

Несимметричные термоизоляторы при высокочастотной электротермии полимеров

05, май 2014

DOI: 10.7463/0514.0709325

Лившиц А. В.

УДК 62-533.65

Россия, ИрГУПС

livnet@list.ru**Введение**

Полимерные материалы широко применяются во многих отраслях промышленности, поскольку обладают рядом преимуществ, которые позволяют заменять традиционные материалы полимерами при изготовлении деталей, работающих при невысоких нагрузках. Вопросы, касающиеся технологий производства и эксплуатации изделий из полимерных материалов, изучены явно недостаточно. Существует большое количество аспектов данного вопроса, требующих научных исследований. Так, высокочастотная (ВЧ) электротермия, применительно к полимерным материалам, является одним из прогрессивных способов обработки деталей, позволяющих реализовать процессы сварки полимерных деталей, сушки полимеров, восстановление их прочностных свойств в процессе эксплуатации и хранения, «залечивание» усталостных трещин и, как следствие, продлевать срок службы полимерных изделий [1...4]. Однако, вследствие наличия сложных законов изменения электрофизических параметров полимеров от температуры, времени нагрева и других факторов при реализации технологических процессов ВЧ-обработки возникает большое количество проблем: необходимость защиты от пробоя, контроля фазового состояния материала и температур нагрева, контроля влажности материала и др. В связи с этим математическое моделирование процессов электротермии представляет, как научный, так и практический интерес.

Основная часть. Описание исследования. Полученные результаты

Авторами [2] выполнены работы по формированию математической модели ВЧ-нагрева термопластических полимеров на основе дифференциальных уравнений нестационарной теплопроводности с внутренним источником тепла. Традиционно, при реали-

зации процессов ВЧ-нагрева для сварки полимеров используют технологические схемы с одним электроизолятором из картона, не обращая внимание на его термоизолирующие свойства. При сварке несимметричных по толщине деталей интересно провести анализ нагрева для случая технологической системы, представляющей собой пятислойную пластину с двумя изоляторами и оценить их вклад уже не с точки зрения защиты от явления электрического пробоя, а рассмотреть теплоизолирующий эффект (рис. 1).

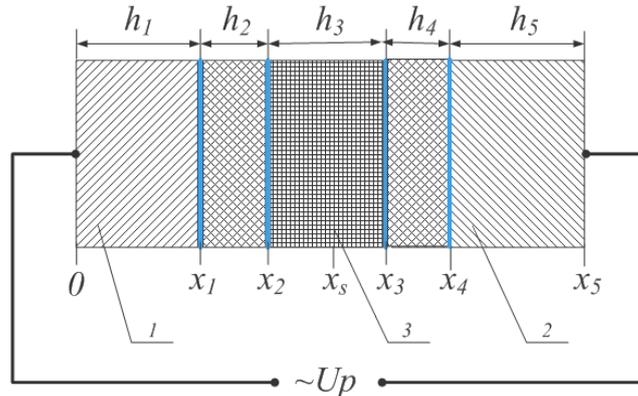


Рис. 1. Технологическая система ВЧ-нагрева термопласта с двумя изолированными электродами конденсатора $Cp1$,

где: h_1, h_5 – толщина высокопотенциального 1 и заземленного 2 электродов; h_2, h_4 – толщины изоляционных вкладышей; x_i – координаты границ слоев; x_s – координата точки максимального разогрева термопласта 3; U_p – напряжение на рабочем конденсаторе.

