

Машиностроение и машиноведение

УДК 62-238.9

DOI: 10.30987/1999-8775-2021-11-4-10

А.А. Реутов

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ДВЕРИ С МЕХАНИЗМОМ ЗАКРЫВАНИЯ

Определены параметры механизма закрытия, обеспечивающие заданные характеристики движения двери. Получены формулы, определяющие допустимые значения жесткости и деформации пружины доводчика по заданным моментам силы открывания двери. С использованием программного комплекса «Универсальный механизм» разработаны компьютерные модели двери с доводчиком и двери с пружиной. В качестве критериев качества работы механизма закрытия двери рассмотрены

моменты силы открывания двери, время закрытия двери, угловая скорость двери в момент соударения с рамой. Проведено сравнение движения дверей с доводчиком и с пружиной. Показано, что при одинаковых значениях моменты силы открывания, скорость соударения с рамой двери с доводчиком меньше, чем двери с пружиной.

Ключевые слова: доводчик двери, рычажный механизм, динамическая модель.

А.А. Reutov

SIMULATION OF DOOR MOVEMENT WITH A CLOSING MECHANISM

The work objective is to determine the parameters of the closing mechanism that provide the specified characteristics of the door movement.

Research method: computer simulation of the movement of a door with a lock mechanism as a multi-mass dynamic system, taking into account the mechanical characteristics and contact interaction of the lock mechanism.

Research results and novelty. Computer dynamic models of a door with a door closer and a door with a spring have been developed. The moments of the door opening force, the closing time of the door, the angular velocity of the door at the time of impact with the frame are considered as the criteria for the quality of the door closing mechanism. Formulas are obtained that determine the permissible values of stiffness and deformation of the door closer spring according to the specified moments of the door opening force.

The movement of doors with a door closer and with a spring is compared. The parameters of the closing mechanism providing the specified characteristics of the door movement of the considered example are determined. It is shown that with the same values of the opening force moments, the speed of impact with the frame in the case of the door closer is less than the door with a spring.

Conclusions: The developed computer dynamic models of a door with a door closer and a door with a spring make it possible to determine the characteristics of the door movement taking into account the inertial and mechanical characteristics of the door closer and spring mechanisms. The permissible values of stiffness and deformation of the door closer spring can be determined by the specified moments of the door opening force in two positions.

It is established that the forces of air resistance and friction in the hinges of the door cannot create the moment of resistance necessary for smooth closing of the door without a strong impact on the frame with a limited closing time.

The quality criteria that minimize the closing time and the speed of impact of the door with the frame are contradictory. The choice of optimal parameters of the door closing mechanism is possible if one of the criteria is replaced by a restriction.

The developed formulas and computer models are recommended for use in the design of devices that restrict the movement of doors.

Key words: door closer, lever mechanism, dynamic model.

Введение

В качестве механизмов закрытия дверей наиболее часто используют пружины и механические доводчики. Механические доводчики дверей получили повсеместное распространение в гражданских и промышленных зданиях. Механические

доводчики предназначены для автоматического закрытия дверей без участия человека. Правильная настройка доводчика позволяет быстро закрыть дверь, хотя в некоторых случаях доводчик не может полностью закрыть оставленную открытой

дверь, например, из-за давления потока воздуха, трения в шарнирах.

Доводчики разделяют на типоразмеры, различающиеся величиной усилия от-крытия и инерцией дверного полотна. Классификация на основании ширины дверного полотна и его массы включает типоразмеры от EN1 (750 мм, 20 кг) до EN7 (1600 мм, 160 кг) [1].

Изучение потерь тепла при использо-вании доводчиков двери проведено в [2]. Показано, что использование доводчиков большего типоразмера снижает потери тепла из-за уменьшения потока воздуха через дверной проем, но большие вели-чины момента закрывания затрудняют ис-пользование двери и могут нарушить стан-дарт ADA [3].

Согласно стандарта ADA усилие от-крытия двери не должно превышать 22 Н. При настройке пружины доводчика типо-размера EN 1 сила, необходимая для от-крытия двери на 70° , обычно меньше 22 Н, однако настройки доводчиков других типоразмеров не соответствуют стандарту ADA [2].

