аналитический пакет Maple 13, были построены трехмерные фигуры, показыва-

ющие зависимость производительности от изменения основных факторов при фиксированных значениях  $G_y = 8,3; 7,3; 6,3$  кг/с (рис. 4).

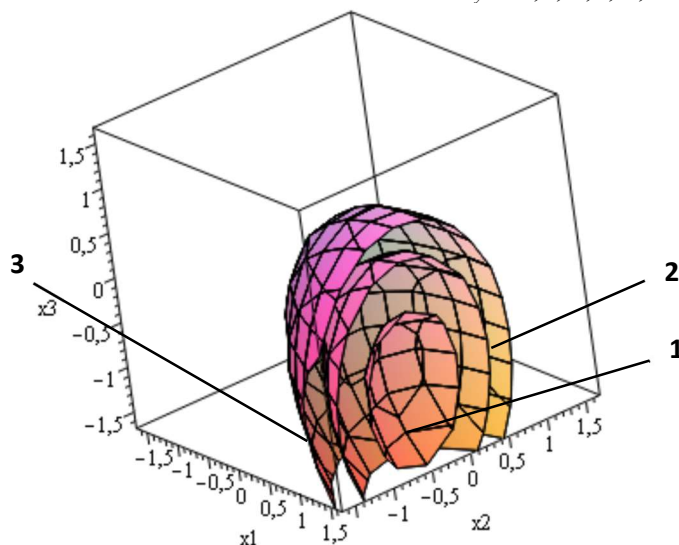


Рис. 4. Графические структуры, отображающие фиксированные величины производительности в зависимости от основных факторов:

1 -  $G_y = 8,3$  кг/с; 2 -  $G_y = 7,3$  кг/с; 3 -  $G_y = 6,3$  кг/с

На рис. 5 отображена поверхность, на которой любая точка показывает, при каких значениях факторов можно получить максимальную секундную производительность  $G_y = 8,3$  кг/с, а именно при сочетании значений избыточного

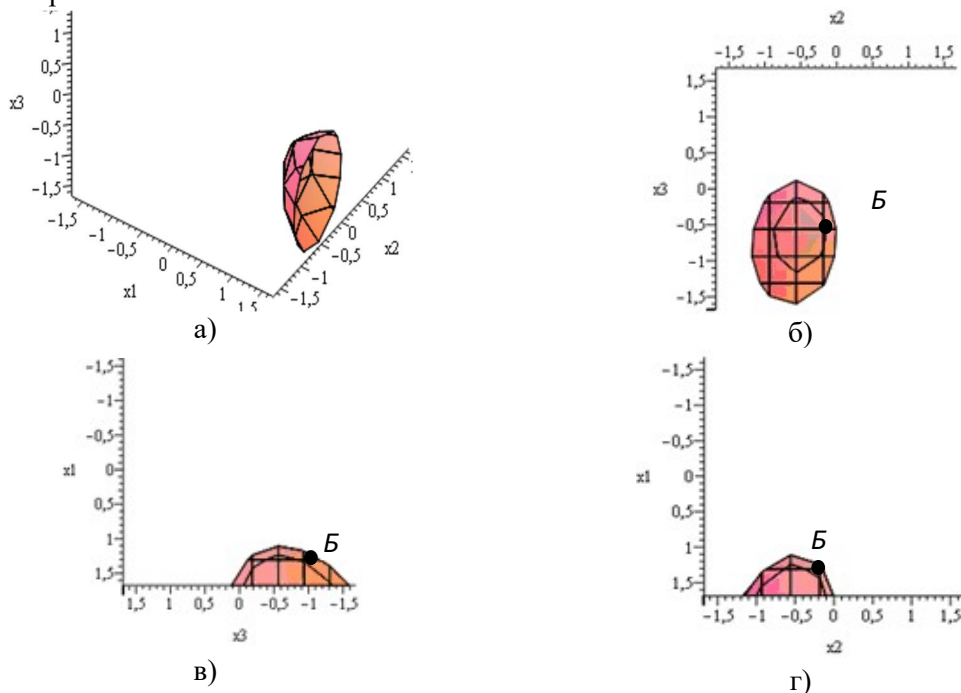


Рис. 5. Графические структуры, отображающие максимальную фиксированную величину производительности  $G_y = 8,3$  кг/с от основных факторов:

