

УДК 679.743.1:519.63

Д.В. Бельков, А.В. КазаковПермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ РАСПЛАВА ПОЛИМЕРА
В ВИНТОВОМ КАНАЛЕ**

Производство кабелей с полимерной экструдированной изоляцией на сегодняшний день занимает весьма важное место в любой энергосистеме, так как такие кабели позволяют передавать существенные мощности при минимальных затратах на изготовление самого кабеля и его эксплуатацию. Основным способом переработки полимерного сырья-гранулята в готовое сплошное покрытие является экструзия, использующая шнековый агрегат (экструдер) в том числе и для создания необходимого давления расплава полимера. Поскольку физико-реологические свойства различных видов пластмасс отличаются друг от друга существенным образом, а, например, вязкость имеет явно нелинейный характер зависимости как от температуры, так и от скорости сдвига, то подбор параметров (так называемой рабочей точки) экструдера для выпуска продукции требуемого качества с достаточной производительностью является весьма нетривиальной задачей. Натурное экспериментирование, даже с применением методик, предлагаемых производителями экструзионного оборудования, зачастую приводит к существенным потерям, как сырья, так и рабочего времени (линия в этот момент выведена из эксплуатации). Поэтому возможной альтернативой, позволяющей сократить материально-сырьевые и временные издержки, возникающие при замене сырья или при переходе на выпуск продукции иного типоразмера, является моделирование процесса [1–3]. Разумеется, для законченного описания всего технологического цикла формования изоляции нужно составить достаточно сложную и емкую модель. В данном исследовании рассмотрена часть общей картины, описывающая поведение расплава в винтовом канале шнекового агрегата, при этом течение полимера осуществляется исключительно за счет гравитации и увлечения материала вращающимся шнеком-винтом. Такой подход позволил значительно приблизить математическое описание процессов экструзии к параметрам реального процесса.

Ключевые слова: винтовой канал, температурное поле, поля скоростей, математическая модель.

D.V. Belkov, A.V. Kazakov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

MODELLING THE POLYMER MELT IN THE SCREW CHANNEL

Production of cables with polymeric extruded insulation today occupies a very important place in any power system, as such cables can transmit substantial power at the lowest cost to manufacture the cable and its operation. The main method of Polymer processing-ready granulate in continuous coating is extruded using a screw machine (extruder), including to create the necessary pressure of the polymer melt. Since the physical and rheological properties of different types of plastics differ significantly, and, for example, the viscosity is clearly non-linear dependence on the temperature and shear rate, the se-

lection of parameters (so-called working point) of the extruder for the production of the required quality with sufficient capacity is a nontrivial task. Full-scale experimentation, even with the use of techniques offered by manufacturers of extrusion equipment, often results in significant losses of both raw materials and working time (the line at the moment out of operation). Therefore, a possible alternative, allowing to reduce raw material and time costs arising from the change of raw materials or in the transition to a different output sizes, is modeling process. Of course, for a complete description of the entire technological cycle of forming the isolation necessary to make quite complex and capacious model. In this study, we considered part of the overall picture, describing the behavior of the melt in the screw channel of the screw unit, while for the polymer is carried out solely by gravity and drag material rotating screw-propeller. Such an approach is much closer mathematical description of the processes of extrusion parameters of the real process.

Keywords: screw channel, temperature field, velocity field, mathematical model.

Введение. Основным способом наложения полимерной изоляции на кабели и провода является экструзия. При этом расплав под необходимым давлением создается при помощи шнекового агрегата, представляющего собой длинный винтовой канал, внутренняя поверхность которого вращается относительно внешней. Это позволяет как разогреть полимер до температуры плавления, так и создать требуемое для процесса формования готового изделия давление. Процессы, происходящие при этом в канале, весьма сложны для наблюдения, поэтому одним из возможных способов контроля и определения рациональных параметров всего процесса экструзии является математическое моделирование [4–6]. Радикальным отличием данной работы от более ранних является течение расплава полимера не в режиме заданного расхода, а за счет увлечения подвижной стенкой шнека.

Математическая модель процесса тепломассопереноса основывается на рассмотрении законов сохранения массы, количества движения и энергии, реологических уравнений состояний.

С целью упрощения математической модели примем некоторые допущения [7]:

- процесс стационарный;
- плотность, теплоемкость и теплопроводность постоянны;
- поток утечек через гребень нарезки шнека не учитывается;
- на всем протяжении канала полимер находится в жидкой фазе;
- движение материала осуществляется за счет естественного увлечения материала вращающимся шнеком и за счет гравитации;
- прилипание расплава к стенкам и непроницаемость через твердую стенку.

