

УДК 678.4

М.М. Ткачук, А.В. КазаковПермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия**МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ НАЛОЖЕНИЯ РЕЗИНОВОЙ
ИЗОЛЯЦИИ В КАБЕЛЬНОЙ ГОЛОВКЕ ДЭГ 60/120**

Рассмотрен процесс моделирования режимов наложения резиновой изоляции в кабельной головке ДЭГ 60/120. Объектом данного исследования является процесс течения резиновой смеси в кабельной головке. Предметом исследования является изменение температурного поля и скорости течения резиновой смеси при различных свойствах среды, расходах материала, температурных режимах кабельной головки.

Цель работы – исследование режимов наложения резиновой изоляции в кабельной головке ДЭГ 60/120 в универсальной программной системе конечно-элементного анализа ANSYS.

Для исследования был взят силовой кабель марки РРГнг(А), который предназначен для передачи и распределения электрической энергии в электрических сетях на номинальное переменное напряжение 1 кВ.

Работа проводилась в несколько этапов в различных программных средах:

1. Построение математической модели в ANSYS Polymat – в специализированном программном средстве, где в качестве рабочего тела выступают среды, имеющие сложную реологию. На данном этапе была построена математическая модель на основе экспериментальных данных.

2. Построение геометрической модели в ANSYS ICEM CFD, где последняя представляет наиболее полный на сегодняшний день набор инструментов построения геометрической модели «с нуля», и создание расчетной сетки. В данной программной среде была построена геометрия осесимметричной модели кабельной головки и части токопроводящей жилы. Геометрия разбита на сетку конечных элементов и определены зоны под граничные условия.

3. Исследование модели в ANSYS Fluent, где содержится множество физических моделей для расчетов на неструктурированных сетках и где были выбраны уравнения, заданы граничные условия и теплофизические свойства материалов. Данная задача решалась численно при помощи метода конечных элементов. В результате исследования были построены распределения скоростей и температур в кабельной головке для различных режимов течения резиновой смеси и различных свойств исследуемого материала.

Ключевые слова: моделирование, исследование, течение, резиновая смесь, кабельная головка.

M.M. Tkachuk, A.V. Kazakov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

SIMULATION FLOW MODES OF RUBBER INSULATOR IN EXTRUSION DIE DEG 60/120

In this article considered the process of simulation flow modes of rubber insulator in extrusion die DEG 60/120. The object of research is a flow process of rubber compound in extrusion die. The subject of research change of temperature allocation and flow velocity of rubber compound for various properties of the compound, volumetric flow rate, temperature of extrusion die.

The purpose of this work is research modes of rubber insulator in extrusion die DEG 60/120 in ANSYS – engineering simulation software of finite element analysis.

For this research selected power cable RRGng(A) that is intended for transmission and distribution of electrical energy in electrical networks with 1 kV rated voltage.

The work consisted of several stages in various simulation software:

1. Construction of a mathematical model in ANSYS Polymat.

ANSYS Polymat - a specialized software tool, where as a working medium are environments that have a complex rheology. At this stage mathematical model was constructed on the basis of experimental data.

2. Construction of a geometric model in ANSYS ICEM CFD.

ANSYS ICEM CFD presents the most comprehensive to date toolkit for building a geometric model and creating a grid. In this software environment, the geometry of the axisymmetric model of the extrusion die and part of the conductive core was constructed. Geometry is divided into a grid of finite elements and zones are defined under boundary conditions.

3. Study of the model in ANSYS Fluent.

ANSYS Fluent contains many physical models for calculations on unstructured grids. Where the equations were chosen, the boundary conditions and the thermophysical properties of the materials are given. This task was solved numerically using the finite element method.

As a result of the research, the velocity and temperature distributions in the extrusion die were constructed for various flow modes of the rubber compound and various properties of the material.

Keywords: simulation, research, flow, rubber compound, extrusion die.

Введение. Кабельная продукция – это общее наименование огромного разнообразия проводов – от бытовых электрических проводов до высоковольтных кабелей, включая специальные виды кабеля (например, телефонные или сетевые кабели для передачи данных), которые отличаются конструктивно в зависимости от конкретной сферы применения: каждый кабель имеет собственные номинальные параметры напряжения и тока, а также изоляцию в соответствии с предполагаемыми условиями эксплуатации. Ни одно современное техническое устройство, работа которого связана с использованием электрических и электронных схем, не может работать без кабелей и проводов, которые образуют системы электроснабжения, информатики и управления работой этого устройства.