Вычислительные модели на основе динамики газа использованы для исследо-вания движения одинарной распашной двери, разделяющей два помещения [4]. Моделирование позволило установить влияние расположения стен на движение воздуха. Показано, что градиент скорости воздуха увеличивается при приближении боковых стен к двери. Результаты вычис-лений и экспериментальных исследований обмена воздухом между изолированным помещением и смежной комнатой при

3...7 секундном открытии двери приведе-ны в [5].

Усилие закрытия двери исследовано в [6] с использованием метода конечных элементов и разных планов вычислений. Использование упрощенного плана вычис-лений помогает конструктору разработать концепцию двери даже при отсутствии многих исходных данных.

Модификация дверной системы, снижающая скорость двери в момент за-крытия, предложена в [7]. Математическая модель учитывает трение в шарнире, в уплотнении и защелке, наклон оси шарни-ра, эффект воздушного связывания. Ско-рость двери вычислена с учетом энергии, потребляемой каждым элементом дверной системы.

Целью работы является определение параметров механизма закрытия, обеспе-чивающих заданные характеристики дви-жения двери.

Компьютерное моделирование дви-жения механизма доводчика позволит определять динамические усилия в деталях механизма, необходимые для оценки его прочности и долговечности, быстрее про-водить проектные расчеты по сравнению с аналитическими методами [8].

При расчете механизма доводчика необходимо учитывать ограничения для величины силы открытия двери в разных положениях, ограничения скорости и силы удара двери о раму при закрытии.

На рис. 1 представлен общий вид [9] и расчетная схема механизма доводчика двери.



Рис. 1. Общий вид (а) и расчетная схема (б) механизма доводчика двери

Расчетная схема включает дверь 1, раму двери 2, рычаги 3 и 4, зубчато-реечную передачу 5, пружину 6 и демпфер 7. Для ограничения скорости вращения двери в механизме доводчика используется масляный демпфер. При движении рычагов доводчика масло перетекает из одной камеры в другую и создает момент сопротивления, пропорциональный угловой скорости вращения двери.

Описание компьютерной модели

Компьютерная модель доводчика двери, созданная с использованием программного комплекса (ПК) «Универсальный механизм» (рис. 2), включает 4 тела: дверь, 2 рычага, зубчатую рейку (с поршнем). Дверь с рамой, рычаги с дверью, рамой и между собой соединены вращательными шарнирами.

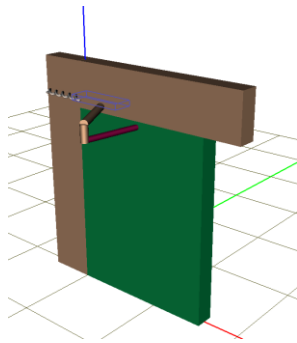


Рис. 2. Модель механизма доводчика двери, созданная в среде ПК «Универсальный механизм»

Пружина и масляный демпфер механизма доводчика создают линейную силу S , приложенную к зубчатой рейке

$$S = C(x + x_0) + d_1 v, \quad (1)$$

где C – жесткость пружины, x – перемещение зубчатой рейки, x_0 – предварительное сжатие пружины, d_1 – коэффициент демпфирования поршня, v – скорость перемещения поршня демпфера.

Трение в дверных петлях и сопротивление воздуха при движении двери учтены в шарнирном моменте M шарнира вращения двери.

$$M = d_0 \text{sign}(\omega) + d_2 \omega, \quad (2)$$

где d_0 – постоянный момент трения в дверных петлях, d_2 – коэффициент демп-

Критерии качества работы доводчика двери

Оценим качество работы доводчика двери с помощью следующих критериев: M_0 – момент силы открывания двери (при угле раскрытия двери $\varphi = 0$ и угловой ско-

ривания двери, ω – угловая скорость двери.

Сила удара двери о раму при закрытии представлена контактным элементом «точка-плоскость», описанным в Руководстве пользователя ПК «Универсальный механизм» [10].

Для сравнения, также в среде ПК «Универсальный механизм», создана компьютерная модель двери, закрываемой пружиной (рис. 3).

Эта компьютерная модель включает одно тело – дверь, вращающуюся относительно вертикальной оси. Сила пружины представлена линейной биполярной силой вида (1).

Момент сопротивления вращению двери представлен шарнирным моментом (2). Сила удара двери о раму также представлена контактным элементом «точка-плоскость».