С учетом сделанных допущений в цилиндрической системе координат математическая модель выглядит следующим образом [8–10]:

– уравнение несжимаемости:

$$\frac{\partial v_z}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv_r) = 0;$$

– уравнение движения:

$$\begin{aligned} & \rho \left(v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} - \frac{v_\theta^2}{r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) = \\ & = -\frac{\partial \rho}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\tau_{rr}r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\tau_{r\theta}r) - \frac{\tau_{\theta\theta}}{r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \rho \left(v_r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{v_r v_\theta}{r} + v_z \frac{\partial v_\theta}{\partial z} \right) = \\ & = -\frac{1}{r} \frac{\partial \rho}{\partial \theta} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (\tau_{r\theta}r^2) + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z}; \end{aligned}$$

– уравнение энергии:

$$\begin{aligned} & c\rho \left(v_r \frac{\partial (T)}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \\ & = -\left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r q_r + \frac{1}{r} \frac{\partial q_\theta}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial q_z}{\partial z} + q_v; \end{aligned}$$

– реологические уравнения состояния:

$$\begin{aligned} \tau_{rr} &= 2\mu_3 \frac{\partial v_r}{\partial r}; \quad \tau_{\theta\theta} = 2\mu_3 \left(\frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial v_r}{r} \right); \quad \tau_{zz} = 2\mu_3 \frac{\partial v_z}{\partial z}; \quad \tau_{rz} = \mu_3 \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right); \\ \tau_{r\theta} &= \mu_3 \left(r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v_\theta}{r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} \right); \quad \tau_{z\theta} = \mu_3 \left(\frac{\partial v_\theta}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} \right), \end{aligned}$$

где μ_3 – эффективная вязкость, зависящая от скорости сдвига,

$$\mu_3 = \mu_0 \left(\frac{I_2}{2} \right)^{\frac{n-1}{2}} \cdot e^{-\beta(T-T_0)},$$

где μ_0 – начальная вязкость; I_2 – второй инвариант тензора скоростей деформации; n – показатель аномалии вязкости; v_z, v_θ, v_r – компоненты

вектора скорости; $\tau_{i,j}$ ($i, j = r, \theta, z$) – компоненты тензора напряжений, T – температура, β – температурный коэффициент, T_0 – начальная температура.

Для решения полученной системы ее необходимо дополнить следующими граничными условиями:

- граничные условия на входе: температура полимера на входе (T_6) и нулевое относительное давление;
- граничные условия поверхности шнека – окружная скорость, соответствующая числу оборотов шнека ($N_{ш}$), и температура поверхности шнека ($T_{п}$);
- граничные условия корпуса шнека – температура корпуса ($T_{к}$);
- граничные условия на выходе – температура полимера на выходе ($T_в$) и нулевое относительное давление.

Граничные условия проиллюстрированы на рис. 1.

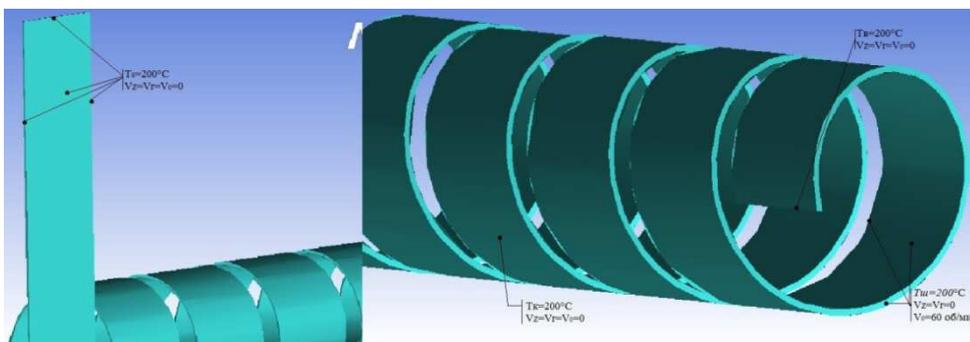


Рис. 1. Граничные условия на поверхности шнека и бункера

В качестве полимера был выбран полиэтилен (ПЭ), теплофизические и реологические свойства которого приведены ниже.

Реологические и теплофизические свойства полиэтилена

Плотность, кг/м ³	779
Вязкость, Па·с	10825
Теплоемкость, Дж/кг·К	2600
Теплопроводность, Вт/м·К	0,182
Коэффициент аномалии	0,44
Температурный коэффициент вязкости, 1/К	0,012

Численные исследования проведены для экструдера с классической геометрией с параметрами, указанными ниже.