Распределение температуры в многослойной пластине описывается системой уравнений нестационарной теплопроводности, причем для термопласта - с учетом внутренних источников тепла. Для случая пятислойной пластины данная система имеет вид [5,6]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial T_1}{\partial \tau} = \frac{\lambda_1}{c_{p1}(T_1)\rho_1} \cdot \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} \\ \frac{\partial T_2}{\partial \tau} = \frac{\lambda_2}{c_{p2}(T_2)\rho_2} \cdot \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} \\ \frac{\partial T_3}{\partial \tau} = \frac{\lambda_3}{c_{p3}(T_3)\rho_3} \cdot \frac{\partial^2 T_3}{\partial x^2} + \frac{p_3(\tau)}{c_{p3}(T_3)\rho_3} \\ \frac{\partial T_4}{\partial \tau} = \frac{\lambda_4}{c_{p4}(T_4)\rho_4} \cdot \frac{\partial^2 T_4}{\partial x^2} \\ \frac{\partial T_5}{\partial \tau} = \frac{\lambda_5}{c_{p5}(T_5)\rho_5} \cdot \frac{\partial^2 T_5}{\partial x^2} \end{array} \right. \quad (1)$$

Начальные условия:

$$T|_{\tau=0} = T_H, \quad 0 \leq x \leq x_5, \quad (2)$$

где T, T_H – соответственно локальная и начальная температура; x – текущая толщина слоя; $\lambda_j, c_{pj}, \rho_j$ – соответственно коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость и

плотность материала слоя; τ – время нагрева; j – номер слоя: 1 – металл, 2, 4 – изоляторы, 3 – обрабатываемый полимер, 5 – металл.

Начальную температуру каждого слоя необходимо принимать равной температуре нормальных условий при обработке единичной или первой заготовки из партии и равной локальной температуре соответствующего слоя предыдущей обработки при нагреве последующих.

Граничные условия на внешних границах электродов соответствуют условиям третьего рода:

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=x_1} = \alpha_1 \Delta T_1, \quad -\lambda_1 \frac{\partial T_5}{\partial x} \Big|_{x=x_5} = \alpha_5 \Delta T_5, \quad (3)$$

где α_1, α_2 – коэффициенты теплообмена, $\Delta T_1, \Delta T_2$ – разницы температур поверхности тела и окружающей среды. Принимая во внимание относительно низкие температуры плавления исследуемых термопластов и высокую динамику разогрева теплообмен с окружающей средой при обработке первых и единичных заготовок можно считать пренебрежимо малым:

$$\frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{\partial T_5}{\partial x} \Big|_{x=5} = 0. \quad (4)$$

На границах слоев температуры и тепловые потоки равны (граничные условия четвертого рода):

$$T_i = T_{i+1} \text{ при } x = x_i \text{ (} i = 1 \dots 4 \text{)}. \quad (5)$$

$$\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial x} = \lambda_{i+1} \frac{\partial T_{i+1}}{\partial x} \text{ при } x = x_i \text{ (} i = 1, \dots, 4 \text{)}.$$

Данная модель реализована в виде программного комплекса Aleo_HFH [7, 8]. Интерфейс комплекса представлен на рис. 2.

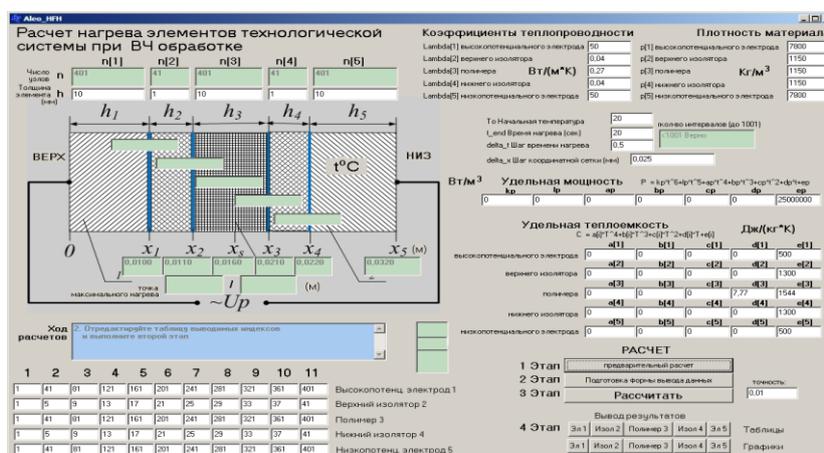


Рис. 2. Интерфейс программного комплекса Aleo_HFH

Исследовательские возможности комплекса позволяют изучить взаимовлияние геометрических и электрофизических параметров технологической системы ВЧ-нагрева термопластов.