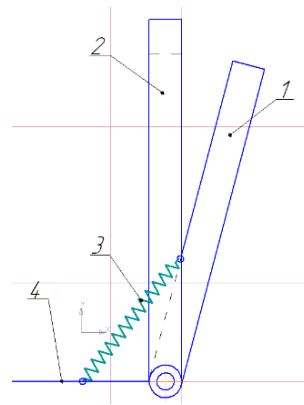


Рис. 3. Схема двери, закрываемой пружиной: дверь 1, рама двери 2, пружина 3 и стена 4

рости двери $\omega \rightarrow 0$); M_{60} – наибольший момент силы открывания двери (при $0 < \varphi \leq 60^\circ$, $\omega \rightarrow 0$); T_{60} – время закрытия двери из положения $\varphi = 60^\circ$ при начальной угло-

вой скорости двери $\omega_0 = 0$; ω_c – угловая скорость двери в момент соударения с рамой.

$$[M_0] \geq Cx_0k_0, [M_{60}] \geq C(x_0 + x_1)k_1, \quad (3)$$

где $[M_0]$, $[M_{60}]$ – допустимые величины моментов M_0 и M_{60} ; k_0 , k_1 – отношения перемещения зубчатой рейки к углу поворота двери при $\varphi = 0$ и $\varphi = 60^\circ$; x_1 – переме-

Ограничения силы открытия двери [1] с учетом (1) принимают вид

шение зубчатой рейки, соответствующее $\varphi = 60^\circ$.

Формул (3) определяют допустимые значения параметров C , x_0 и x_1

$$C \leq [M_0] / x_0k_0, x_1 \leq [M_{60}] / Ck_1 - x_0. \quad (4)$$

Коэффициент демпфирования d_1 определим из условий $T_{60} \rightarrow \min$ и $\omega_c \leq [\omega_c]$. Здесь $[\omega_c]$ – допустимая величина ω_c .

Результаты моделирования

Проведем моделирование открытия и закрытия двери при значениях параметров, соответствующих классу доводчика EN3 [1]. Масса двери – 60 кг, ширина полотна двери – 950 мм, массы рычагов можно не учитывать, длины рычагов – 0,23 м и 0,36 м. Радиус зубчатого колеса (в зацеплении с рейкой) – 10 мм.

С использованием УМ-модели определим, что $k_0 = 0,017$ м, $k_1 = 0,012$ м. Тогда,

согласно (4), при $[M_0] = 18...26$ Нм, $[M_{60}] \leq 47$ Нм и $x_0 = 20$ мм $C \leq 52,9...76,5$ кН/м и $x_1 \leq 54...31$ мм. Если $x_0 = 10$ мм, то $C \leq 105,9...152,9$ кН/м и $x_1 \leq 27...16$ мм.

На рис. 4 показаны графики изменения угловой скорости двери при закрытии из положений $\varphi = 60^\circ$ и 90° ($x_0 = 10$ мм, $C = 100$ кН/м, $d_1 = \{1; 50\}$ кНс/м, $d_0 = 2$ Нм, $d_2 = 10$ Нс/м).

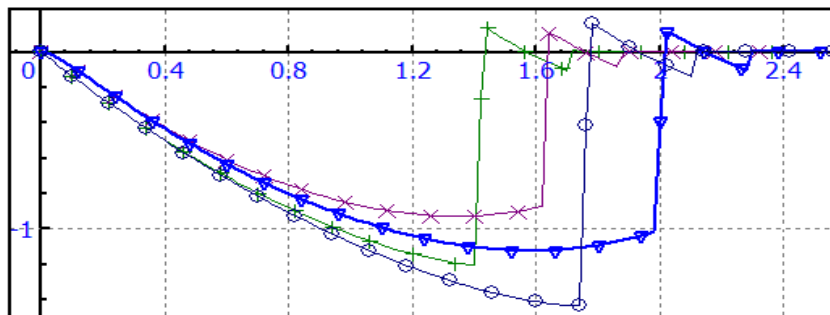


Рис. 4. Графики изменения угловой скорости при закрытии двери из положений $\varphi = 60^\circ$ и 90° : (—|—| — $\varphi = 60^\circ$, $d_1 = 1$ кНс/м; \times — \times — \times — $\varphi = 60^\circ$, $d_1 = 50$ кНс/м; \circ — \circ — \circ — $\varphi = 90^\circ$, $d_1 = 1$ кНс/м; ∇ — ∇ — ∇ — $\varphi = 90^\circ$, $d_1 = 50$ кНс/м)

По оси абсцисс отложено время (с), по оси ординат – угловая скорость (рад/с).

