

15. Kureychik V.V., Kureychik V.V. Bioinspirirovannyi algoritm razbieniia skhem pri proektirovanii SBIS [Bioinspired algorithm partitioning schemes in the design of VLSI circuits], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, No. 7 (144), pp. 23-29.
16. Kureychik V.V. Algoritmy razbieniia grafa na osnove geneticheskogo poiska [Graph partitioning based on genetic search], *Izvestiya TRTU* [Izvestiya TSURe], 1999, No. 3 (13), pp. 97-104.
17. Kureychik V.V., Sorokoletov P.V. Kompozitnye bionicheskie algoritmy v komponovke blokov [Composite bionic algorithms in the layout blocks], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2006, No. 8 (63), pp. 41-46.
18. Kureychik V.V., Sorokoletov P.V. Evolyutsionnye algoritmy razbieniia grafov i gipergrafov [Evolutionary algorithms partitions of graphs and hypergraphs], *Izvestiya TRTU* [Izvestiya TSURe], 2004, No. 3 (38), pp. 42-49.
19. Gladkov L.A., Kureichik V.V., Kravchenko Y.A. Evolutionary algorithm for extremal subsets comprehension in graphs // *World Applied Sciences Journal*. – 2013. – P. 1212-1217.
20. Kasprzyk, J., Kureichik, V.M., Malioukov, S.P., Kureichik, V.V., Malioukov, A.S. Experimental investigation of algorithms developed // *Studies in Computational Intelligence*, 212. – 2009. – P. 211-223+227-236.

Статью рекомендовала к опубликованию д.т.н., профессор Л.С. Лисицына.

**Курейчик Владимир Викторович** – Южный федеральный университет; e-mail: vkur@tsure.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371651; кафедра систем автоматизированного проектирования; зав. кафедрой; д.т.н.; профессор.

**Заруба Дарья Викторовна** – e-mail: daria.zaruba@gmail.ru; кафедра систем автоматизированного проектирования; аспирант.

**Запорожец Дмитрий Юрьевич** – e-mail: elpilasgsm@gmail.com; кафедра систем автоматизированного проектирования; ассистент.

**Kureichik Vladimir Victorovich** – Southern Federal University; e-mail: vkur@tsure.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371651; the department of computer aided design; head of department; dr. of eng. sc.; professor.

**Zaruba Daria Viktorovna** – e-mail: daria.zaruba@gmail.ru; the department of computer aided design; postgraduate student.

**Zaporoghetz Dmitri Yurievich** – e-mail: elpilasgsm@gmail.com; the department of computer aided design; teaching assistant.

УДК 621.867

**А.В. Смелов, С.А. Данильченко**

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ В ТОРЦЕВОМ УПЛОТНЕНИИ\***

*Целью работы являлось создание прикладных расчетных методов, описывающих тепловые явления в торцевом уплотнительном узле. Рабочая контактная часть данного триботехнического узла состоит из двухслойного покрытия: каркаса из стали 65Г, нанесенного методом электроискрового легирования и антифрикционного слоя на основе модифицированного наноразмерными частицами политетрафторэтилена. Выполнен анализ факторов, влияющих на работу герметизирующего узла. Определено существенное влияние на тепловые потоки физико-механических свойств материалов герметизирующего узла и режимов его работы – давления, скорость скольжения, воздействий окружающей среды. Сформулированы аналитические условия задачи, описывающие тепловые процессы. Принята*

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 012–08–00972–а, № 13–08–13147–офи\_м\_РЖД, № 14–08–90015–Бел\_а).

*осесимметричная модель распределения температуры с учетом конвективного теплообмена. Составлен ряд формул, описывающих условия теплообмена, теплопроводности и граничных показателей для элементов рассматриваемого триботехнического узла. Выполнено конечно–элементное моделирование, позволившее решить рассматриваемую задачу с учетом различных значений: геометрических и физических входных параметров, начальных и граничных условий для различных временных интервалов. В качестве инструментария конечно – элементного моделирования был использован пакет ANSYS. Была разработана программа на макроязыке APDL, с применением технологии моделирования «снизу–вверх». Общее количество узлов, созданных при построении равно 2115, элементов 660. Для получения объективного результата размер элементов для покрытия использовался с менее крупной сеткой, чем для контртела и материала основы. В ходе расчета с помощью компьютерного моделирования удалось определить температурные градиенты, время переходного режима и распределение теплового потока между деталями. Сделан вывод о происходящих под воздействием тепла термодинамических процессах на молекулярном уровне в полимере.*

*Торцевое уплотнение; тепловой режим; политетрафторэтилен.*

**A.V. Smelov, S.A. Danilchenko**

### **MODELLING THE DISTRIBUTION OF THERMAL FLUX IN A FACE SEAL**

*The paper is aimed at creating applied computational methods that describe the thermal phenomena in a mechanical seal assembly. Working contact part of a given tribological assembly consists of a dual-layer coating: a frame made of steel 65G caused by electroding as well as an anti-friction layer based on modified PTFE nanoparticles. We have completed the analysis of the factors affecting the operation of the sealing unit. We have determined a significant effect of physical and mechanical properties of materials and sealing assembly modes of operation (pressure, sliding speed, and environmental influences) on a heat flow. We have formulated analytical conditions of the problem describing the thermal processes. We have adopted an axisymmetric model of temperature distribution with the convective heat transfer. We have compiled a series of formulas that describe the conditions of heat transfer, thermal conductivity and boundary indicators for the elements of a tribological unit. We have performed finite–element modeling to solve the problem taking into account different values: geometrical and physical input parameters as well as initial and boundary conditions for different time intervals. As a toolkit of finite–element modeling we have used ANSYS software. Computer program was developed in APDL macro language using bottom–up simulation technology. The total number of nodes is 2115, the total number of elements is 660. To obtain objective results, we have used elements with a smaller mesh in comparison to the counterbody and the base material. During the calculations, we used computer simulation to determine temperature gradients, the time length of the transient mode and the distribution of heat flow between the parts. As a result, we have drawn a conclusion about the thermodynamic processes at the molecular level in the polymer under the influence of heat.*