Базовая геометрия шнека

Внутренний диаметр цилиндра, мм	160,0
Наружный диаметр шнека, мм	159,4
Шаг винтовой нарезки, мм	160,0
Ширина канала вдоль оси шнека, мм	144,7
Ширина гребня винтовой нарезки S , мм	15,3
Длина винтового канала, витки	5
Глубина канала H , мм	4

Технологический режим следующий:

Число оборотов шнека, об/мин	60
Температура полимера	200°C

Для моделирования и решения поставленной задачи были использованы пакеты ANSYS (ICEMCFD и ANSYS Fluent). В результате расчета были получены поля скоростей, температур, давлений, вязкости расплава.

На рис. 2 представлено распределение температуры в винтовом канале, на котором видно, что по мере продвижения материала по каналу происходит его разогрев за счет подводимого и выделяемого в результате трения тепла. Наибольшая температура – у подвижной стенки ближе к выходу из канала. Следовательно, сила трения в этом месте будет максимальна.

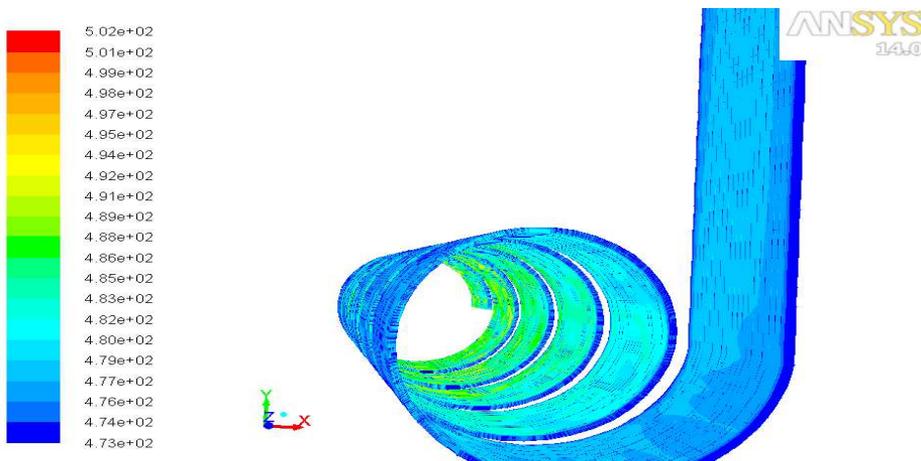


Рис. 2. Распределение температуры (К) в винтовом канале

При конструировании экструдеров, переработке новых материалов или выборе оптимальных режимов переработки полимеров необходимо знать распределение температуры, чтобы не допустить непроплавления полимера или перегрева его на выходе.

На рис. 3 представлено поле скоростей в канале шнека, на котором видно, что максимальную скорость материал имеет на поверхностях подвижных стенок канала. Выбор оптимальной скорости вращения шнека важен на производстве, поскольку этот параметр напрямую влияет на производительность экструдера. Слишком медленная скорость может привести к локальным перегревам на выходе из винтового канала.

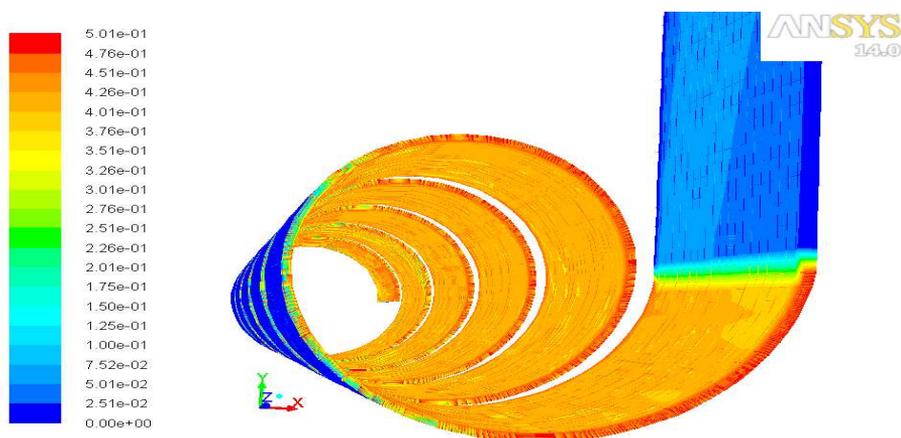


Рис. 3. Поле скоростей (м/с) в канале

На рис. 4 представлены траектории движения материала.