Момент силы открывания двери принимает значения 18,5, 34,4 и 37,2 Нм при $\varphi = 0, 60^\circ$ и 90° соответственно.

При закрытии двери из положения $\varphi = 90^\circ$ усилие в шарнире, соединяющем рычаги, достигает 119...108 Н, сила S , приложенная к зубчатой рейке, достигает 2,79...2,53 кН при $d_1 = 10...100$ кНс/м.

На рис. 5 показаны графики изменения времени закрытия двери T_{60} и T_{90} (с) и угловой скорости двери в момент соударения с рамой ω_c (рад/с) из положений $\varphi = 60^\circ$ и 90° от коэффициента демпфирования поршня d_1 ($x_0 = 10$ мм, $C = 100$ кН/м, $d_1 = 0...100$ кНс/м, $d_0 = 2$ Нм, $d_2 = 10$ Нс/м). Начальная угловая скорость двери $\omega_0 = 0$.

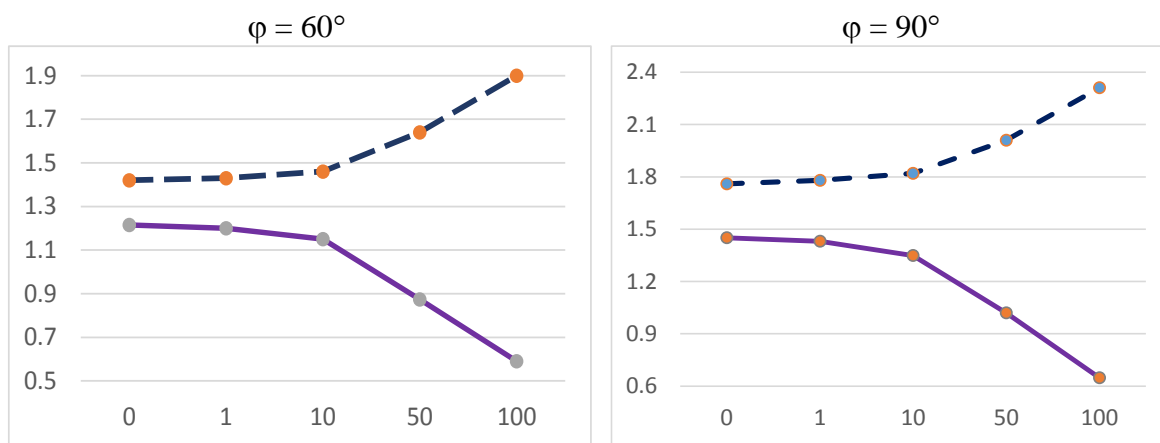


Рис. 5. Графики изменения времени закрытия двери (пунктирная линия, с) и угловой скорости двери в момент соударения с рамой (сплошная линия, рад/с) от коэффициента демпфирования поршня d_1 (кНс/м)

По оси абсцисс отложены значения коэффициента d_1 (кНс/м), по оси ординат – время закрытия двери (с) и ω_c (рад/с).

В табл. приведены результаты моделирования закрытия двери с пружиной (рис. 3) из положений $\varphi = 60^\circ$ и 90° .

Таблица

Результаты моделирования закрытия двери с пружиной

φ , град.	C_{np} , Н/м	x_{0np} , м	M_0 , Нм	M_{60} , Нм	M_{90} , Нм	T_{60} , с	ω_c , рад/с
60	142	0,4	18,5	28,8	31,2	2,33	0,908
90						6,6	0,932
60	230	0,1	18,5	26,0	26,7	2,22	0,933
90						5,77	0,971

Здесь C_{np} – жесткость пружины, x_{0np} – предварительное сжатие пружины. Коэффициент демпфирования пружины $d_{1np} = 5$ Нс/м, $d_0 = 2$ Нм, $d_2 = 10$ Нс/м, $\omega_0 = 0$.