*Face seal; thermal mode; polytetrafluoroethylene.*

**Введение.** Актуальной научно-технической задачей является поиск путей повышения ресурса транспортных конвейеров. Поломка конвейерных роликов чаще всего происходит из-за потери работоспособности подшипникового узла. Конвейерные ролики предназначены для поддержания ленты в транспортирующих системах различной модификации. Согласно данным мировой промышленной статистики, около 90 % роликов выходят из строя до окончания своего возможного ресурса.

Подшипники разрушаются на ранней стадии срока службы из-за абразивного износа, коррозии, недостаточной смазки, загрязнения или перегрева. Уплотнение корпуса подшипника, а конкретно тип уплотнения играет важную роль в надежности ролика. От продления срока службы уплотнительных устройств зависит работоспособность подшипников и соответственно безотказная работа конвейера.

**Цель работы** – разработка компьютерной модели тепловых режимов работы уплотнения подшипникового узла. Конструктивно узел представляет собой неподвижную ось, с установленным подшипником и сферическим подпятником, необхо-

димым для компенсации неточностей производства и сборки (рис. 1). Подпятник служит опорой для тарельчатой пружины, которая в свою очередь прижимает втулку с антифрикционным покрытием к вращающейся крышке подшипникового узла.

Особенность рассматриваемого уплотнения, отличающая его от других уплотнений подшипниковых узлов, заключается в том, что на металлическую рабочую поверхность уплотнительной втулки нанесено двухслойное покрытие – подложка из стали 65Г, выполненная методом электроискрового легирования [2–6], сверху покрытая модифицированным политетрафторэтиленом (ПТФЭ).

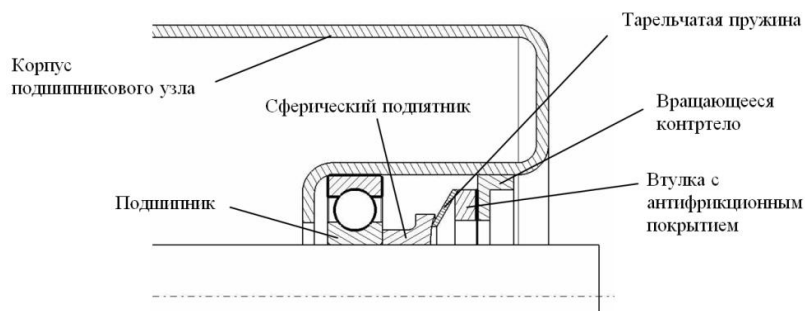


Рис. 1. Схема герметизации подшипникового узла

Использование многослойных покрытий, имеющих в своем составе слои из износостойких и антифрикционных материалов, перспективны благодаря возможности получения механических структур, обладающих высокими антифрикционными свойствами при сохранении на приемлемом уровне прочностных свойств и износостойкости [7–12]. Использование ПТФЭ в узлах трения широко распространено благодаря его уникальным физико-химическим свойствам, способности к формированию «третьего тела» в трибосопряжении «металл–полимер». Появление устойчивой пленки фрикционного переноса во многом определяет антифрикционные свойства и износостойкость материала. Пленка переноса образуется под действием сил фрикционного взаимодействия как результат самоорганизации системы при трении. Известно, что с целью повышения износостойкости целесообразно применение ПТФЭ модифицированного различными наноразмерными наполнителями, например, добавками на основе шпинелей (магния, хрома, цинка) [13–18].

**Постановка задачи.** Известно, что под действием возникших в контакте торцевого уплотнительного узла нормальных и касательных напряжений, влияния окружной скорости и трения на поверхности контакта происходит тепловыделение, которое является результатом преобразования механической энергии в тепловую.

Температура разогрева в зоне трения один из основных критериев, определяющих механизм разрушения. Если она меньше критической, характер повреждений полимеров усталостный, если больше – тепловой [1]. На разогрев полимерной детали оказывают влияние внешние факторы, такие как условия теплоотвода, скорость скольжения, величина нагрузки и частота ее приложения, так и теплофизические характеристики образца. Важное значение имеют и тепловые характеристики материалов пары трения – коэффициенты линейного теплового расширения, коэффициент теплопроводности и коэффициенты теплоотдачи.

Анализ температурных режимов является неотъемлемой частью проектирования герметизирующего узла. Связано это с тем, что распределение температуры во взаимодействующих деталях существенно влияет на процессы, происходящие в области контакта. От температуры зависит коэффициент трения и физико-механические свойства материалов. Тепловые потоки способствуют появлению

термоупругих перемещений, приводит к изменению области контакта и перераспределению контактных напряжений. Тепловые поля оказывают влияние на физико-химические процессы – влияют на структурное состояние тел, образование пленок на поверхности и пр. Вид и интенсивность изнашивания во многом определяются температурой в области контакта.