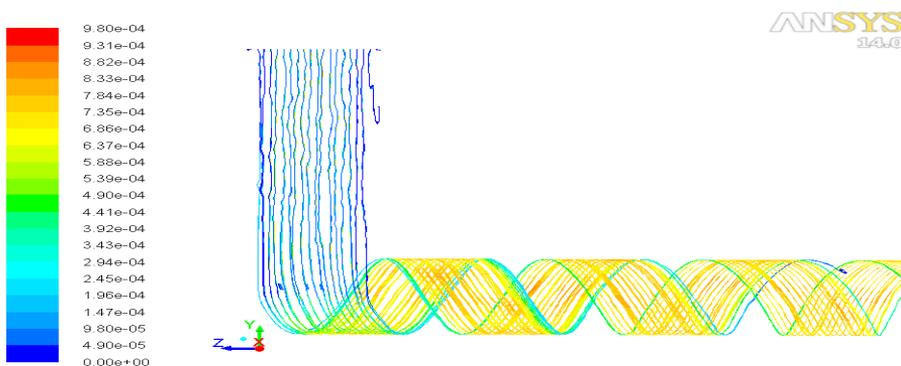


Рис. 4. Траектории движения материала

Полимер под действием силы гравитации поступает из бункера, после чего за счет вращательного движения шнека продвигается вдоль канала. Хорошо виден равномерный ламинарный режим течения.

На рис. 5 представлено семейство графиков по поперечному сечению канала в зоне выхода материала. Левая часть движется с окружной скоростью, соответствующей скорости вращения шнека, правая – неподвижный корпус. Хорошо заметен характер течения за счет подвижной стенки, соответствующий описанию Куэтта.

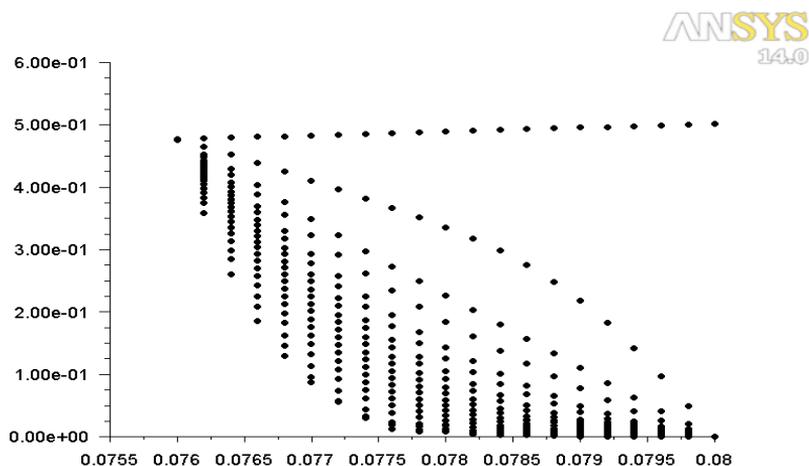


Рис. 5. Распределение скорости (м/с) на выходе по продольной координате Z (м)

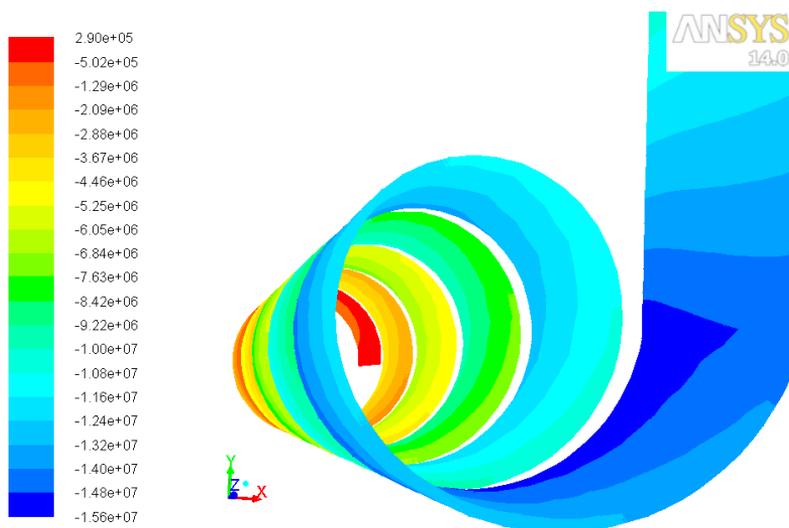


Рис. 6. Распределение давления (Па) в винтовом канале

На рис. 6 представлено распределение давления, максимальное давление наблюдается на выходе материала из канала. В зоне перехода бункера с неподвижными стенками в винтовой канал создается разрежение.

