

УДК 679.743.1:519.63

Е.О. Паутова, А.В. КазаковПермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия**ИССЛЕДОВАНИЕ СТАЦИОНАРНОГО РЕЖИМА ТЕЧЕНИЯ
ПОЛИМЕРА ЧЕРЕЗ ФИЛЬЕРУ В КАБЕЛЬНОЙ ГОЛОВКЕ**

Наложение полимерной изоляции – сложный технологический процесс, к которому предъявляются повышенные критерии качества, зависящие от множества технологических параметров. Определение этих параметров экспериментальным путём требует существенных материальных и ресурсных затрат, а также длительного промежутка времени, что не всегда оказывается экономически выгодным и целесообразным на действующем производстве. В таком случае действенной альтернативой может стать применение новейших средств компьютерного инженерного моделирования [1–3]. При корректной реализации и грамотном обосновании такой подход позволит не только значительно сократить вышеупомянутые затраты, но и провести исследования и измерения, принципиально невозможные в реальных условиях.

Целью данного исследования являются моделирование и анализ режима течения расплава полимера при наличии полупроницаемой преграды (фильеры) в кабельной головке. Такие фильеры зачастую применяются в экструзионном оборудовании для нормализации потоков расплава материала после его непосредственного выхода из шнекового агрегата. Безусловно, наличие подобной преграды скажется не только на перераспределении потоков, но и повлияет на переходное сопротивление адаптера, увеличив перепад давления. Этот факт, несомненно, требует отдельного учета в сложных пространственных математических моделях, описывающих процесс переработки полимерных материалов. Поэтому, чтобы оценить степень вносимого фильерой эффекта, было задумано данное исследование.

В ходе работы было рассмотрено несколько моделей с различной геометрией. Были получены и проанализированы поля температур и давлений в зависимости от количества отверстий в фильере при сохранении общей суммарной площади сечений и от изменения диаметра отверстий при сохранении их количества.

Ключевые слова: полупроницаемая преграда, фильера, полимер, математическая модель, температурное поле, кабельная головка.

E.O. Pautova, A.V. Kazakov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**RESEARCH STATIONARY REGIME OF THE POLYMER FLOW
THROUGH A DIE**

Imposition of polymeric insulation – a complex process, which are increased quality criteria, depending on a variety of process parameters. Determination of these parameters experimentally requires significant financial and resource costs, as well as a long period of time, it is not always cost-effective and appropriate to the current production. In this case, a viable alternative may be the use of the latest

tools of computer engineering simulation [1–3]. The proper implementation and proper justification of such an approach will not only significantly reduce the cost of the above, but also to carry out studies and measurements, fundamentally impossible in the real world.

The aim of this study is to simulate and analyze the mode of the polymer melt in the presence of a semi-permeable barrier (die) in the cable head. Such spinnerets are often used in the extrusion equipment for the normalization of the melt material flows after exiting the direct screw assembly. Of course, the existence of such barriers affect not only the redistribution of the flows, but also affect the transition adapter resistance, increasing the pressure drop. This fact, of course, requires a separate account in the complex three-dimensional mathematical models describing the process of the processing of polymeric materials. Therefore, to assess the degree of insertion die effect, this study was designed.

The work was discussed several models with different geometries. We were obtained and analyzed temperature and pressure fields depending on the number of holes in the die while maintaining the total combined cross-sectional areas of the holes and the diameter changes while maintaining their quantity.

Keywords: semi-permeable barrier, die, polymer, mathematical model, temperature field, cable die.

В исследуемом процессе течения расплава полимера применяется трехмерная модель. В качестве системы координат выбрана декартова. Граничными условиями будут служить параметры на границе контакта полимер–фильера. Геометрия исходной модели представлена на рис. 1.

