

# МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

*Ильина Т.Н., д-р техн. наук, проф.,  
Бойчук И.П., канд. техн. наук, доц.,  
Емельянов Д.А., аспирант*

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

## О ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ЧАСТИЦ ТЕХНОГЕННЫХ ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ В ВОЗДУШНОМ ПОТОКЕ\*

[ilina50@rambler.ru](mailto:ilina50@rambler.ru)

*Исследовано движение частиц техногенных волокнистых материалов в воздушном потоке под действием центробежных сил. Рассмотрена совокупность сил, действующих на частицу в процессе движения материально-воздушного потока в торообразной камере. Представлено математическое описание движения газодисперсного потока.*

**Ключевые слова:** техногенные волокнистые материалы, двухфазные потоки, скорость витания, агломерация, пневмомеханический гранулятор.

**Введение.** При комплексной переработке и утилизации различных техногенных материалов экономия топливно-энергетических ресурсов является одной из актуальных задач. Многие техногенные образования, в частности отходы предприятий целлюлозно-бумажной промышленности, являются ценным технологическим сырьем и могут быть вовлечены в технологическое производство с целью получения композиционных материалов с последующим изготовлением из них материалов гражданского и промышленного назначения.

В БГТУ им. В. Г. Шухова спроектирован и изготовлен малотоннажный технологический комплекс для производства экструдированных техногенных материалов, который является инновационным предприятием по производству конкурентоспособных стабилизирующих добавок для щебеночно-мастичного асфальтобетона [1, 2]. В процессе наладки и эксплуатации технологического комплекса была выявлена необходимость исследования поверхностных свойств техногенных волокнистых материалов с целью разработки устройства для предварительной агломерации измельченных материалов, что позволит снизить нагрузку на фильтр и вернуть в производство часть унесенного воздушным потоком материала.

**Основная часть.** Для повышения эффективности работы комплекса необходимо производить предварительное уплотнение измельченного волокнистого материала, что обеспечивает лучшие условия работы основного гранулятора. В связи с этим был разработан

патентнозащищенный аппарат для пневмомеханического гранулирования техногенных материалов. Аппарат включает в себя бункер с патрубком, две торообразные камеры, расположенные вертикально, соединенные между собой разгонной трубкой. За счет использования в аппарате торообразных камер достигается наибольшая совокупность сил, вызванных изменением направления движения воздуха [3].

Для изучения процесса гранулирования при утилизации техногенных волокнистых материалов были произведены исследования их физико-химических параметров: размер и форма частиц, скорость их витания при различной объемной концентрации, удельная поверхность и другие поверхностные свойства [4, 5].

Для исследования способности частиц к агломерации в воздушном потоке создана экспериментальная установка (рис. 1).

Установка состоит из двух торообразных камер, верхней (1) и нижней (2), расположенных горизонтально одна над другой. Подача воздушно-материальной смеси осуществляется по трубопроводу (3), который тангенциально соединен с верхней торообразной камерой. В торообразной камере на поток действуют центробежные силы, благодаря которым происходит агломерация частиц материала. После этого агломераты перемещаются во вторую камеру и дополнительно уплотняются и увеличиваются в размерах. Затем частицы микрогранул попадают в бункер (4), где сформованный микрогранулят ссыпается вниз, а освобожденный от них воздух устремляется

вверх и уходит из бункера через зонд в выхлопную трубу (5).

Исходным материалом для настоящих исследований служит измельченный в шредере и молотковой дробилке картон и плотная бумага типа ватман. Истинная плотность измельченного картона составляет  $680 \text{ кг/м}^3$ , плотность измельченного ватмана –  $889 \text{ кг/м}^3$ .

Средний размер частиц –  $6,8 \text{ мкм}$ . Для изучения гидродинамических характеристик были произведены замеры скорости воздушного потока в установке. По полученным данным произведен расчет критерия Рейнольдса, который, согласно полученным результатам, соответствует турбулентному режиму.