Заключение. Рассмотренные в статье математическая модель течения аномально-вязкого расплава полимера в винтовом канале и ее численная реализация естественным образом развивают идеи авторов и приближают исследуемый процесс переработки к реальности: движение полимера происходит за счет естественного увлечения частиц расплава вращающимся винтом и естественной гравитацией. Такая постановка задачи позволила уйти от традиционного режима течения, когда жестко задавался расход, что, в свою очередь, не всегда позволяло адекватно описать весь процесс. Результаты исследования позволяют сократить затраты на натурные исследования на этапе корректировки рабочих параметров кабельной линии.

Библиографический список

1. Труфанова Н.М. Переработка полимеров: учеб. пособие. – М., 2009. – 159 с.
2. Тагер А.А. Физико-химия полимеров. – М: Научный мир, 2007. – 573 с.
3. Бачурина М.В., Щербинин А.Г. Моделирование процессов течения и теплообмена расплава полимера в зоне дозирования одношнекового экструдера // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2012. – № 6. – С. 143–149.
4. Ершов С.В., Черняев В.В. Исследование влияния геометрических параметров шнека на процесс плавления // Научно-технический вестник Поволжья. – Казань, 2013. – № 4. – 274 с.
5. Субботин Е.В., Щербинин А.Г., Труфанова Н.М. Численное исследование процессов течения полимеров в условиях фазового перехода в винтовом канале экструдера при производстве пластмассовой изоляции // Известия Томск. политехн. ун-та. – 2012. – Т. 320. – № 4. – С. 171–177.
6. Субботин Е.В., Черняев В.В. Исследование влияния геометрии шнека на процесс плавления // Вестник Пермского государственного технического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2009. – № 9(3). – С. 25–32.

7. Торнер Р.М. Теоретические основы переработки полимеров. – М.: Химия, 1977. – 460 с.

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

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

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

References

1. Trufanova N.M. Pererabotka polimerov [Polymer processing]. Moscow, 2009. 159 p.

2. Tager A.A. Fiziko-khimiia polimerov [Physical chemistry of polymers]. Moscow: Nauchnyi mir, 2007. 573 p.

3. Bachurina M.V., Shcherbinin A.G. Modelirovanie protsessov techeniia i teploobmena rasplava polimera v zone dozirovaniia odnoshnekovogo ekstrudera [Modelling of processes of flow and heat transfer of the polymer melt in the area of dispensing a single screw extruder]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2012, no. 6, pp. 143-149.

4. Ershov S.V., Cherniaev V.V. Issledovanie vliianiia geometricheskikh parametrov shneka na protsess plavleniia [Investigation of the influence of geometric parameters of the screw in the melting process]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ia*. Kazan', 2013, no. 4. 274 p.

5. Subbotin E.V., Shcherbinin A.G., Trufanova N.M. Chisslennoe issledovanie protsessov techeniia polimerov v usloviakh fazovogo perekhoda v vintovykh kanala ekstrudera pri proizvodstve plastmassovoi izoliatsii [Chisslennoe study of the processes of the polymer flow in a phase transition in the extruder screw channel in the production of plastic insulation]. *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2012, vol. 320, no. 4, pp. 171-177.

6. Subbotin E.V., Cherniaev V.V. Issledovanie vliianiia geometrii shneka na protsess plavleniia [Investigation of the effect of the screw geometry in the melting process]. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo*

tekhnicheskogo universiteta. Elektrotekhnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia», 2009, no. 9(3), pp. 25-32.

7. Torner R.M. Teoreticheskie osnovy pererabotki polimerov [Theoretical foundations of polymer processing]. Moscow: Khimiia, 1977. 460 p.

8. Krasnovskii N.V., Voskresenskii A.M. Sbornik polimerov i zadach po tekhnologii pererabotki polimerov [Collection of polymers and objectives of technology of polymer processing]. Minsk: Vysshaya shkola, 1975. 318 p.

9. Bortnikov V.G. Osnovy tekhnologii pererabotki plasticheskikh mass [The basic technology of processing plastics]. Leningrad: Khimiia, 1983. 304 p.

10. Tadmor Z., Gogos K. Teoreticheskie pererabotki polimerov [Theoretical polymer processing]. Moscow: Khimiia, 1984. 632 p.

Сведения об авторах

Бельков Дмитрий Васильевич (Пермь, Россия) – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: izil5@ya.ru).

Казakov 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: fishing.perm@mail.ru).

About the authors

Bel'kov Dmitry Vasilyevich (Perm, Russian Federation) is a student Perm National Research Polytechnic University (614990, 29, Komsomolsky pr., Perm, e-mail: izil5@ya.ru).

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: fishing.perm@mail.ru).

Получено 05.10.2015