Существенное влияние на работоспособность уплотнения оказывают следующие факторы:

- ◆ коэффициент нагрузки (отношение прижимного усилия к силе давления среды);
- ◆ скорость скольжения;
- ◆ шероховатость и параллельность контактных поверхностей;
- ◆ форма зазора, зависящая от механической и температурной деформации в процессе работы;
- ◆ сочетание материалов пары трения;
- ◆ степень загрязнения, теплопроводность, химический состав и наличие воды в среде работы уплотнения;
- ◆ режим трения, вибрация, несоосности и биения, перерывы в движении, а также прочие конструктивные и эксплуатационные факторы.

Определяющим фактором, влияющим на мощность тепловыделения, является величина прижимного усилия. При низком коэффициенте нагрузки уменьшается вероятность термической перегрузки, однако увеличивается опасность раскрытия стыка уплотнительных поверхностей. В нагруженном уплотнении быстрее протекает приработка, но эти уплотнения испытывают и большие температурные нагрузки.

**Методика исследования и результаты.** Для определения температурного режима уплотнения примем, что распределение температур осесимметрично и существует конвективный теплообмен на свободных поверхностях (рис. 2). Температурное поле возникает в результате генерирования теплового потока в зоне трения на поверхности контакта уплотнения и контртела. Из зоны нагрева тепло распределяется между уплотнением и контртелом и конвекцией отводится в окружающую среду. Полимеры обладают малым значением теплопроводности, отличающимся в 30–50 раз от металлов, что обуславливает высокую температуру в зоне трения.

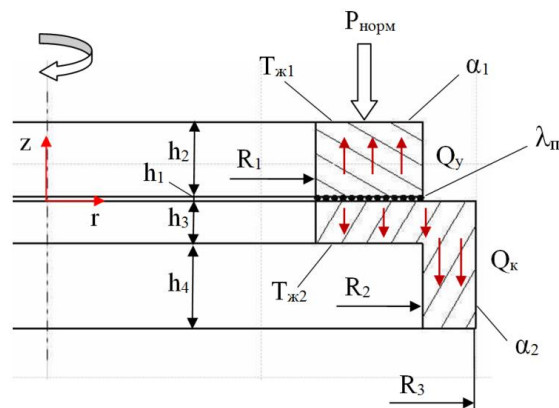


Рис. 2. Модель торцевого уплотнения для расчета температурного режима

При инженерных расчетах часто используют условия неидеального теплового контакта с распределением тепловых потоков (в зоне контакта уплотнения и контртела задается граничное условие II рода – условие Неймана, подразумевающее задание на граничной поверхности плотность теплового потока):

$$\text{для уплотнения } \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} = k\varphi(r, t) \quad \text{при } z = 0, \quad R_1 \leq r \leq R_2$$

$$\text{для контртела } -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial z} = (1-k)\varphi(r, t) \quad \text{при } z = 0, \quad R_1 \leq r \leq R_2$$

где  $T_1$  – температура антифрикционного слоя уплотнения,  $T_3$  – температура контртела,  $k$  – коэффициент разделения потоков тепла.

При таком подходе тепловая задача представляет собой две независимые задачи: для уплотнения и для контртела. Коэффициент разделения тепловых потоков определяется при этом по специальной методике [19].

Система уравнений теплопроводности для торцевого уплотнения может быть записана в виде

$$\frac{\partial^2 T_i}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_i}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_i}{\partial z^2} = \frac{c_i \rho_i}{\lambda_i} \frac{\partial T_i}{\partial t} \quad (i = 1, 2)$$

где  $T_1$  – температура антифрикционного слоя уплотнения,  $T_2$  – температура металлической втулки уплотнения,  $c_i$  – удельная теплоемкость,  $\rho_i$  – плотность,  $\lambda_i$  – коэффициент теплопроводности соответствующего слоя уплотнения.

Граничные условия должны быть записаны в виде (условие идеального теплового контакта между антифрикционным слоем уплотнения и металлической втулкой уплотнения):

$$T_1 = T_2, \quad \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} \quad \text{при } z = h_1, \quad R_1 \leq r \leq R_2$$

здесь  $\lambda_1$  – коэффициент теплопроводности антифрикционного слоя,  $\lambda_2$  – коэффициент теплопроводности втулки.

Условия теплообмена с окружающей средой по закону Ньютона могут быть записаны в виде

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} = \alpha_2 (T_2 - T_{cp}) \quad \text{при } z = h_1 + h_2, \quad R_1 \leq r \leq R_2$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} = \alpha_1 (T_1 - T_{cp}) \quad \text{при } r = R_2, \quad 0 \leq z \leq h_1$$

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} = \alpha_2 (T_2 - T_{cp}) \quad \text{при } r = R_2, \quad h_1 \leq z \leq h_1 + h_2$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} = \alpha_{1e} (T_1 - T_e) \quad \text{при } r = R_1, \quad 0 \leq z \leq h_1$$

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} = \alpha_{2e} (T_2 - T_e) \quad \text{при } r = R_1, \quad h_1 \leq z \leq h_1 + h_2$$

$\alpha_1, \alpha_2$  – коэффициенты теплообмена частей уплотнения с воздухом,

$\alpha_{1e}, \alpha_{2e}$  – коэффициенты теплообмена частей уплотнения с валом.