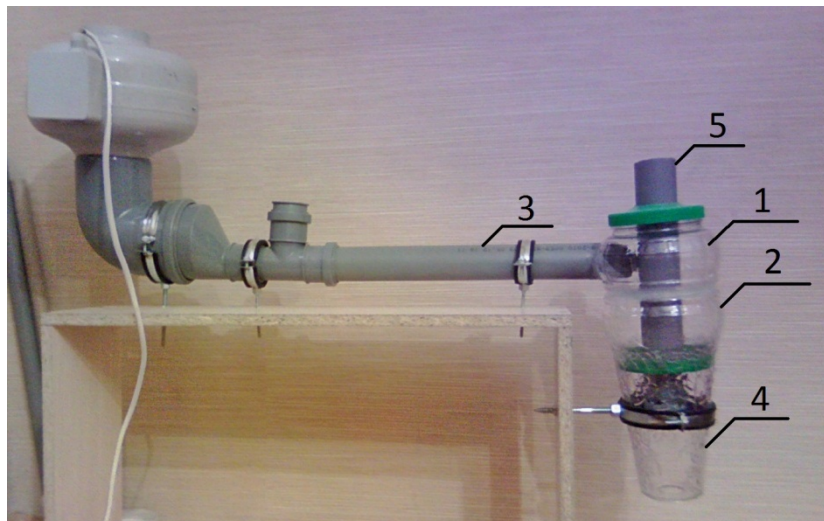


Рис. 1. Экспериментальная установка для исследования способности волокнистых частиц к агломерации в воздушном потоке

### Движение в торообразной камере.

Движение дисперсной фазы в торообразном грануляторе носит исключительно сложный характер и в настоящее время не существует точных математических моделей его описания. На движение дисперсной фазы существенное влияние оказывают следующие факторы [6, 7]:

1. Полидисперсность классифицируемых материалов. Наиболее мелкие частицы, подверженные влиянию турбулентных пульсаций воздуха, образуют своеобразную «аэрозольную жидкость», движение которой описывается законами механики сплошной гетерогенной среды. Движение более крупных частиц происходит в усредненном аэродинамическом поле и сохраняет упорядоченный траекторный характер. Движение этих частиц описывается законами классической механики твердых материальных частиц.

2. Стесненный характер движения частиц. Данный фактор проявляется при высоких значениях весовой концентрации твердой фазы ( $\mu \geq 20 \text{ кг/кг}$ ). Поскольку характер движения частиц зависит от их размеров, то наряду с полной весовой концентрацией материала  $\mu$ , следует рассматривать и фракционную весовую концентрацию  $\mu_i$  для частиц со средним по фракции размером  $\delta_i$ .

3. Взаимодействие частиц с твердыми поверхностями торообразного гранулятора. В том случае, когда частицы являются упругими телами, в результате взаимодействия с твердыми поверхностями происходит отскок частиц, их интенсивное закручивание, в результате чего траектории движения частиц резко изменяются, что оказывает двойное влияние на процесс грануляции. Поэтому необходим анализ особенностей движения частиц во внутреннем пространстве торообразной камеры.

Описание гетерогенных потоков будем производить с точки зрения эйлерово - лагранжева подхода. В этом случае уравнения движения газовой фазы будут задаваться в эйлеровом подходе, а движение дисперсной фазы будет задаваться интегрированием уравнений движения лагранжева подхода вдоль траекторий газовой фазы. Такой подход даст нам возможность получения детальной информации о движении изолированной частицы в известном поле несущего газа.

Движение вязкой несжимаемой жидкости описывается системой уравнений неразрывности, импульса и энергии:

$$\text{div} \vec{V} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = \vec{f} - \frac{1}{\rho} \text{grad} p + \nu \Delta \vec{V}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{V} \cdot \text{grad} T = a \Delta T, \quad (3)$$

где  $\vec{V}$  – вектор скорости,  $\rho$  – плотность,  $p$  – давление,  $T$  – температура,  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости,  $a$  – коэффициент температуропроводности,  $\vec{f}$  – плотность распределения объемных сил.