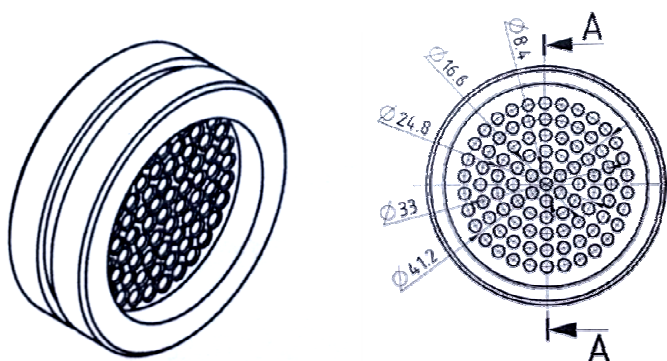


Рис. 1. Исследуемая геометрия фильеры

С целью упрощения модели вводим следующие допущения [4]:

- 1) процесс стационарный;
- 2) среда несжимаемая, без упругих свойств [5];
- 3) теплофизические характеристики постоянны;
- 4) пренебрегаем гравитационными и инерционными силами;
- 5) на границах канала реализуются условия прилипания.

Математическая модель процесса тепломассопереноса формулируется на основе законов сохранения массы, количества движения и энергии, реологических уравнений состояния [6]. С учётом допущений вышеперечисленные уравнения в декартовой системе координат выглядят следующим образом [7–9]:

– уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0; \quad (1)$$

где V_x, V_y, V_z – x, y и z компоненты вектора скорости.

– уравнения движения:

$$\rho \left(V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_x}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right); \quad (2)$$

$$\rho \left(V_x \frac{\partial V_y}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_y}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \left(\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right); \quad (3)$$

$$\rho \left(V_x \frac{\partial V_z}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_z}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \left(\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right); \quad (4)$$

где $\tau_{i,j}$ ($i, j = x, y, z$) – компоненты тензора напряжений; ρ – плотность, p – давление;

– уравнение энергии:

$$\rho c_p \left(V_x \frac{\partial T}{\partial x} + V_y \frac{\partial T}{\partial y} + V_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \lambda \Delta T + q_v; \quad (5)$$

– реологические уравнения состояния:

$$\tau_{xx} = 2\mu \frac{\partial V_x}{\partial x}; \quad \tau_{yy} = 2\mu \frac{\partial V_y}{\partial y}; \quad \tau_{zz} = 2\mu \frac{\partial V_z}{\partial z}; \quad (6)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial x} \right); \quad (7)$$

$$\tau_{zx} = \tau_{xz} = \mu \left(\frac{\partial V_z}{\partial x} + \frac{\partial V_x}{\partial z} \right); \quad (8)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu \left(\frac{\partial V_y}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial y} \right); \quad (9)$$

где μ – эффективная вязкость, рассчитываемая по формуле [10]:

$$\mu = \mu_0 e^{-\beta(T-T_0)} \left(\frac{I_2}{2} \right)^{\frac{n-1}{2}}; \quad (10)$$

где μ_0 – коэффициент консистенции или начальная вязкость, β – температурный коэффициент вязкости, I_2 – второй инвариант тензора скорости деформаций, $n \in [0;1]$ – показатель аномалии вязкости.

Для решения полученной системы уравнений (1–10) её необходимо дополнить следующими граничными условиями (рис. 2):

- 1) на неподвижных стенках компоненты скорости равны нулю $V_x = V_y = V_z = 0$;
- 2) на входе в канал задаются расход и температура расплава 433 К;
- 3) на выходе задаются граничные условия второго рода по скорости и температуре;
- 4) на границе симметрии задаются граничные условия второго рода по температуре.

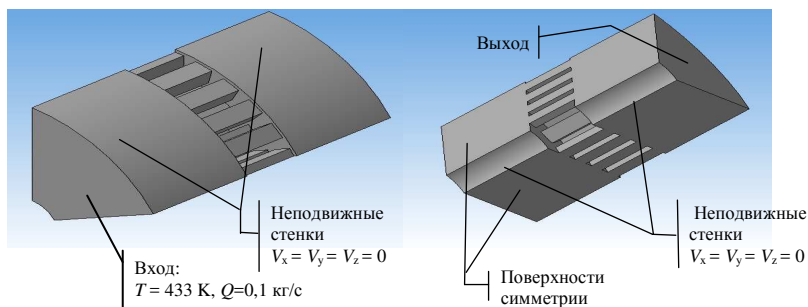


Рис. 2. Граничные условия

Для получения зависимостей параметров течения расплава полимера (давление, скорость, температура) от геометрии фильеры было рассмотрено 5 моделей (рис. 3).