Результаты моделирования показывают, что при одинаковых значениях момента открытия M_0 дверь с доводчиком имеет большие значения моментов открытия M_{60} и M_{90} , чем дверь с пружиной, а скорость соударения с рамой двери с доводчиком меньше, чем двери с пружиной при $d_1 > 65$ кНс/м.

Скорость соударения с рамой двери с доводчиком и двери с пружиной возраста-

ет при увеличении угла раскрытия двери. Силы сопротивления воздуха и трения в петлевых шарнирах двери не могут создать момент сопротивления, необходимый для плавного закрытия двери без сильного удара о раму.

Критерии качества $T_{60} \rightarrow \min$ и $\omega_c \rightarrow \min$ являются противоречивыми. Улучшение одного критерия ухудшает другой. Выбор оптимальных параметров механизма закрытия двери возможен, если один из критериев (T_{60} или ω_c) заменить ограничением.

Заключение

В среде ПК «Универсальный механизм» разработаны компьютерные динамические модели двери с доводчиком и двери с пружиной, позволяющие определять характеристики движения двери с учетом инерционных и механических характеристик механизмов доводчика и пружины.

Получены зависимости силовых характеристик механизма доводчика от моментов силы открывания двери в двух положениях.

Использование в качестве критериев моментов силы открывания двери, времени закрытия двери, угловой скорости две-

ри в момент соударения с рамой позволяет определять оптимальные параметры механизма закрытия, если один из критериев (T_{60} или ω_c) заменить ограничением.

С использованием компьютерных моделей проведено сравнение движения дверей с доводчиком и с пружиной. Показано, что при одинаковых значениях момента M_0 дверь с доводчиком имеет боль-

шие значения моментов открытия M_{60} и M_{90} , чем дверь с пружиной, а скорость соударения с рамой двери с доводчиком меньше, чем двери с пружиной при $d_1 > 65$ кНс/м.