Кабельная продукция должна отвечать жестким требованиям по качеству и надежности. Для того чтобы кабель отвечал всем требованиям, нужно учесть все физико-механические факторы при производстве, которые непосредственно влияют на расчетные ресурсные характеристики кабельной продукции. Экспериментальные изучения исследуемых процессов являются очень дорогими, сложными и занимают много времени, поэтому особенно актуальным является их численное моделирование.

Конструкция и характеристики кабеля следующие (рис. 1):

- 1) алюминиевая или медная токопроводящая жила;
- 2) изоляция из этиленпропиленовой резины;
- 3) оболочка из резины, не распространяющей горение в пучке.

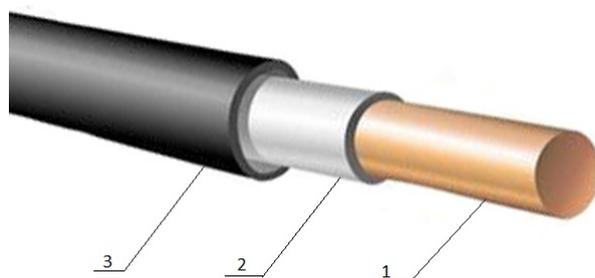


Рис. 1. Конструкция кабеля РРГнг(А)

Кабели силовые с этиленпропиленовой изоляцией предназначены для передачи и распределения электрической энергии в электрических сетях на номинальное переменное напряжение 1 кВ частотой 50 Гц. Они используются в помещениях, вне помещений, во влажной среде, в трубах или каналах, в каменных кладках, металлических конструкциях, открытой проводке, в пожаро- и взрывоопасных зонах при групповой прокладке [1, 2].

Построение математической модели в Polymat:

1. Выбор модели жидкости. Процесс течения этиленпропиленовой резины в экструзионной головке представляет собой модель неньютоновской псевдопластической жидкости. Процесс неизотермический [3, 4].

Выбрана модель Generalized Newtonian non-isothermal model. Закон в общем виде для вязкости имеет вид:

$$\eta(\gamma, T) = F(\gamma)H(T),$$

где γ – градиент скорости сдвига материала. Поэтому $F(\gamma)$ и $H(T)$ представляют зависимость вязкости от скорости сдвига и температуры соответственно [5].

2. Выбор модели зависимости вязкости от скорости сдвига.

Выбрана модель Power Law:

$$\eta = K \gamma^{n-1},$$

где K – коэффициент густоты потока; n – показатель аномалии вязкости материала; η – вязкость.

Степенной закон обычно используется для описания течения вязких полимерных материалов со скоростью сдвига более 2 или 3 декад [6].

3. Выбор модели зависимости вязкости от температуры

Выбрана модель Arrhenius law:

$$H(T) = \exp \left[\alpha \left(\frac{1}{T - T_0} - \frac{1}{T_\alpha - T_0} \right) \right],$$

где H – вязкость; α – отношение энергии активации к универсальной газовой постоянной; T – температура расплава; T_0 – сдвиг температуры относительно абсолютного нуля, $T_0 = 0 \text{ }^\circ\text{K}$; T_α – эталонная температура, для которой $H(T) = 1$, $T_\alpha = 363 \text{ }^\circ\text{K}$ [7].

4. Загрузка экспериментальных кривых (рис. 2).

Экспериментальные данные снимались при трех различных температурах, одна из которых равна T_α и две другие близки по значению к ней [8, 9].

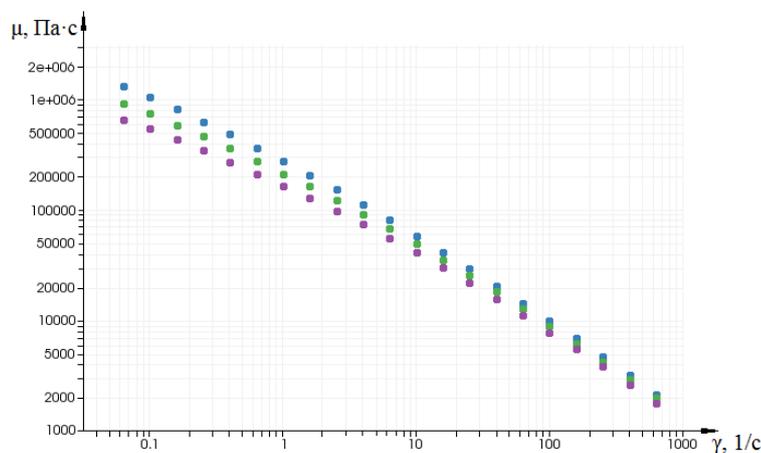


Рис. 2. Экспериментальные кривые

Для построенной модели течения, исходя из кривых зависимости вязкости от скорости сдвига, полученных в результате эксперимента, программой были автоматически рассчитаны следующие значения: $\alpha = 2533,491$; $n = 0,3294$; $\mu_0 = 155\ 562$.