Движение частицы в газовой среде описывается уравнениями движения твердого тела

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = \sum_i \vec{F}_i, \quad (4)$$

$$\frac{d\vec{L}_o}{dt} = \sum_i \vec{M}_o(\vec{F}_i), \quad (5)$$

где  $\vec{v}$  – скорость движения частицы,  $\sum_i \vec{F}_i$  – главный вектор действующих на частицу в газовом потоке сил соответственно,  $\vec{L}_o$  – главный момент количества движения тела относительно центра  $O$ ,  $\sum_i \vec{M}_o(\vec{F}_i)$  – главный момент действующих на частицу сил относительно того же центра.

Система уравнений (1) – (5) замыкается уравнением состояния газа, а также начальными

и граничными условиями для газовой и дисперсной фазы.

В общем случае на частицу, движущуюся в потоке газа, могут оказывать влияние различные силовые факторы; сила тяжести, сила аэродинамического сопротивления, архимедова сила, сила Магнуса, сила Сэфмена, сила турбофореза и сила термофореза. Наличие либо отсутствие влияния той или иной силы и степень этого влияния определяется в каждом конкретном случае условиями самой задачи. Механизм возникновения и выражения для данных сил описаны в многочисленной литературе (см., например, [7]). При этом следует учитывать, что приведенные выражения описывают осредненные значения действующих на частицу сил. Такое задание силовой нагрузки не позволяет учесть влияние турбулентности несущей среды на величину этой нагрузки. А при решении системы уравнений (4) – (5) желательно знать мгновенные значения сил.

**Расчет движения изолированной частицы в торообразной камере.** Будем рассматривать движение воздушной смеси согласно [8]. Пусть внутренний объем торообразной камеры ограничен тороидальной поверхностью с радиусом круглой осевой линии  $r_1$  и радиусом круглого поперечного сечения в меридиональной плоскости  $r_2$  (рис. 2 а).

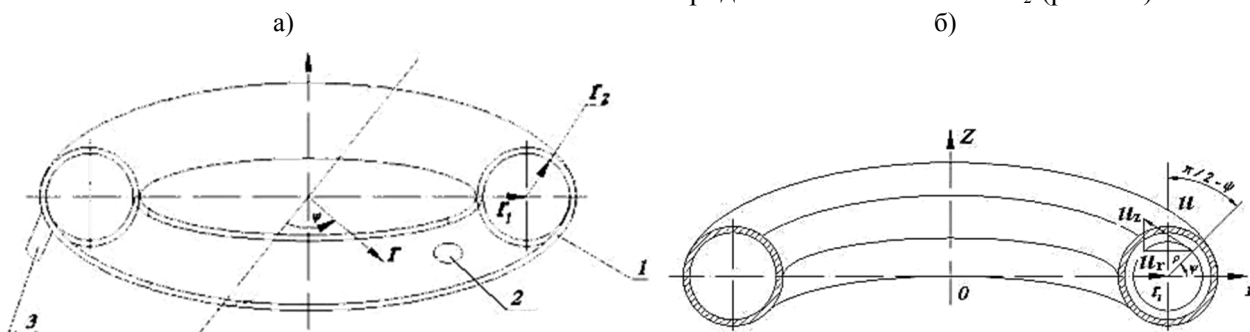


Рис. 2. Торообразный гранулятор: а) ступени гранулятора: 1 – торообразный гранулятор; 2 – отверстие для выхода тонкой фракции; 3 – загрузочное отверстие для входа материала; б) локальная полярная система координат в меридиональном сечении торообразного гранулятора

Внутреннее пространство смесительной камеры в цилиндрической системе координат  $(r, \varphi, z)$  ограничено неравенствами:

$$\begin{aligned} r_1 - r_2 \leq r \leq r_1 + r_2; \quad 0 \leq \varphi \leq 2\pi; \\ -r_2 \leq z \leq r_2. \end{aligned} \quad (6)$$

При этом координаты  $r$  и  $z$  связаны между собой уравнением тороидальной поверхности:

$$(r_1 - r_2)^2 + z^2 = r_2^2. \quad (7)$$

Одним из способов интенсификации процессов грануляции, протекающих в

газодисперсных потоках, является их закрутка вокруг оси канала. При этом повышение эффективности окатывания частиц достигается за счет действия центробежных сил, увеличения относительной скорости движения фаз, возникновения вторичных течений. Для описания характера движения воздушного потока в торообразном грануляторе представим в первом приближении, что тор имеет неограниченно большие размеры. В этом случае движение воздушной и дисперсной фазы в нем можно рассматривать как движение по трубе бесконечно большой длины.