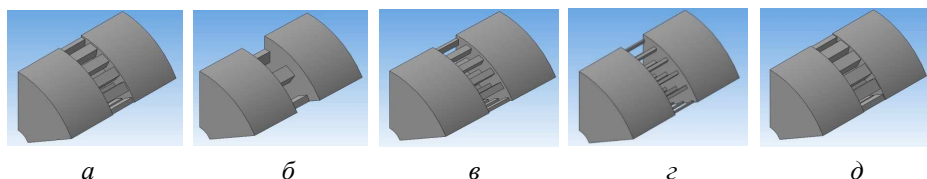


Рис. 3. Рассматриваемые виды геометрии: а – Образец; б – Model2; в – Model3; г – Model4; д – Model5

С целью упрощения разбиения рассматриваемой модели на сетку конечных элементов цилиндрические отверстия были заменены на прямоугольные с сохранением площади поперечного сечения. Также для ускорения процесса расчёта ввиду симметричности геометрии было принято решение обсчитывать одну шестую модели.

Образец – количество отверстий: $n = 14$, диаметр одного отверстия $d = 3$ мм, суммарная площадь сечений $S = 37,2$ мм²; *Model2* – $n = 3$, $d = 4$ мм, $S = 37,2$ мм²; *Model3* – $n = 14$, $d = 2$ мм, $S = 43,9$ мм²; *Model4* – $n = 14$, $d = 1$ мм, $S = 10,5$ мм²; *Model5* – $n = 14$, $d = 3,5$ мм, $S = 134,7$ мм².

Для разбиения моделей на конечные элементы использовался программный продукт ICEM CFD из пакета ANSYS. Разбивались модели на восьмиузловые элементы. Количество элементов в каждой модели ввиду значительной разницы геометрии было неодинаковым, в среднем составило 433 тыс. элементов. В качестве материала был выбран полиэтилен, свойства которого приведены ниже.

Свойства используемого материала

Плотность, кг/м ³	779
Вязкость, Па·с	10825
Теплоёмкость, Дж/кг·К	2500
Теплопроводность, Вт/м·К	0,182
Коэффициент аномалии	0,44
Температурный коэффициент вязкости, 1/К	0,012

В результате численного решения моделей были получены поля температур, скорости и давления, по которым можно проанализировать зависимость параметров расплава от особенностей геометрии.

По представленным выше полям скоростей, полученных на сечении вдоль модели (рис. 4), можно наблюдать увеличение скорости в узких участках отверстий фильеры.