Основные допущения и уравнения:

- процесс стационарный;
- плотность, теплоемкость и теплопроводность постоянны;
- прилипание расплава к стенкам и непроникновение через твердую стенку;
- движение в цилиндрической системе координат, игнорирование движения материала по угловой координате φ [10].

Основные уравнения:

1) уравнение несжимаемости:

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

2) уравнение движения:

$$\rho \left(v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\tau_{rr} r) + \frac{\partial \tau_{zr}}{\partial z};$$

3) уравнение энергии:

$$c\rho \left(v_r \frac{\partial T}{\partial r} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r q_r + \frac{\partial q_z}{\partial z} + q_v.$$

Данная система дифференциальных уравнений решается численно при помощи МКЭ в программной среде ANSYS Fluent [11, 12].

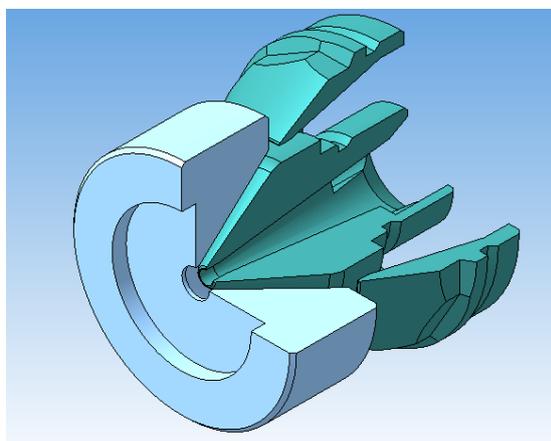


Рис. 3. Модель кабельной головки ДЭГ 60/120

Построение геометрии. Для анализа процессов, происходящих в ходе наложения резиновой изоляции, была разработана осесимметричная модель канала кабельной головки и части токопроводящей жилы (рис. 3) [13, 14].

В программной среде ANSYS ICEM CFD геометрическая модель разбита на сетку конечных элементов (рис. 4) и созданы зоны под граничные условия (рис. 5) [15, 16].