Уравнение теплопроводности для контртела

$$\frac{\partial^2 T_3}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_3}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_3}{\partial z^2} = \frac{c_3 \rho_3}{\lambda_3} \frac{\partial T_3}{\partial t}$$

Граничные условия для контртела могут быть записаны в виде

$$\begin{aligned}
 -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial z} &= (1-k)\varphi(r,t) && \text{при } z=0, \quad R_1 \leq r \leq R_2 \\
 -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial z} &= \alpha_3(T_3 - T_{cp}) && \text{при } z=-h_3, \quad R_1 \leq r \leq R_2 \\
 \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial r} &= \alpha_3(T_3 - T_{cp}) && \text{при } r=R_3, \quad -h_4 \leq z \leq 0 \\
 -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial r} &= \alpha_3(T_3 - T_{cp}) && \text{при } r=R_2, \quad -h_4 \leq z \leq -h_3
 \end{aligned}$$

Для оценки температурного процесса в уплотнительном узле воспользуемся компьютерной моделью динамики распределения тепла. В качестве инструментальной конечной – элементной моделирования был использован пакет ANSYS. Разработана программа на макроязыке APDL ANSYS, позволяющая решать рассматриваемую задачу при различных значениях геометрических и физических входных параметров, начальных и граничных условиях и различных временных интервалах. Для упрощения моделирования и снижения требований к вычислительным ресурсам была построена тестовая модель плоского сечения узла. Геометрия построения имеет параметры, указанные на рисунке (рис. 3).

В качестве базового материала для контртела и уплотнителя была выбрана сталь плотностью  $\rho_1 = 7833 \text{ кг/м}^3$ , теплопроводностью  $\lambda_1 = 45.3 \text{ Вт/м}^\circ\text{C}$  и удельной теплоемкостью  $C_1 = 434 \text{ Дж/кг}^\circ\text{C}$ . Для полимерного слоя использовался фторопласт плотностью  $\rho_2 = 2200 \text{ кг/м}^3$ , теплопроводностью  $\lambda_2 = 0.23 \text{ Вт/м}^\circ\text{C}$  и удельной теплоемкостью  $C_2 = 963 \text{ Дж/кг}^\circ\text{C}$ .

Заданы начальные и граничные тепловые условия. Начальная температура всех элементов узла  $T_0$  принята  $20^\circ\text{C}$ , температура окружающей среды  $T_{окр}$  считалась постоянной и равной  $20^\circ\text{C}$ .

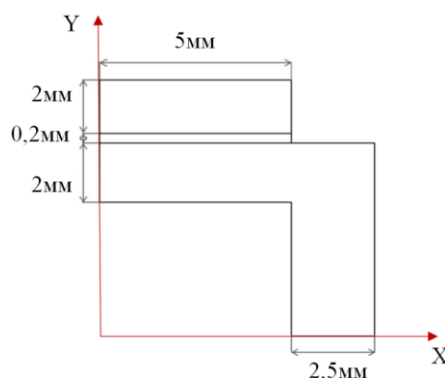


Рис. 3. Геометрия конечно-элементной модели уплотнительного узла

В качестве граничных условий на всех внешних гранях узла задавался конвективный теплообмен. Было принято, что окружающей средой считается воздух при нормальном атмосферном давлении, исходя из чего коэффициенты теплоотдачи для стали  $\alpha_1 = 7.9 \text{ Вт/м}^2\text{}^\circ\text{C}$ , для фторопласта  $\alpha_2 = 8.5 \text{ Вт/м}^2\text{}^\circ\text{C}$ . На границе между контртелом и полимером задавался тепловой поток, мощность которого

го определена аналитически как механическая работа сил трения, и для выбранной геометрии принята равной  $0.5Bm$ . Этот поток смоделирован распределенным между поверхностью полимера и поверхностью контртела в пропорции 1:9. Тепловой источник имеет градиент интенсивности выделения, увеличивающийся от центра к радиусу, что связано с различной длиной пройденного пути для разных участков контакта.

Конечно – элементная модель задачи с граничными условиями приведена на рисунке (рис. 4).

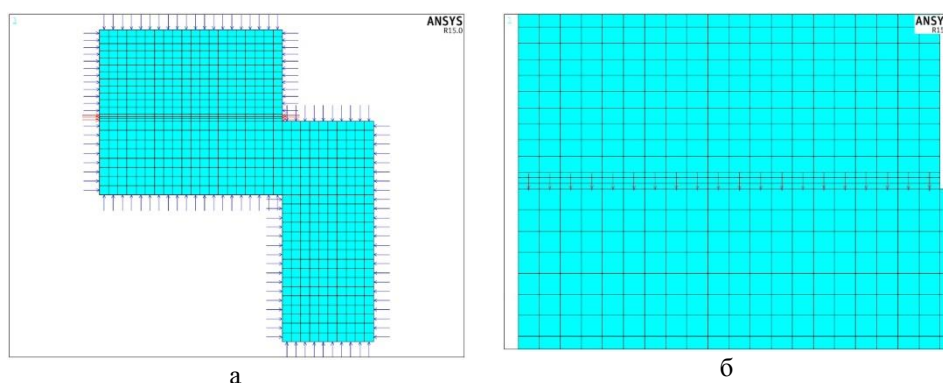


Рис. 4. Конечно – элементная модель: а – условия конвективного теплообмена; б – тепловой поток