Разработанные формулы и компьютерные модели рекомендуется использовать при конструировании устройств, ограничивающих движение дверей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- DIN EN 1154 Berichtigung** 1-2006. Building hardware - Controlled door closing devices - Requirements and test methods (includes amendment 1:2002); Corrigenda to DIN EN 1154:2003-04; German version EN 1154:1996/AC:2006. URL:<http://www.gostinfo.ru/catalog/Details/?id=4012327> - accessed May 22, 2021.
- Chen, C.** A method of assessing the energy cost saving from using an effective door closer/ C. Chen, X. Zhang, E. Groll, A. McKibben, N. Long, M. Dexter, Q. Chen // *Energy and Buildings*. 2016. - vol. 118. - Pp. 329–338. Ref. 28. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.03.006.
- Americans with Disabilities Act (ADA)**, Standards for Accessible Design, 2010. Standards (2010). URL:https://www.ada.gov/2010ADASTandards_index.htm - accessed May 22, 2021.
- Bhattacharya, A.** The effect of boundary conditions on transient airflow patterns: A numerical investigation of door operation/A. Bhattacharya, E. Mousavi // *ASHRAE Transactions*. – 2020. - vol. 126. - Pp. 239-246. 2020 ASHRAE Winter Conference; Orlando; United States; February 2020; Code 164041. Ref. 9. ISSN 00012505, ISBN 978-194719249-2.
- Mousavi, E. S.** Airflow patterns due to door motion and pressurization in hospital isolation rooms /E. S. Mousavi, K. R. Grosskopf // *Science and Technology for the Built Environment*. – 2016. - vol. 22 (4). - Pp. 379-384. - Ref. 27. - doi: 10.1080/23744731.2016.1155959.
- Pereira, F. D.** Automotive door closing efforts study/ F. D. Pereira, G. F. M. De Souza// *SAE Technical Papers*. – 2010. - vol. 2010. - Iss. October, 2010. - Code 127625. - Ref. 3. - doi: 10.4271/2010-36-0294.
- Kavthekar, N.** Numerical Analysis of Door Closing Velocity for a Passenger Car / N. Kavthekar, A. Badadhe // *International Journal on Cybernetics & Informatics*. – 2015. - vol. 4. - Pp. 01-16. - Ref. 5. - doi: 10.5121/ijci.2015.4201.
- Реутов, А. А.** Основы автоматизации проектирования машин / А. А. Реутов. – Брянск: БГТУ, 2013. – С. 57-59. - ISBN 978-5-89838-686-3.
- Мосстроитель: каталог товаров.** URL: <https://www.mosstroitel.ru/images/dovodchiki/home/home-ustroystvo-dovodchikov.jpg> - Дата обращения: 22.05.2021.
- Программа ввода данных. Руководство пользователя.** - Текст: электронный. - URL:http://www.universalmecanism.com/download/80/rus/03_um_data_input_program.pdf . - Дата обращения: 22.05.2021.
- DIN EN 1154 Berichtigung** 1-2006. Building hardware - Controlled door closing devices - Requirements and test methods (includes amendment 1:2002); Corrigenda to DIN EN 1154:2003-04; German version EN 1154:1996/AC:2006. URL:<http://www.gostinfo.ru/catalog/Details/?id=4012327> - accessed May 22, 2021.
- Chen, C.** A method of assessing the energy cost saving from using an effective door closer/ C. Chen, X. Zhang, E. Groll, A. McKibben, N. Long, M. Dexter, Q. Chen // *Energy and Buildings*. 2016. - vol. 118. - Pp. 329–338. Ref. 28. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.03.006.
- Americans with disabilities act (ada), standards for accessible design**, 2010. standards (2010). URL:https://www.ada.gov/2010adastandards_index.htm - Accessed May 22, 2021.
- Bhattacharya, A.** The effect of boundary conditions on transient airflow patterns: a numerical investigation of door operation/ A. Bhattacharya, E. Mousavi // *Ashrae transactions*. – 2020. - vol. 126. - Pp. 239-246. 2020. Ashrae winter conference; Orlando; United States; February 2020; code 164041. ref. 9. ISSN 00012505, ISBN 978-194719249-2.
- Mousavi, E. S.** Airflow patterns due to door motion and pressurization in hospital isolation rooms /E. S. Mousavi, K. R. Grosskopf // *Science and Technology for the Built Environment*. – 2016. - vol. 22 (4). - Pp. 379-384. - Ref. 27. - doi: 10.1080/23744731.2016.1155959.
- Pereira, F. D.** Automotive door closing efforts study/ F. D. Pereira, G. F. M. De Souza// *SAE Technical Papers*. – 2010. - vol. 2010. - Iss. October, 2010. - Code 127625. - Ref. 3. - doi: 10.4271/2010-36-0294.
- Kavthekar, N.** Numerical Analysis of Door Closing Velocity for a Passenger Car / N. Kavthekar, A. Badadhe // *International Journal on Cybernetics &*

- Informatics. – 2015. - vol. 4. - Pp. 01-16. - Ref. 5. - doi: 10.5121/ijci.2015.4201.
8. **Reutov, A.A.** Fundamentals of Machine Design Automation / A.A. Reutov. – Bryansk: BGTU, 2013. – pp.57-59. – ISBN 978-5-89838-686-3.
9. **Mosstroitel: product catalogue.** URL: <http://www.mosstroitel.ru/images/dovodchiki/home/home-ustrystvo-dovodchikov.jpg> – Accessed: 22.05.2021.
10. **Data entry program. User manual.** URL: http://www.universalmechanism.com/download/80/rus/03_um_data_input_program.pdf. – Accessed: 22.05.2021.

Ссылка для цитирования:

Реутов А.А. Моделирование движения двери с механизмом закрывания / А.А. Реутов // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2021. – № 11. – С. 17 - 23 . DOI: 10.30987/1999-8775-2021-11-4-10.

*Статья поступила в редакцию 25.05.21.
Рецензент: д.т.н., профессор Пермского
национального исследовательского
политехнического университета
Макаров В.Ф.,
член редсовета журнала «Вестник БГТУ».
Статья принята к публикации 27.10.21.*

Сведения об авторах:

Реутов Александр Алексеевич, д.т.н., профессор кафедры «Подъемно-транспортные машины и обо-

рудование» Брянского государственного технического университета, e-mail: bgtu2012@yandex.ru.

Reutov Aleksandr Alekseevich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Lifting and Transporting Machinery and Equipment at Bryansk

State Technical University, e-mail: bgtu2012@yandex.ru.