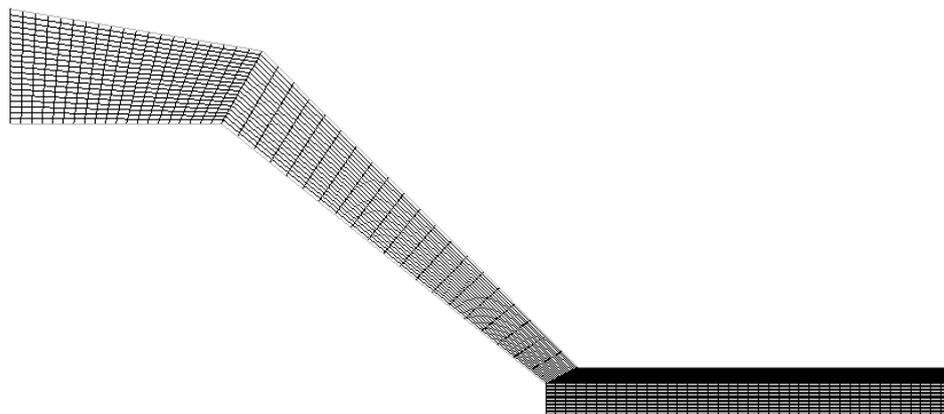


Рис. 4. Сетка конечных элементов

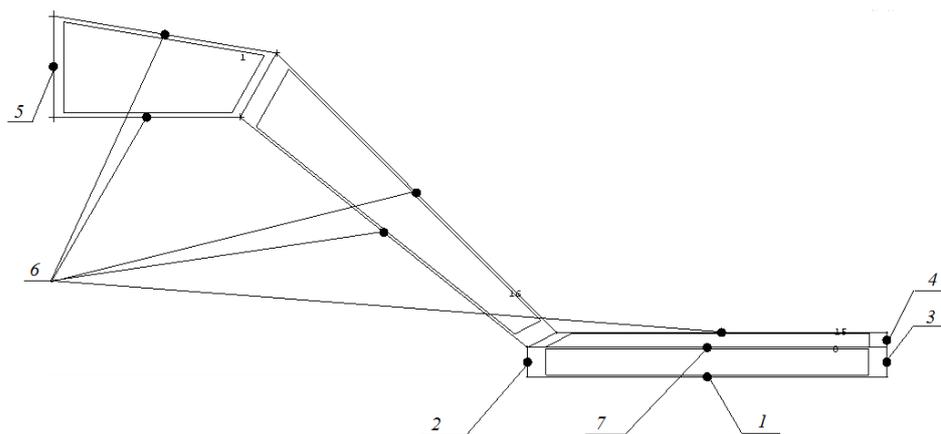


Рис. 5. Граничные условия: 1 – ось симметрии; 2, 3 – границы жилы, 4 – выход их канала, 5 – вход в канал, 6 – стенка, 7 – граница между жилой и каналом

Исследование модели в среде Fluent проводят в следующей последовательности: настройка среды Fluent, выбор уравнений, ввод теплофизических свойств материалов (таблица) [17, 18].

Теплофизические свойства материалов

Элемент	Материал	Плотность, ρ , кг/м ³	Коэффициент удельной теплоемкости, C , Дж/кг·С	Коэффициент теплопроводности, λ , Вт/м·С
Жила	Алюминий	2698	930	237
Изоляция	Резина	1475	1231	0,414

Определение граничных и начальных условий: на границах жилы справа и слева заданы граничные условия нулевого теплового потока. На поверхности кабельной головки заданы температура $T = 363^\circ\text{K}$ и нулевые компоненты скорости: $V_x = V_y = 0$. На входе в канал заданы температура $T = 403^\circ\text{K}$ и расход $Q = 0,02001$ кг/с. На выходе – граничное условие типа outflow. На границе жилы и кабельной головки заданы температура подогрева жилы $T = 403^\circ\text{K}$ и линейная скорость жилы $V_x = 0,6$ м/с. На нижней границе жилы задано граничное условие типа axis, так как она является осью симметрии (рис. 6, 7) [19, 20].

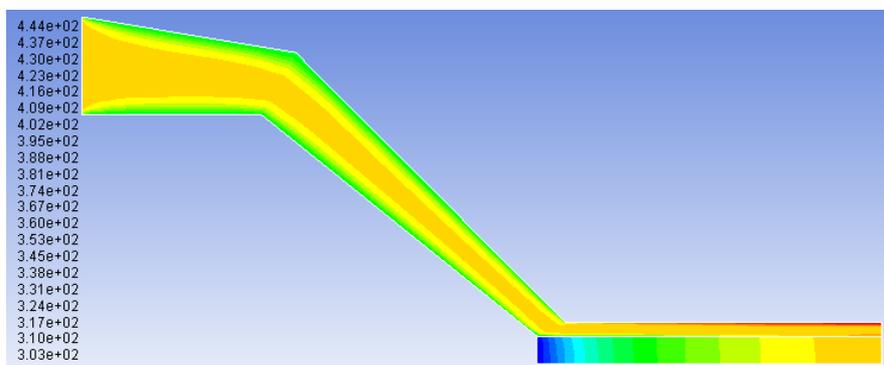


Рис. 6. Распределение теплового поля в программе ANSYS Fluent

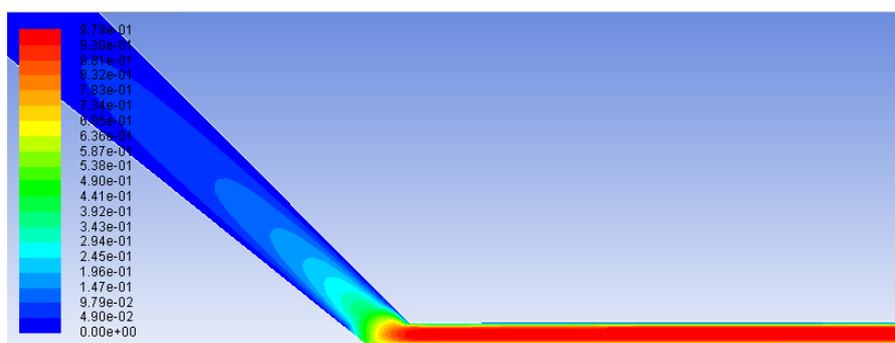


Рис. 7. Распределение скоростей в программе ANSYS Fluent

Влияние на распределение температурного поля и скорости течения резиновой смеси различных факторов проиллюстрировано и описано далее.