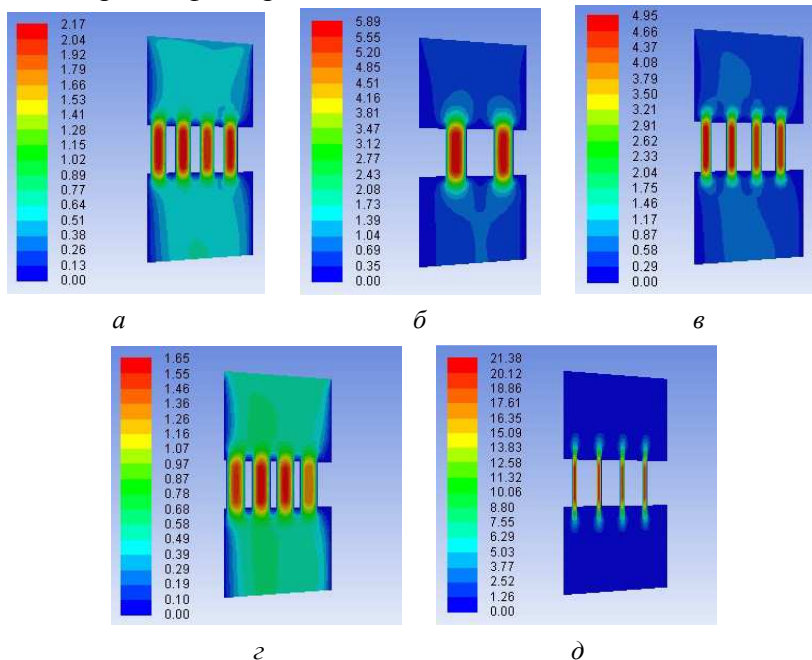


Рис. 4. Распределение скорости, м/с: а – Образец; б – Model2; в – Model3; г – Model4; д – Model5

Это, в свою очередь, вызывает повышение трения в указанных участках, вследствие чего значительно возрастает температура. По мере продвижения материала по каналу фильеры происходит его разогрев посредством подводимого тепла, а также за счёт тепла, выделяемого в результате трения. Наибольшая температура наблюдается в зонах, расположенных после слияния отдельных канальцев сетки. Перегревы вызываются диссипативными источниками, возникающими в полимере при контакте потоков с различными скоростями.

Полученные температурные зависимости (рис. 5) позволяют заметить, что на выходе из кабельной головки появляется сложная картина температурного поля, обусловленная диссипативными перегревами при переходе через сужения (патрубки). При уменьшении диаметра патрубка с сохранением их количества уменьшается суммарная площадь поперечного сечения, что, в свою очередь, приводит к росту скорости. От скорости зависит диссипация, следовательно, диссипативные источники начнут увеличиваться, так как трение неподвижных слоёв о подвижные будет больше. Отсюда можно сделать вывод, что чем меньше будет диаметр отверстия, тем больше возрастёт температура (рис. 6). Например, Model4 имеет отверстия диаметром 1 мм, Model2 – 4 мм, при этом максимальная температура на выходе у Model4 на 235 К больше.

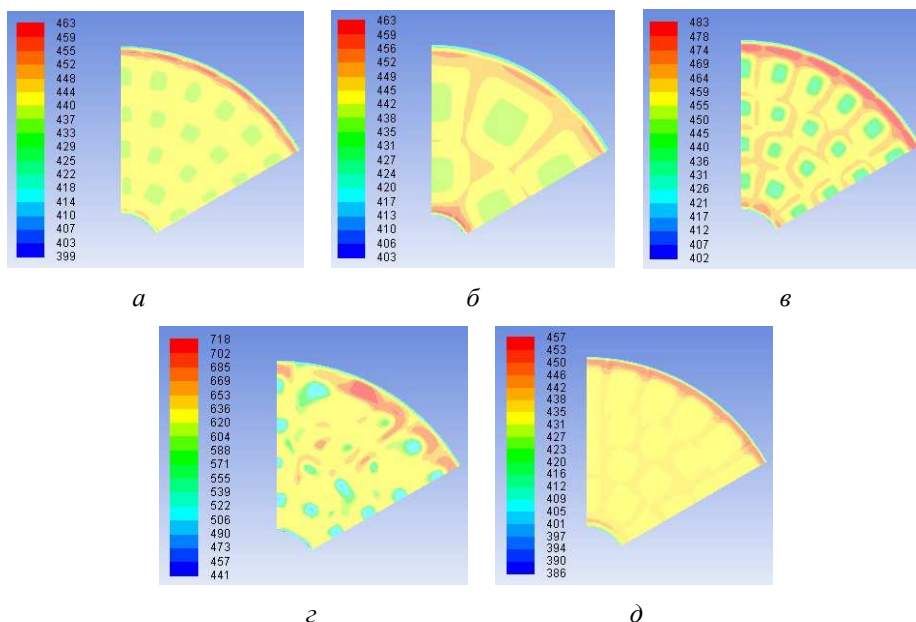


Рис. 5. Распределение температуры, К: а – Obrazec; б – Model2; в – Model3; г – Model4; д – Model5