В зоне движения торообразного гранулятора возникает сплошной пространственный поток, в котором линии тока воздуха "навиваются" на концентрические торовые поверхности. Следует выделить две основные составляющие движения этого потока: вращательное движение воздушного потока вокруг оси OZ и вращение потока в меридиональных плоскостях.

Величина и распределение окружной скорости воздушного потока при его вращении вокруг оси OZ, является частным случаем закона площадей и имеет вид:

$$u_\varphi = \omega_1 r, \tag{8}$$

где  $\omega_1$  – угловая скорость воздушного потока,  $r$  – текущий радиус произвольной точки неподвижной системы координат.

Движение воздушного потока в меридиональных плоскостях вокруг криволинейной оси тора также подчинено закону площадей:

$$u_\psi = \omega_2 \rho, \tag{9}$$

где  $u_\psi$  – линейная скорость вращения воздуха в локальной полярной системе координат (рис. 2 б),  $\omega_2$  – меридиональная угловая скорость,  $\rho$  – текущий радиус в локальной системе координат.

Из рис. 2 б, следует связь между координатами точек в неподвижной и локальной системах координат:

$$r = r_1 + \rho \cdot \cos \psi, \quad z = \rho \cdot \sin \psi, \tag{10}$$

а также выражения для составляющих скорости воздушного потока в неподвижной цилиндрической системе координат:

$$u_\varphi = \omega_1 \cdot r; \quad u_r = -\omega_2 \cdot z;$$

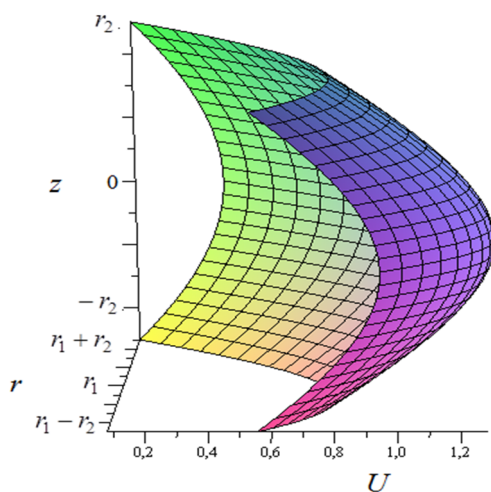


Рис. 3. Эпюра векторов скорости

$$u_z = \omega_2 (r - r_1). \tag{11}$$

В реальных условиях движение воздушного потока в торообразном грануляторе турбулизировано. Соотношения (11) не учитывают турбулентных пульсаций скорости воздушного потока, а описывают лишь усредненное по времени аэродинамическое поле, определяющее движение лишь сравнительно крупных частиц компонентов смеси. Эпюра векторов скорости  $U = (u_r, u_\varphi, u_z)$  движения воздушной среды и профиль скорости в плоскости  $(r, \varphi)$  представлены на рис. 3 и 4.

Винтовое движение является наиболее общим и универсальным случаем движения воздуха в трубопроводах. Движение воздушного потока возникает за местными сопротивлениями весьма устойчиво и напоминает вращение твердого тела. Качественной характеристикой закрутки воздушного потока является угол скоса  $\xi$  – угол между фактическим направлением полной скорости потока и осью трубопровода. Угол скоса вблизи стенки трубопровода достигает  $\xi = 14^\circ$ . Можно предположить, что это значение угла скоса справедливо для движения воздушных потоков в торообразном грануляторе, представляющей собой закольцованный трубопровод круглого сечения (рис. 2 а). В этом случае получим:

$$\frac{u_\psi}{u_\varphi} \Big|_{\rho=r_2} = \tan \xi \approx 0,25. \tag{12}$$

Отсюда, учитывая соотношения (8) и (9), получим связь между угловыми скоростями:

$$\omega_2 = 0,25 \omega_1 \frac{r_1}{r_2}. \tag{13}$$

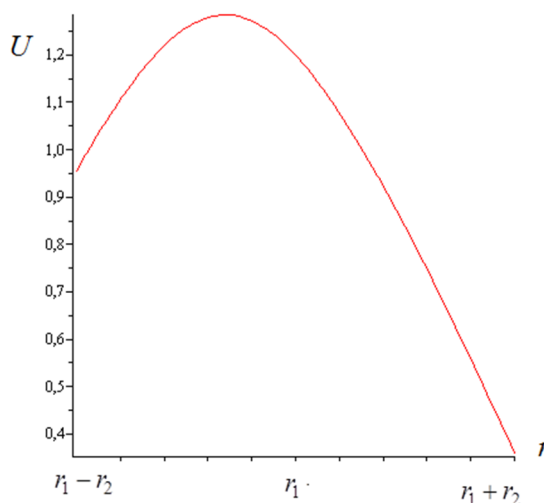


Рис. 4. Профиль скорости в плоскости  $(r, \varphi)$

**Движение дисперсной фазы.** В силу того, что приблизительно 70 % частиц материала, движущегося в торообразном грануляторе, имеет средний размер (5–20) мкм, то влиянием турбулентных пульсаций несущего газа и действием сторонних (внешних) сил [9] на их движение можно пренебречь.

Рассмотрим движение сферической частицы в торообразном грануляторе. При этом будем предполагать, что температура частицы остается постоянной, а основное влияние на движение оказывает сила аэродинамического сопротивления  $F_x = C_x \cdot S \cdot \rho \cdot |\vec{V} - \vec{v}|(\vec{V} - \vec{v})/2$  и сила тяжести  $\vec{G} = m\vec{g}$  [10], где  $C_x$  – коэффициент аэродинамического сопротивления среды,  $S$  – площадь миделевого сечения частицы,  $\rho$  – плотность воздуха,  $V$  – скорость воздуха,  $v$  – скорость частицы. В этом случае уравнения движения частицы будут заданы следующим образом [7]:

$$\frac{dv_i}{dt} = \frac{u_i - v_i}{\tau_p} \pm g, \quad i = 1, 2, 3, \quad (14)$$

$$v_r = \exp \left( -r + \tau\omega_2 z W \left( -\frac{\exp\left(\frac{r}{\tau\omega_2 z}\right) \exp(-1)}{\omega_2 z \exp\left(\frac{C_1}{\tau\omega_2 z}\right)} + \tau\omega_2 z + C_1 \right) / \tau\omega_2 z \right) - \omega_2 z, \quad (19)$$

$$v_\varphi = \omega_1 r + \exp\left(-\frac{\varphi}{\tau\omega_1}\right) \cdot C_2, \quad (20)$$

$$v_z = F_1(W), \quad (21)$$

где  $W$  – функция Ламберта [11],  $F_1(W)$  – линейная комбинация функций Ламберта с аргументами, зависящими от  $r$ ,  $z$  и константы  $C_1$ . В силу громоздкости  $F_1(W)$  не приводится. Константы могут быть найдены из начальных условий (18).

Последние уравнения (19) – (21) моделируют характер движения двухфазного потока в тороидальных камерах пневмомеханического гранулятора.

**Вывод.** Представлены уравнения движения газодисперсной системы в тороидальных камерах пневмомеханического гранулятора, которые являются предпосылкой для описания процессов агломерации частиц в поле центробежных сил материально-воздушного потока.

\* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ и правительства Белгородской области в рамках научного проекта №14-41-08054 р\_офи\_м.

где  $\tau_p$  – время динамической релаксации частиц. После перехода от производных по времени к производным по координатам получим систему уравнений в системе координат, связанной с движущейся жидкостью:

$$v_r \frac{dv_r}{dr} = \frac{u_r - v_r}{\tau_p}, \quad (15)$$

$$\omega_1 \frac{dv_\varphi}{d\varphi} = \frac{u_\varphi - v_\varphi}{\tau_p}, \quad (16)$$

$$v_z \frac{dv_z}{dz} = \frac{u_z - v_z}{\tau_p} - g. \quad (17)$$

Замыкается система начальными условиями:

$$v_r(0) = v_{r0}, \quad v_\varphi(0) = v_{\varphi0}, \quad v_z(0) = v_{z0}. \quad (18)$$

Система уравнений (15)–(17) совместно с уравнениями (13) имеет аналитическое решение:

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Глаголев С.Н., Севостьянов В.С., Гридчин А.М., Уральский В.И., Севостьянов М.В., Ядыкина В.В. Ресурсо-энергосберегающие модули для комплексной утилизации техногенных материалов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2013. № 6. С. 102–106.