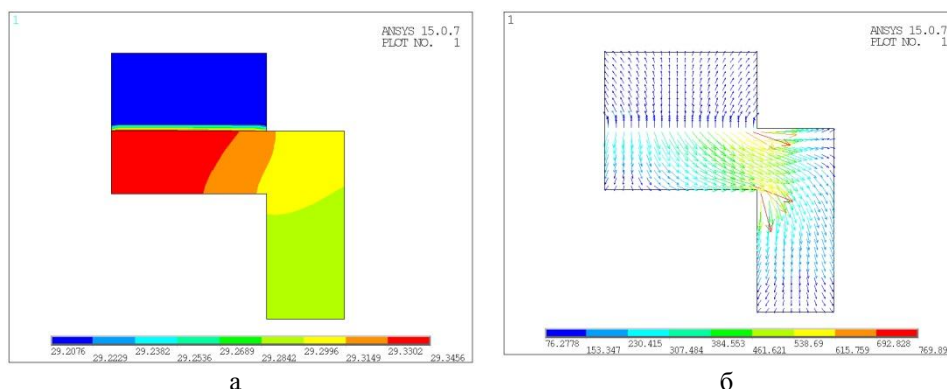


Рис. 5. Распределение: а – температуры, б – теплового потока в узле,  $t = 3600c$

Построение геометрических моделей осуществлялось с использованием технологии моделирования «снизу–вверх» посредством следующих действий: задание опорных точек; построение дуг и прямых линий, соединяющих опорные точки; и построение областей по линиям. Элементное разбиение производилось двумерными восьмиузловыми элементами PLANE77 с единственной степенью свободы «температура». Размер элементов для контртела и материала основы составил порядка  $250 \times 250$  мкм, для полимера  $250 \times 70$  мкм. Общее количество узлов равнялось 2115, элементов 660. Время расчета устанавливалось равным 3600 с шагом 30 с.

Участок с наивысшей температурой смещен к центру (рис. 5), не смотря на наличие градиента тепловой интенсивности источника от центра к наружному радиусу. Это объясняется быстрым охлаждением наружной части из-за большого количества свободных поверхностей для конвекции.

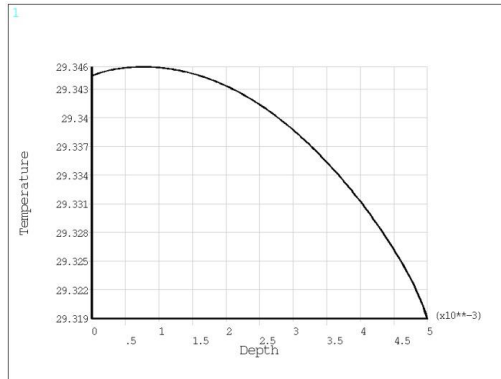
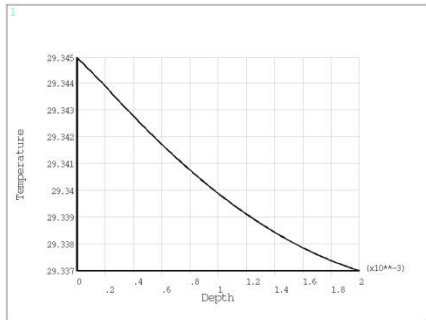


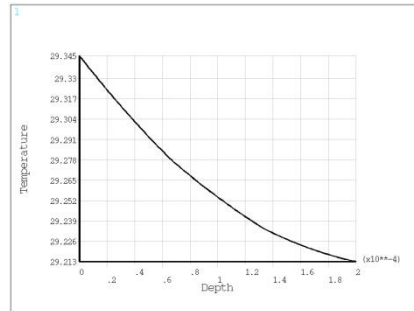
Рис. 6. Распределение температуры вдоль границы между контртелом и полимером,  $t = 3600c$

Из рисунка (рис. 6) видно, что максимальное значение температуры на границе между контртелом и полимером достигается в точке  $X=0,00075$  м.

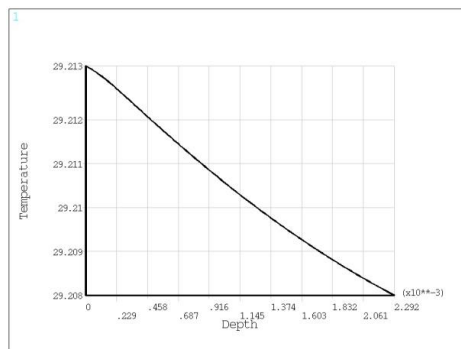
Из рис. 7 следует, что самая высокая температура наблюдается в контртеле, а самая низкая в уплотнителе, что подтверждает термоизоляционные свойства полимера. При этом уплотнитель прогревается наиболее равномерно по сравнению с контртелом и полимером, что отчасти можно объяснить его простой геометрической формой.



а



б



с

Рис. 7. Градиент температуры в: а – контртеле, б – полимере, с – материале основы.  $X = 0$ ,  $t = 3600c$



На рис. 8 показан переходной тепловой процесс, спустя примерно 2400 с температура прекращает расти и стабилизируется.

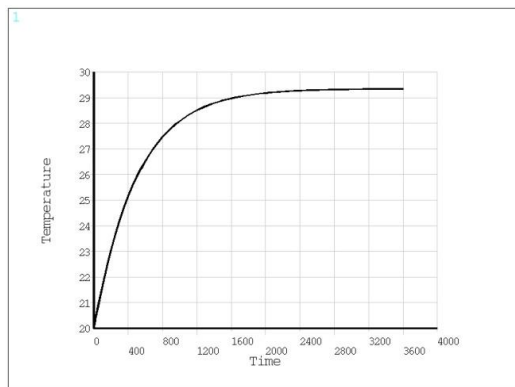


Рис. 8. Распределение температуры по времени на границе между контртелом и полимером,  $X = 0$

**Выводы.** На основании рассмотрения проведенных ранее исследований [2–4, 6–12] и анализа полученных результатов были получены новые модели, описывающие тепловые режимы торцевого уплотнения с антифрикционным слоем, возникающие в процессе эксплуатации транспортных конвейеров.