1. Расход резиновой смеси (рис. 8).

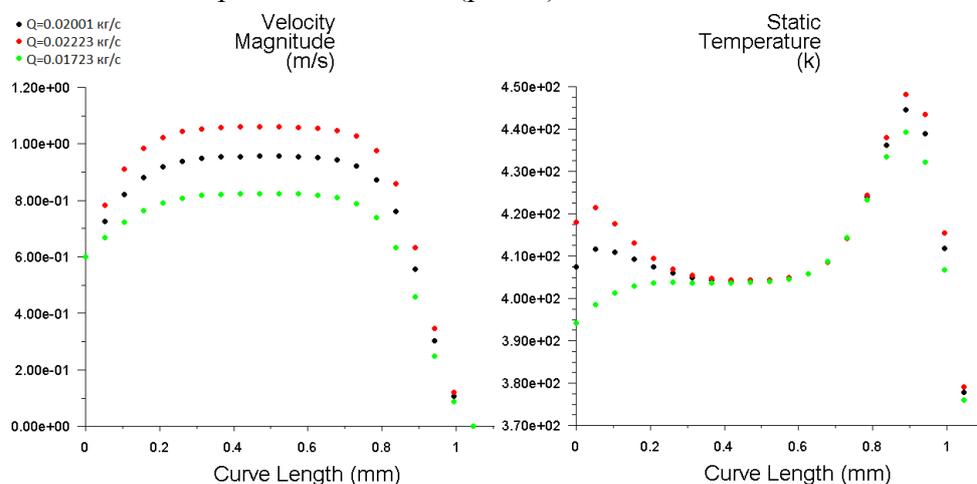


Рис. 8. Распределение скоростей и температур в сечении на выходе

При увеличении расхода возрастают скорости, следовательно, увеличивается диссипативное тепловыделение за счет сил вязкого трения около подвижной и неподвижной стенки, и температура возрастает.

2. Температура кабельной головки (рис. 9).

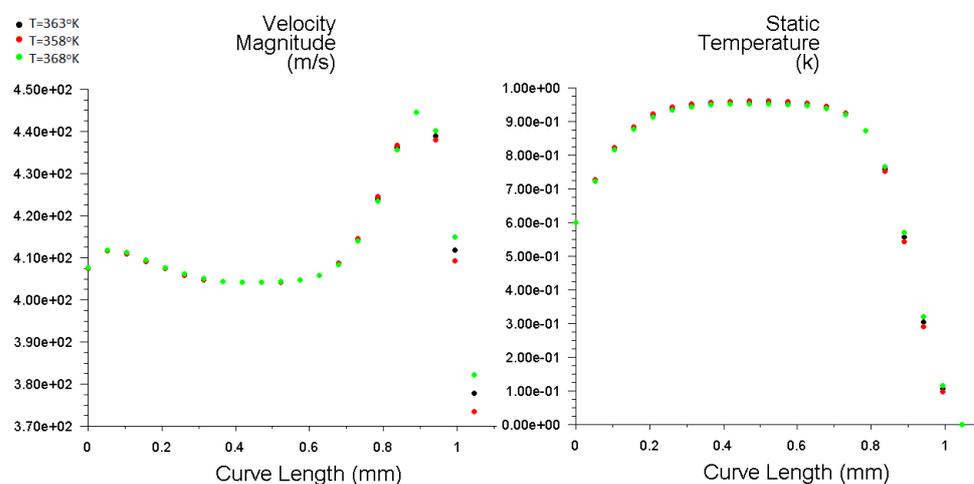


Рис. 9. Распределение скоростей и температур в сечении на выходе

Изменение температуры кабельной головки в допустимых пределах на среднюю температуру и скорости на выходе и в сечениях влияния не оказывает.

3. Плотность резины (рис. 10).