а) 3х мерное изображение, б) проекция на ось  $x_1$ , в) проекция на ось  $x_2$ , г) проекция на ось  $x_3$

Геометрические параметры регулируются конструктивно, т.к. это заложено при конструировании и изготовлении лабораторной установки, а избыточное давление влияет на расход воздуха, а, следовательно, на энергозатраты процесса транспортирования, то можно предположить, целесообразно использовать значения факторов в точке *Б* (рис. 5), выбирая минимальное значение давления:  $P_{изб} = 1,36$  атм.,  $h_{rt} \approx 45$  мм,  $h_a \approx 50$  мм.

Определено, что значимость основных факторов, влияющих на функции отклика распределяется следующим образом: времени разгрузки  $\tau_r$  – избыточное давление 42 %; высота расположения разгрузочной трубы от днища камеры 47%; высота расположения аэрационного устройства от днища камеры 10 %; секундной производительности  $G_y$  (кг/с) –  $P_{изб} = 54$  %;  $h_{rt} = 31$  %;  $h_a = 15$  %; расхода воздуха  $Q_y$  (м<sup>3</sup>/т) –  $P_{изб} = 51$  %;  $h_{rt} = 41$  %;  $h_a = 8$  %.

Установлено, что минимальное время разгрузки  $\tau_r = 6$  с при минимальном значении давления:  $P_{изб} = 1,5$  атм. и расстояниях от дна камеры насоса до разгрузочной трубы  $h_{rt} \approx 55$  мм и аэрационного устройства  $h_a \approx 55$  мм.

Установлено, что зависимости  $G_y$  от изменения избыточного давления и высоты расположения аэрационного устройства от днища камеры

давления, высот расположения разгрузочной трубы от днища камеры и аэрационного устройства в интервалах 1,36–1,5 атм., 28–55 мм и 40–58 мм соответственно.

на всем диапазоне их варьирования при фиксированных значениях высоты расположения аэрационного устройства от днища камеры показал, что они не линейны и носят возрастающий характер. При высоте разгрузочной трубы от днища камеры  $h_{rt} = 20$ –34 мм, и для значений высоты аэрационного устройства от днища камеры  $h_a = 40$  мм и  $h_a = 46$ –55 мм при минимальном  $P_{изб} = 0,8$  атм. производительность равна  $G_y = 5,4$  кг/с и  $G_y = 7,2$  кг/с, соответственно. Также при максимальном значении избыточного давления 1,5 атм. производительность максимальна  $G_y = 8,4$  кг/с при  $h_{rt} = 34$  мм,  $h_a = 46$  мм, а при  $h_{rt} = 55$  мм,  $h_a = 55$  мм,  $P_{изб} = 0,8$  атм.  $G_y = 7,5$  кг/с. При увеличении давления почти в 2 раза производительность увеличится примерно в 1,2 раза и 1,1 раз, соответственно.

*\*Работа выполнена в рамках Программы развития опорного университета на базе БГТУ им. В.Г. Шухова.*

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Богданов В.С., Лозовая С.Ю., Фадин Ю.М., Гавриленко А.В., Кулаков Л.С., Гавшин А.П. Исследование мультисоплового аэрационного устройства в пневмокамерном насосе // Вестник БГТУ. 2017. № 8. С. 145–148.
2. Богданов В.С., Фадин Ю.М., Шаптала

В.В., Гавриленко А.В., Характеристики потоков цементно-воздушной смеси при пневмотранспортировании цемента // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. № 2. С. 110–112.