2. Пат. 2567519 Российская Федерация, МПК А23К 1/20. Технологическая линия и способ для экструдирования техногенных волокнистых материалов / С.Н. Глаголев, В.С. Севостьянов, А.М. Гридчин, М.В. Севостьянов, П.А. Трубаев, В.И. Уральский, В.И. Филатов, А.В. Кошуков; заявитель и патентообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова. № 2014149776/13, заявл. 09.12.2014; опубл. 10.11.2015, Бюл. № 31. 10 с.

3. Пат. 2538579 Российская Федерация, МПК В01F13/10. Устройство для пневмомеханического гранулирования техногенных материалов / В.С. Севостьянов, Т.Н. Ильина, М.В. Севостьянов, Д.А. Емельянов, А.В. Кошуков; заявитель и патентообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова. № 2013137715/05, заявл. 12.08.2013; опубл. 10.01.2015, Бюл. № 1. 7 с.

4. Емельянов Д.А., Ильина Т.Н. О скорости витания техногенных волокнистых материалов // Актуальные проблемы развития науки и образования: Сб. научн. трудов по материалам Междунар. научно-практ. конф., (Москва, 5 мая 2014 г.), Москва: «АР-Консалт», 2014. Ч.4. С. 109-112.

5. Емельянов Д.А., Плотников К.В. О влиянии объемной концентрации техногенных волокнистых материалов на коэффициент формы частиц в материально-воздушном потоке // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2015. № 3. С. 91–95.

6. Шилаев М.И., Шилаев А.М. Аэродинамика и тепломассообмен газодисперсных потоков: учеб. пособие.- Томск: Изд-во Томск. гос. архит.-строит. ун-та, 2003. 272 с.

7. Вараксин А.Ю. Турбулентные течения газа с твердыми частицами. М.: Физматлит, 2003. 192 с.

8. Ермилов Р.А. Разработка детерминированной математической модели движения газодисперсного потока в торообразном осадителе [Электронный ресурс] / Материалы VII Международного молодежного форума «Образование. Наука. Производство». Белгород. 2015.

9. Артюхов А.Е., Фурса А.С., Москаленко К.В. Классификация и сепарация гранул в вихревых грануляторах // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2015. № 5. С. 15–18.

10. Перельгин Д.Н., Севостьянов В.С., Бойчук И.П., Кузнецова И.А. Исследование ударного контакта абразивных частиц с футеровкой вихре-акустического диспергатора // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2015. №2. С. 122–125.

11. Valluri S.R., Jeffrey D.J., Corless R.M. Some applications

---

**Ильина Т.Н., Бойчук И.П., Емельянов Д.А.**

**ABOUT THE INTERACTION OF PARTICLES OF TECHNOGENIC FIBROUS MATERIALS IN THE AIR FLOW**

*Researched the motion of particles of technogenic fibrous materials in the air flow under the action of centrifugal forces. Reviewed the totality of the forces acting on the particle during the motion of material-air flow in the toroidal chamber. Presented the mathematical description of motion of gas-dispersed flow.*

**Key words:** *technogenic fibrous materials; two-phase flow; soar velocity; agglomeration; rotor granulator.*

---

**Ильина Татьяна Николаевна**, доктор технических наук, профессор кафедры теплогазоснабжения и вентиляции

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

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

E-mail: Ilina50@rambler.ru

**Бойчук Игорь Петрович**, кандидат технических наук, доцент кафедры программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем

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

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

E-mail: igor\_boichuk@mail.ru

**Емельянов Дмитрий Александрович**, аспирант кафедры программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем

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

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

E-mail: dimon8-8@mail.ru