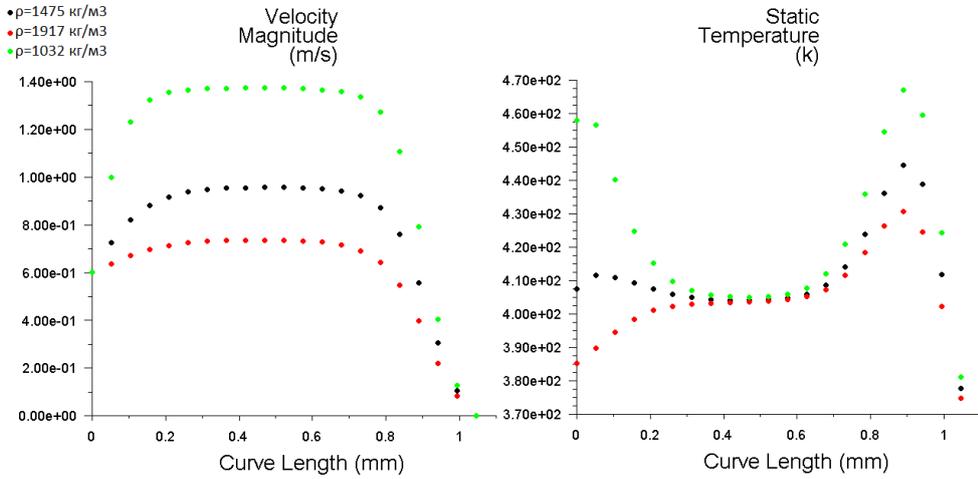


Рис. 10. Распределение скоростей и температур в сечении на выходе

Массовый расход задается через эпюру скорости и плотность материала. Чем больше плотность, тем меньший объем занимает материал. Следовательно, меньше площадь эпюры скорости, меньше диссипативное тепловыделение.

4. Теплоемкость резины (рис. 11).

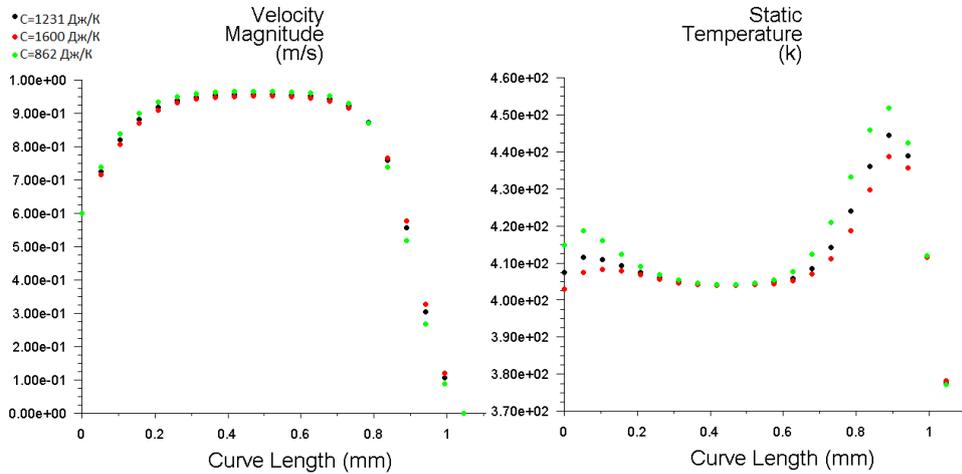


Рис. 11. Распределение скоростей и температур в сечении на выходе

При увеличении теплоемкости материалу сообщается меньшее количество энергии, следовательно, температура уменьшается. На среднюю температуру по центру канала изменение теплоемкости влияние практически не оказывает, так же как и на скорость.

5. Теплопроводность резины (рис. 12).

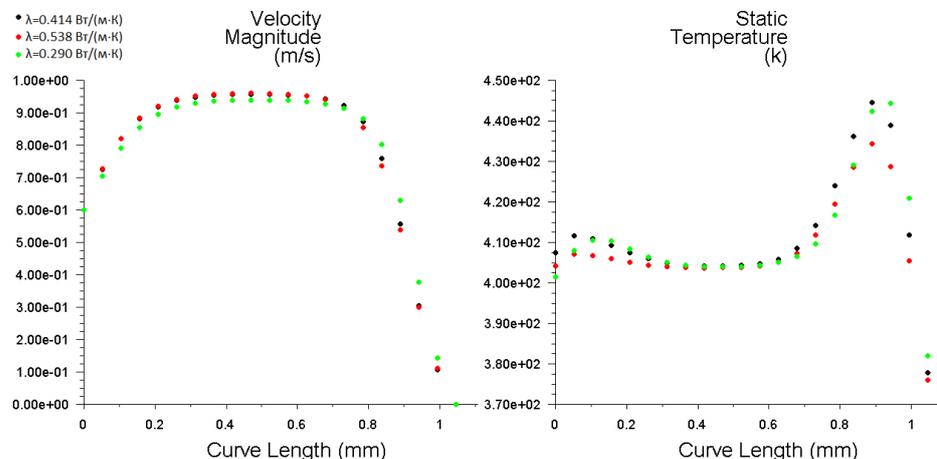


Рис. 12. Распределение скоростей и температур в сечении на выходе

При увеличении теплопроводности температура уменьшается за счет более быстрой отдачи тепла стенкам. На скорость изменение теплопроводности влияние практически не оказывает. Незначительное уменьшение эпюры скорости около стенок обусловлено уменьшением вязкости материала при увеличении температуры.