3. Гавриленко А.В., Определение потерь давления в установке пневматического транспорта материалов // Вестник ИрГТУ. 2015. №4. С.

23–26.

4. Bogdanov V.S., Fadin Yu.M., Lozovaya S.Yu., Gavrilenko A.V. Research of influence of the main parameters on the capability of the pneumatic chamber pump with multijet aeration unit // International Journal of Pharmacy & Technology. 2016. T. 8. №. 4. С. 24669–24680.

*Информация об авторах*

**Гавриленко Андрей Владимирович**, кандидат технических наук, ассистент кафедры механического оборудования.

E-mail: andrej.402@mail.ru

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

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

**Богданов Василий Степанович**, доктор технических наук, профессор кафедры механического оборудования.

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

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

**Лозовая Светлана Юрьевна**, доктор технических наук, профессор кафедры механического оборудования.

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

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

**Фадин Юрий Михайлович**, кандидат технических наук, профессор кафедры механического оборудования.

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

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

**Кулаков Леонид Сергеевич**, магистрант кафедры механического оборудования.

E-mail: leo.kulakov@mail.ru

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

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

**Гавшин Алексей Петрович**, студент кафедры механического оборудования.

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

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

**Тюфанова Юлия Викторовна**, специалист по оборудованию.

ООО «Объединенные кондитеры».

Россия, 308006, Белгород, ул. Волчанская, д. 167

---

*Поступила в сентябре 2017 г.*

© Гавриленко А.В., Богданов В.С., Лозовая С.Ю., Фадин Ю.М., Кулаков Л.С., Гавшин А.П., Тюфанова Ю.В., 2017

---

**Gavrilenko A.V., Bogdanov V.S., Lozovaja S.Y., Fadin Y.M., Kulakov L.S.,  
Gavshin A.P., Tyufanova Y.V.  
INVESTIGATION OF THE IMPACT ON MAIN FACTORS ON PERFORMANCE  
OF AIR-CAMERA PUMP**

*The capacity of the air chamber pump depends on such factors as the discharge time, the pressure in the pump chamber, the height of the unloading pipe from the bottom of the chamber, the diameter of the discharge pipe, the opening angle of the confuser, the height of the aeration device from the bottom of the chamber, the number of nozzles of the aeration device and others, such as the pressure in the pump chamber -  $P$ , the height of the discharge pipe from the bottom of the chamber -  $h_r$ , the height of the arrangement of the aeration device from the bottom of the chamber -  $h_a$ . The influence of the main factors on the discharge time of the pump chamber is considered in the article, the ranges of their variation are chosen. Regression equations for the discharge time of the pump chamber and pump capacity are obtained for fixed values of pressure in the pump chamber, the height of the discharge pipe from the bottom of the chamber, and the height of the arrangement of the aeration device from the bottom of the chamber.*

**Keywords:** *compressed air, pneumatic chamber pump, granular material, melissophobia aeration device, the fluidization, pump capacity, time of unloading the camera.*

---

*Information about the authors*

**Gavrilenko Andrey Vladimirovich**, PhD, Assistant.

E-mail: Andrej.402@mail.ru.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.

Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Bogdanov Vasiliy Stepanovich**, PhD, Professor.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.

Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Lozovaya Svetlana Yurevna**, PhD, Professor.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.

Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Fadin Yuriy Mihaylovich**, PhD, Professor.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.

Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Kulakov Leonid Sergeevich**, Bachelor student.

E-mail: leo.kulakov@mail.ru.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.

Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Gavshin Aleksey Petrovich**, Bachelor student.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.

Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Tyufanova Yuliya Viktorovna**, equipment specialist.

ООО «United confectioners».

Russia, 308006, Belgorod, st. Volchanskaya, 167.

---

*Received in September 2017*

© Gavrilenko A.V., Bogdanov V.S., Lozovaya S.Y., Fadin Y.M., Kulakov L.S., Gavshin A.P., Tyufanova Y.V., 2017