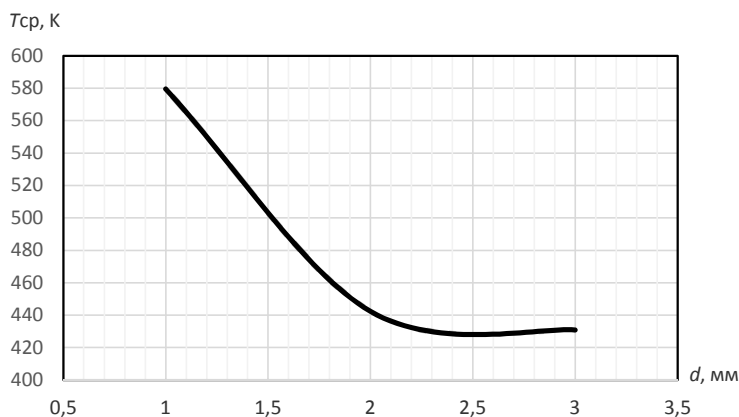


Рис. 6. Зависимость средней температуры на выходе от диаметра отверстия

При уменьшении диаметра отдельного патрубка для соблюдения режима заданного расхода вязкого материала необходимо увеличение перепада давления. Эту особенность можно наблюдать на графике зависимости перепада давления от количества патрубков при сохранении равенства суммарного сечения (рис. 7).

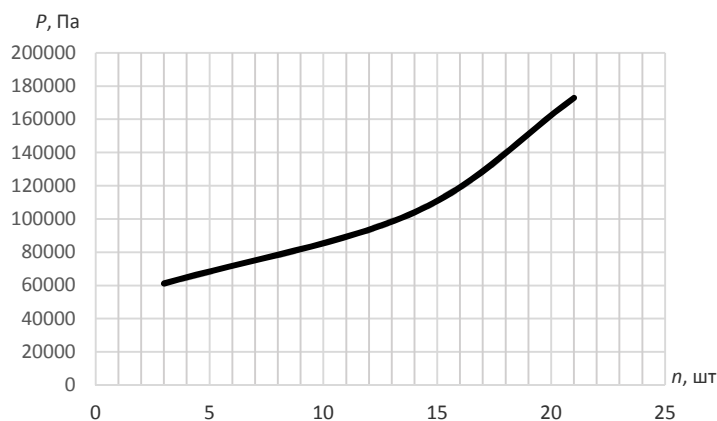


Рис. 7. Зависимость перепада давления на выходе от количества патрубков

Выводы. В ходе работы было смоделировано и проанализировано течение расплава полимера при наличии полупроницаемой преграды в кабельной головке. Были созданы и исследованы пять различных геометрий, получены поля температур, скорости и давления, построены графики зависимости этих параметров от различного вида геометрии.

Проделанная работа позволит при решении более сложных задач, например с использованием всей кабельной головки, не учитывать сетку, заменив её некими дополнительными граничными условиями в виде перепада давления и эпюр скоростей, тем самым упростив будущие расчёты.

Библиографический список

1. Бачурина М.В., Казаков А.В., Труфанова Н.М. Численное исследование закономерностей течения аномально вязких жидкостей // Вычислительная механика сплошных сред. – 2015. – Т. 8. – № 3. – С. 298–309. DOI: 10.7242/1999-6691/2015.8.3.25

2. Субботин Е.В., Черняев В.В. Исследование влияния геометрии шнека на процесс плавления // Вестник Перм. гос. техн. ун-та. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2009. – № 9. – С. 25–32.

3. Субботин Е.В., Щербинин А.Г., Труфанова Н.М. Численное исследование процессов течения полимеров в условиях фазового перехода в винтовых каналах экструдера при производстве пластмассовой изоляции // Известия Томск. политехн. ун-та. – 2012. – Т. 320. – № 4. – С. 171–177.

4. Казаков А.В., Петренко А.А. Математическое моделирование процесса плавления полимера // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 10–2. – С. 264–267.