Выводы. В рамках данного исследования были рассчитаны режимы наложения резиновой изоляции в кабельной головке ДЭГ 60/120.

Экспериментально были получены физико-реологические свойства расплава резиновой смеси. Были построены температурные поля внутри кабельной головки, которые позволяют оценить возможные перегревы. Уровень перегрева не превысил допустимых значений. Была исследована стабильность распределения температур и скоростей в канале при изменении свойств исходного сырья. Изменения характеристик не превысили допустимых значений.

Библиографический список

1. ТУ 16.К180-035-2012. Кабели силовые и контрольные с изоляцией из этиленпропиленовой резины (ЭПР) // Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

2. Белоруссов Н.И. Сакаян А.Е. Яковлева А.И. Электрические кабели, провода и шнуры: справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1987.
3. Малкин А.Я., Исаев А.И. Реология: концепции, методы, приложения. – СПб.: Профессия, 2007.
4. Юн А.А. Исследование течений и прочностной анализ. – 3-е изд. испр. и доп. – М.: URSS: ЛЕНАНД, 2014. – 427 с.
5. Simhambhatla M. The Rheological Modeling of Simple Flows of Unfilled and Filled Polymers. – PhD Thesis University of Akron, 1994.
6. Barker J. Power Law. Retrieved 7-15-2015 from. – 1999. – URL: <https://www.ncnr.nist.gov/resources/sansmodels/PowerLaw.html>
7. Laidler Keith. The Development of the Arrhenius Equation // J. Chem. Educ. – 1984. – № 61(6). – P. 494.
8. Шрамм Г. Основы практической реологии и реометрии. – М.: Колос, 2003.
9. Малкин А.Я., Исаев А.И. Реология: концепции, методы, приложения. – СПб.: Профессия, 2007.
10. Торнер Р.М. Теоретические основы переработки полимеров. – М.: Химия, 1997. – 460 с.
11. Тадмор З., Гогос К. Теоретические основы переработки полимеров. – М.: Химия, 1984.
12. Бельков Д.В., Казаков А.В. Моделирование течения расплава полимера в винтовом канале // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2015. – № 16.
13. Басов К.А. ANSYS в примерах и задачах / под общ. ред. Д.Г. Красковского. – М.: Компьютерпресс, 2002.
14. Техника переработки пластмасс / под ред. Н.И. Басова, В. Броя. – Лейпциг: Дейтчер Ферлаг Фюр Грундштоффиндустри; М.: Химия, 1985. – 528 с.
15. ANSYS Advantage Русская редакция № 21 «Многодисциплинарный анализ». – URL: <http://www.ansysadvantage.ru/archive/view/magazine/ansys-advantage-russia-21/> (дата обращения: 12.12.2017).
16. Любимов А.К., Шабарова Л.В. Методы построения расчетных сеток в пакете ANSYS ICEM CFD: электронное метод. пособие. – Н. Новгород: Изд-во Нижегород. гос. ун-та, 2011. – 25 с.
17. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов: справочник. – М.: ФИЗМАТГИЗ, 1959. – 356 с.

18. Батурич О.В., Батурич Н.В., Матвеев В.Н. Расчет течений жидкостей и газов с помощью универсального программного комплекса Fluent: учеб. пособие. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2009. – 151 с.

19. Пасконов В.М., Полежаев В.И., Чудов Л.А. Численное моделирование процессов тепломассопереноса. – М.: Наука, 1984. – 257 с.

20. Конюхов А.В. Основы анализа конструкций в ANSYS: учеб. пособие. – Казань: Изд-во Казан. гос. ун-та, 2001.

References

1. TU 16.K180-035-2012. Kabeli silovye i kontrol'nye s izoliatsiei iz etilenpropilenovoi reziny (EPR) [Power and control cables with ethylene propylene diene monomer rubber insulation]. *Dostup iz spravochno-pravovoi sistemy Konsul'tantPlus*.