Отличительной чертой полученных результатов является применение конечно-элементного метода для моделирования уплотнений подшипниковых узлов и предложенная авторами методика нанесения двухслойного покрытия на металлическую рабочую поверхность уплотнительной втулки.

Для политетрафторэтилена, используемого в узле, показано, что под воздействием ускоренного износа при сухом трении и возникающих температурных явлений происходят сложные физико-химические изменения, связанные с протеканием конкурирующих процессов деструкции и структурирования. В слоистой аморфной жидкокристаллической мезофазе ПТФЭ имеются участки, сохраняющие свою кристаллическую структуру [20]. Отдельные участки кристаллических фрагментов или ламелей смещаются в процессе трения вместе со слоями макромолекул, при этом фрагментация кристаллической фазы в пленке переноса создает благоприятные условия ориентации макромолекул вдоль направления скольжения при ортогональном расположении ламелей. При этом коэффициент трения уменьшается до 0,03–0,05. Зависимость температурного режима от скорости скольжения в антифрикционном слое прямо пропорциональна мощности источника тепла.

Таким образом, при одинаковой генерации тепла термически более нагружено уплотнение с меньшей скоростью вращения, так как при уменьшении скорости теплообмен контртела с окружающей средой становится менее интенсивным.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Майер Э. Торцевые уплотнения: Пер. с нем. – М.: Машиностроение, 1978. – 288 с.
2. Ивановкин П.Г., Сычев А.А., Кравченко Ю.В., Бецофен С.Я., Ашмарин А.А. Исследования антифрикционных самосмазывающихся композиционных покрытий для тяжело нагруженных узлов трения // Новые материалы и технологии НМТ–2010. Материалы Всероссийского науч.-техн. конф. Москва, 16–18 ноября 2010. – Т. 2. – С. 96.
3. Ивановкин П.Г., Кравченко Ю.В., Шайхиев А.Р. Сравнение структуры поверхностных слоев металла при формировании силового каркаса методом электроискрового легирования с помощью установки «Элитон 52Б» и генератора токовых импульсов // Известия Самарского научного центра РАН. Т. 13. – 2011. – № 4 (3). – С. 1053–1055.

4. *Коротаев Д.Н., Машков Ю.К., Грязное Б.Т., Николенко С.В.* Влияние электроискрового легирования стальных образцов на уровень их адгезионного взаимодействия // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2008. – № 7. – С. 17-20.
5. *Машков Ю.К., Коротаев Д.Н., Казанцева А.Е.* Сущность метода электроискрового легирования // Омский научный вестник. – 2007. – № 2. – С. 94-95.
6. *Иваночкин П.Г., Кравченко Ю.В., Трушников А.С.* Микроструктурные исследования образцов рельсовой стали бывших в эксплуатации, и после нанесения электроискрового покрытия // Проблемы синергетики в трибологии, трибоэлектрохимии, материаловедении и мехатронике: Материалы, IX Междунар. науч.-практ. конф. – Новочеркасск ЮРГТУ (НПИ), 2010. – С. 67-71.
7. *Колесников В.И. Иваночкин П.Г.* Двухслойные композиции триботехнического назначения для тяжело нагруженных узлов трения: монография. – Ростов-на-Дону: РГУПС, 2009. – 124 с.
8. *Колесников И.В., Белый А.В., Мясникова Н.А., Мясников Ф.В., Кравченко Ю.В., Новиков Е.С.* Многослойное антифрикционное наноструктурированное покрытие для лубрикации в тяжело нагруженных узлах трения // Экологический вестник научных центров ЧЭС. – 2012. – № 2. – С. 34-41.
9. *Иваночкин П.Г., Мясников Ф.В., Сидашов А.В., Смелов А.В.* Применение модифицированного полимерного покрытия с многослойной рабочей поверхностью в подшипниках скольжения // Вестник РГУПС. – 2013. – № 4. – С. 8-12.
10. *Иваночкин П.Г., Колесников В.И., Флек Б.М., Чебаков М.И.* Контактная прочность двухслойного покрытия при наличии сил трения в области контакта // Известия РАН. Механика твердого тела. – 2007. – № 1. – С. 183-192.
11. *Колесников В.И., Мясникова Н.А., Жукова Ю.В., Буйло С.И., Иваночкин П.Г.* Методы диагностики состояния многослойного антифрикционного наномодифицированного покрытия на боковой поверхности головки рельса // Управление большими системами: сборник трудов. – 2012. – № 38. – С. 205-214.
12. *Колесников И.В., Блажеев В.В., Иваночкин П.Г., Белоцерковский М.А., Кукареко В.А.* Повышение надежности и долговечности шарниров тормозной рычажной передачи путем применения многослойного антифрикционного покрытия // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2012. – № 3. – С. 17-24.
13. *Смелов А.В., Кравченко Ю.В.* Перспективы использования эпоксиэфторопластовых покрытий в узлах трения машин непрерывного транспорта // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 1 (138). – С. 57-62.
14. *Смелов А.В., Мясникова Н.А., Мантуров Д.С., Никульшин Н.И.* Трибологическое применение наночастиц, полученных с помощью бисерных мельниц // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2012. – № 4. – С. 7-11.
15. *Burris D.L., Zhao S., Duncan R., Lowitz J., Perry S.S., Schadler L.S., Sawyer W.G.* A route to wear resistant PTFE via trace loadings of functionalized nanofillers // Wear. – 2009. – № 267. – P. 653-660.
16. *Yanhong Y., Zhining J., Yulin Y.* Preparation and Mechanical Properties of PTFE/nano-EG Composites Reinforced with Nanoparticles // Procedia Environmental Sciences. – 2011. – № 10, Part B. – P. 929-935.
17. *Bahadur S., Schwartz C.* The effect of nanoparticle fillers on transfer film formation and the tribological behavior of polymers Tribology of Polymeric Nanocomposites // Friction and Wear of Bulk Materials and Coatings: Second Edition. – 2013. – P. 23-48.
18. *Охлопкова А.А., Петрова П.Н., Гоголева О.В.* Разработка полимерных нанокомпозитов триботехнического назначения для нефтегазового оборудования // Нефтегазовое дело. – 2009. [http://www.ogbus.ru/authors/Okhlopkova/Okhlopkova\\_1.pdf](http://www.ogbus.ru/authors/Okhlopkova/Okhlopkova_1.pdf).
19. *Богатин О.Б., Мороз В.А., Черский И.Н.* Основы расчета полимерных узлов трения. – Новосибирск: Наука. – 1983. – 213 с.
20. *Машков Ю.К. Овчар З.Н. Суриков В.И. Калистратова Л.Ф.* Композиционные материалы на основе политетрафторэтилена. Структурная модификация. – М.: Машиностроение, 2005. – 240 с.