5. Khan A.A., Han C.D. On the interface deformation in the stratified two-phase flow of viscoelastic fluids // Trans. Soc. Rheol. – 1976. – Vol. 20. – № 4. – P. 595–621.

6. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1973. – 848 с.

7. Бортников В.Г. Основы технологии переработки пластических масс. – Л.: Химия, 1983. – 304 с.

8. Тадмор З., Гогос К. Теоретические переработки полимеров. – М.: Химия, 1984. – 632 с.

9. Красновский Н.В., Воскресенский А.М. Сборник полимеров и задач по технологии переработки полимеров. – Минск: Высшая школа, 1975. – 318 с.

10. Янков В.И., Труфанова Н.М., Щербинин А.Г. Изотермическое течение аномально-вязких жидкостей в винтовых уплотнениях с продольной циркуляцией // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2006. – № 6. – С. 3–5.

References

1. Bachurina M.V., Kazakov A.V., Trufanova N.M. Chislennoe issledovanie zakonomernostei techeniia anomal'no viazkikh zhidkостей [Numerical study of quasi-viscous liquid regularity stream]. *Vychislitel'naia mekhanika sploshnykh sred*, 2015, vol. 8, no. 3, pp. 298-309. DOI: 10.7242/1999-6691/2015.8.3.25
2. Subbotin E.V., Cherniaev V.V. Issledovanie vliianiia geometrii shneka na protsess plavleniia [Influence of screw geometry on melting process research]. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2009, no. 9, pp. 25-32.
3. Subbotin E.V., Shcherbinin A.G., Trufanova N.M. Chislennoe issledovanie protsessov techeniia polimerov v usloviiakh fazovogo perekhoda v vintovykh kanalakh ekstrudera pri proizvodstve plastmassovoi izoliatsii [Numerical study of polymer stream processes under phase transition in screw canals while plastic insulation production]. *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2012, vol. 320, no. 4, pp. 171-177.
4. Kazakov A.V., Petrenko A.A. Matematicheskoe modelirovanie protsessa plavleniia polimera [Mathematic simulation of the polymeric melting process]. *Fundamental'nye issledovaniia*, 2015, no. 10–2, pp. 264-267.
5. Khan A.A., Han C.D. On the interface deformation in the stratified two-phase flow of viscoelastic fluids. *Trans. Soc. Rheol*, 1976, vol. 20, no. 4, pp. 595-621.
6. Loitsianskii L.G. Mekhanika zhidkosti i gaza [Fluid mechanics]. Moscow: Nauka, 1973. 848 p.
7. Bortnikov V.G. Osnovy tekhnologii pererabotki plasticheskikh mass [The basic of the plastic processing technology]. Leningrad: Khimiia, 1983. 304 p.
8. Tadmor Z., Gogos K. Teoreticheskie pererabotki polimerov [Theoretical polymer processing]. Moscow: Khimiia, 1984. 632 p.
9. Krasnovskii N.V., Voskresenskii A.M. Sbornik polimerov i zadach po tekhnologii pererabotki polimerov [Polymer collection and tasks for polymer processing technology]. Minsk: Vysshiaia shkola, 1975. 318 p.
10. Iankov V.I., Trufanova N.M., Shcherbinin A.G. Izotermicheskoe techenie anomal'no-viazkikh zhidkостей v vintovykh uplotnenniakh s

prodol'noi tsirkuliatsiei [Isothermal flow of quasi-viscous liquids in spiral thickening with direct-axis circulation]. *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie*, 2006, no. 6, pp. 3-5.

Сведения об авторах

Паутова Елена Олеговна (Пермь, Россия) – студентка Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: mcqueen.helena@gmail.com).

Казаков Алексей Владимирович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры конструирования и технологии в электротехнике Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: ktei@pstu.ru).

About the authors

Pautova Elena Olegovna (Perm, Russian Federation) is a Student Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: mcqueen.helena@gmail.com).

Kazakov Alexey Vladimirovich (Perm, Russian Federation) is a Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor of the chair Design and Technology in electrical engineering Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: ktei@pstu.ru).

Получено 12.10.2016