2. Belorussov N.I. Sakaian A.E. Iakovleva A.I. Elektricheskie kabeli, provoda i shnury: spravochnik [Electrical cable, wires and cords: directory]. Moscow: Energoatomizdat, 1987.

3. Malkin A.Ia., Isaev A.I. Reologiya: kontseptsii, metody, prilozheniia [Rheology: concepts, methods, applications]. Saint Petersburg: Professiia, 2007.

4. Iun A.A. Issledovanie techenii i prochnostnoi analiz [Research of currents and strength analysis]. 3rd ed. Moscow: URSS: LENAND, 2014. 427 p.

5. Simhambhatla M. The Rheological Modeling of Simple Flows of Unfilled and Filled Polymers. Ph.D. Thesis University of Akron, 1994.

6. Barker J. Power Law. Retrieved 7-15-2015 from, 1999, available at: <https://www.ncnr.nist.gov/resources/sansmodels/PowerLaw.html>

7. Laidler Keith. The Development of the Arrhenius Equation. J. Chem. Educ, 1984, no. 61(6), p. 494.

8. Shramm G. Osnovy prakticheskoi reologii i reometrii [Basics of practical rheology and rheometry]. Moscow: Kolos, 2003.

9. Malkin A.Ia., Isaev A.I. Reologiya: kontseptsii, metody, prilozheniia [Rheology: concepts, methods, applications]. Saint Petersburg: Professiia, 2007.

10. Torner R.M. Teoreticheskie osnovy pererabotki polimerov [Theoretical basis of polymer processing]. Moscow: Khimiia, 1997. 460 p.

11. Tadmor Z., Gogos K. Teoreticheskie osnovy pererabotki polimerov [Theoretical basis of polymer processing]. Moscow: Khimiia, 1984.
12. Bel'kov D.V., Kazakov A.V. Modelirovanie techeniia rasplava polimera v vintovom kanale [Modeling of melt polymer flow in a screw conveyor]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2015, no. 16.
13. Basov K.A. ANSYS v primerakh i zadachakh [ANSYS in examples and tasks]. Ed. D.G. Kraskovskii. Moscow: Komp'iuterpress, 2002.
14. Tekhnika pererabotki plastmass [Technology of plastic processing]. Eds. N.I. Basova, V. Broia. Leiptsig: Deitcher Ferlag Fiur Grundstoftfindustri; Moscow: Khimiia, 1985. 528 p.
15. ANSYS Advantage Russkaia redaktsiia № 21 "Mnogodistsiplinarnyi analiz" [ANSYS Advantage Russian edition No. 21 "Multidisciplinary analysis"], available at: <http://www.ansysadvantage.ru/archive/view/magazine/ansys-advantage-russia-21/> (accessed 12 December 2017).
16. Liubimov A.K., Shabarova L.V. Metody postroeniia raschetnykh setok v pakete ANSYS ICEM CFD: elektronnoe metodicheskoe posobie [Methods for constructing computational grids in ANSYS ICEM CFD: Electronic methodical manual]. Nizhnii Novgorod: Nizhegorodskii gosudarstvennyi universitet, 2011. 25 p.
17. Chirkin V.S. Teplofizicheskie svoistva materialov: spravochnik [Thermophysical properties of materials: directory]. Moscow: FIZMATGIZ, 1959. 356 p.
18. Baturin O.V., Baturin N.V., Matveev V.N. Raschet techenii zhidkosti i gazov s pomoshch'iu universal'nogo programmnoho kompleksa Fluent: uchebnoe posobie [Calculation of fluids and gases flows using the universal software package Fluent]. Samara: Samarskii gosudarstvennyi aerokosmicheskii universitet, 2009. 151 p.
19. Paskonov V.M., Polezhaev V.I., Chudov L.A. Chislennoe modelirovanie protsessov teplomassopere nosa [Numerical simulation of heat and mass transfer processes]. Moscow: Nauka, 1984. 257 p.
20. Koniukhov A.V. Osnovy analiza konstruksii v ANSYS: uchebnoe posobie [Fundamentals of constructions analys in ANSYS]. Kazan': Kazanskii gosudarstvennyi universitet, 2001.

Сведения об авторах

Ткачук Мария Михайловна (Пермь, Россия) – студентка Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: login9128@yandex.ru).

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

About the authors

Tkachuk Maria Mihailovna (Perm, Russian Federation) is a Student Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: login9128@yandex.ru).

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

Получено 30.01.2018