#### REFERENCES

1. *Mayer E.* Tortsevye uplotneniya [Mechanical seals], Translated from germ. Moscow: Mashinostroenie, 1978, 288 p.

2. *Ivanochkin P.G., Sychev A.A., Kravchenko Yu.V., Betsofen S.Ya., Ashmarin A.A.* Issledovaniya antifriktsionnykh samosmazivayushchikhsya kompozitsionnykh pokrytiy dlya tyazhelonagruzhennykh uzlov treniya [Research antifriction self-lubricating composite coatings for highly loaded friction units], *Novye materialy i tekhnologii NMT–2010. Materialy Vseros. nauch.-tekhn. konf.* [New materials and technologies NMT–2010. Materials of all-Russian scientific-technical conference]. Moscow, 16–18 November 2010, Vol. 2, p. 96.
3. *Ivanochkin P.G., Kravchenko Yu.V., Shaykhiev A.R.* Sravnenie struktury poverkhnostnykh sloev metalla pri formirovani silovogo karkasa metodom elektroiskrovogo legirovaniya s pomoshch'yu ustanovki «Eliton 52B» i generatora tokovykh impul'sov [Comparison of the structure of metal layers in the formation of the power frame by the method of electric-spark alloying with the installation "Eliton 52B and generator of current pulses], *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Izvestiya Samara Scientific center of RAS]. Vol. 13, 2011, No. 4 (3), pp. 1053-1055.
4. *Korotaev D.N., Mashkov Yu.K., Gryaznoe B.T., Nikolenko S.V.* Vliyanie elektroiskrovogo legirovaniya stal'nykh obraztsov na uroven' ikh adgezionnogo vzaimodeystviya [The effect of electrospark alloying of steel samples on the level of their adhesive interaction], *Trenie i smazka v mashinakh i mekhanizmax* [Friction and Lubrication in Machines and Mechanisms], 2008, No. 7, pp. 17-20.
5. *Mashkov Yu.K., Korotaev D.N., Kazantseva A.E.* Sushchnost' metoda elektroiskrovogo legirovaniya [The essence of the method of electrospark alloying], *Omskiy nauchnyy vestnik* [Omsk Scientific Bulletin], 2007, No. 2, pp. 94-95.
6. *Ivanochkin P.G., Kravchenko Yu.V., Trushnikova A.S.* Mikrostrukturnye issledovaniya obraztsov rel'sovoy stali byvshikh v ekspluatatsii, i posle naneseniya elektroiskrovogo pokrytiya [Microstructural examination of samples of rail steel were in operation, and after the application of electro-spark coatings], *Problemy sinergetiki v tribologii, triboelektrokhimii, materialovedenii i mekhatronike: Materialy, IX Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Problems of synergetics in tribology, triboelectricity, material science and mechatronics: Proceedings, IX International scientific-practical conference]. Novocherkassk YuRGU (NPD), 2010, pp. 67-71.
7. *Kolesnikov V.I., Ivanochkin P.G.* Dvukhsloynnye kompozitsii tribotekhnicheskogo naznacheniya dlya tyazhelonagruzhennykh uzlov treniya: monografiya [Two-layer composition tribotechnical purpose for heavy-loaded friction units: monograph]. Rostov-on-Don: RGUPS, 2009, 124 p.
8. *Kolesnikov I.V., Belyy A.V., Myasnikova N.A., Myasnikov F.V., Kravchenko Yu.V., Novikov E.S.* Mnogosloynnoe antifriktsionnoe nanostrukturirovanoe pokrytie dlya lubrikatsii v tyazhelonagruzhennykh uzлах treniya [Multilayer nanostructured antifriction coating for lubrication in heavy-duty friction], *Ekologicheskiy vestnik nauchnykh tsentrov ChES* [Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation], 2012, No. 2, pp. 34-41.
9. *Ivanochkin P.G., Myasnikov F.V., Sidashov A.V., Smelov A.V.* Primeneniye modifitsirovannogo polimernogo pokrytiya s mnogoslonoynoy rabochey poverkhnost'yu v podshipnikakh skol'zheniya [Application of the modified polymer coating with laminated work surface in sliding bearings], *Vestnik RGUPS* [Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya], 2013, No. 4, pp. 8-12.
10. *Ivanochkin P.G., Kolesnikov V.I., Flek B.M., Chebakov M.I.* Kontaktnaya prochnost' dvukhsloynnogo pokrytiya pri nalichii sil treniya v oblasti kontakta [Contact strength two-layer coating in the presence of friction forces in the contact area], *Izvestiya RAN. Mekhanika tverdogo tela* [Mechanics of Solids], 2007, No. 1, pp. 183-192.
11. *Kolesnikov V.I., Myasnikova N.A., Zhukova Yu.V., Buylo S.I., Ivanochkin P.G.* Metody diagnostiki sostoyaniya mnogoslonoynogo antifriktsionnogo nanomodifitsirovannogo pokrytiya na bokovoy poverkhnosti golovki rel'sa [Methods for diagnosing the state of the multilayered anti-friction nanomodified coatings on the lateral surface of the rail head], *Upravlenie bol'shimi sistemami: sbornik trudov* [Managing large systems: proceedings], 2012, No. 38, pp. 205-214.
12. *Kolesnikov I.V., Blazheev V.V., Ivanochkin P.G., Belotserkovskiy M.A., Kukareko V.A.* Povysheniye nadezhnosti i dolgovechnosti sharnirov tormoznoy rychazhnoy peredachi putem primeneniya mnogoslonoynogo antifriktsionnogo pokrytiya [Improving the reliability and durability of hinges brake lever transfer by applying multi-layer anti-friction coating], *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya], 2012, No. 3, pp. 17-24.

13. Smelov A.V., Kravchenko Yu.V. Perspektivy ispol'zovaniya epoksidofloroplastovykh pokrytiy v uzlakh treniya mashin nepreryvnogo transporta [Aspects of usage epoxidefluoroplastic coatings in friction assemblies of conveyer], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, No. 1 (138), pp. 57-62.
14. Smelov A.V., Myasnikova N.A., Manturov D.S., Nikul'shin N.I. Tribologicheskoe primeneniye nanochastits, poluchennykh s pomoshch'yu bisernykh mel'nits [Tribological application of nanoparticles obtained using bead mills], *Vestnik RGUPS* [Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya], 2012, No. 4, pp. 7-11.
15. Burris D.L., Zhao S., Duncan R., Lowitz J., Perry S.S., Schadler L.S., Sawyer W.G. A route to wear resistant PTFE via trace loadings of functionalized nanofillers, *Wear*, 2009, No. 267, pp. 653-660.
16. Yanhong Y., Zhining J., Yulin Y. Preparation and Mechanical Properties of PTFE/nano-EG Composites Reinforced with Nanoparticles, *Procedia Environmental Sciences*, 2011, No. 10, Part B, pp. 929-935.
17. Bahadur S., Schwartz C. The effect of nanoparticle fillers on transfer film formation and the tribological behavior of polymers Tribology of Polymeric Nanocomposites, *Friction and Wear of Bulk Materials and Coatings: Second Edition*, 2013, pp. 23-48.
18. Okhlopko A.A., Petrova P.N., Gogleva O.V. Razrabotka polimernykh nanokompozitov tribotekhnicheskogo naznacheniya dlya neftegazovogo oborudovaniya [Development of polymer nanocomposites tribotechnical purpose for oil and gas equipment], *Neftegazovoe delo* [Oil and Gas Business], 2009. Available at: [http://www.ogbus.ru/authors/Okhlopko/Okhlopko\\_1.pdf](http://www.ogbus.ru/authors/Okhlopko/Okhlopko_1.pdf).
19. Bogatin O.B., Morov V.A., Cherskiy I.N. Osnovy rascheta polimernykh uzlov treniya [The basis of calculation of polymer friction]. Novosibirsk: Nauka, 1983, 213 p.
20. Mashkov Yu.K. Ovchar Z.N. Surikov V.I. Kalistratova L.F. Kompozitsionnye materialy na osnove politetrafluoretilena. Strukturnaya modifikatsiya [Composite materials based on polytetrafluoroethylene. Structural modification]. Moscow: Mashinostroenie, 2005, 240 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор О.А. Агеев.

**Смелов Александр Владимирович** – Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС); e-mail: alex\_brave@mail.ru; 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2; тел.: +78632595348; кафедра теоретической механики; аспирант.

**Данильченко Сергей Александрович** – e-mail: sergey.a.danilchenko@gmail.com; научно-образовательный центр «Нанотехнологии и новые материалы»; ведущий инженер.

**Smelov Alexandr Vladimirovich** – Rostov State Transport University (RSTU); e-mail: alex\_brave@mail.ru; 2, Rostovskogo Strrelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sg., Rostov-on-Don, 344038, Russia; phone: +78632595348; the department of theoretical mechanics; postgraduate student.

**Danilchenko Sergey Aleksandrovich** – e-mail: sergey.a.danilchenko@gmail.com; Scientific-educational center «Nanotechnology and new materials»; chief engineer.

УДК 658.512.2.011.5

**Л.А. Гладков, Н.В. Гладкова, С.Н. Лейба**

### **РАЗМЕЩЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ СХЕМ ЭВА НА ОСНОВЕ ГИБРИДНЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ МЕТОДОВ\***

*Рассматривается задача размещения элементов схем электронно-вычислительной аппаратуры (ЭВА) на коммутационном поле. Данная задача относится к задачам конструкторского этапа проектирования ЭВА и является NP-полной задачей. Приведена постановка задачи размещения элементов схем ЭВА на множестве заданных позиций дискретно-*

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант 14-07-00829 и Минобрнауки России (проект № 8.823.2014/К).