Общая картина распределения температурного поля по толщине обрабатываемого полимера, определяемая наличием внутреннего источника тепла, получаемая при помощи программного комплекса представлена на рис. 3. На графике можно выделить три зоны: зону равномерного нагрева L_S , и краевые зоны термического влияния контактируемых с полиамидом поверхностей. Зоны термического влияния характеризуются глубинами L_1 , L_2 и температурами контактных поверхностей T_1 , T_2 . Характеристики указанных зон определяются геометрией многослойной пластины, электрофизическими параметрами составляющих ее материалов и требуют дополнительного исследования.

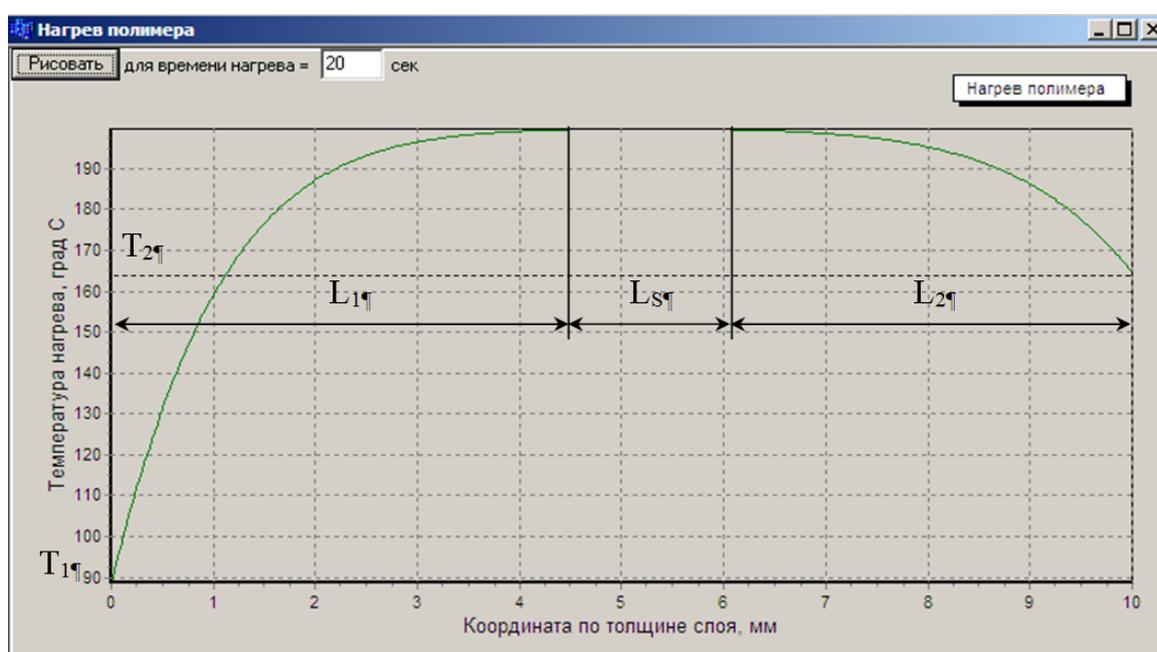


Рис. 3. Распределение температуры нагрева по толщине полимера (ПА-6; $h_3=10$ мм; время нагрева $t=20$ сек; верхний изолятор – картон, $h_2=0,1$ мм; нижний изолятор – картон, $h_2=3$ мм; $P=const$)

При сушке интересно рассматривать процессы ВЧ-нагрева с симметрично расположенными изоляторами одинаковой толщины, что соответствует эффективно организованному процессу сушки с относительно равномерным прогревом полимера. Для повышения качества сварного соединения и эффективности процесса при сварке необходимо, в противовес сушке, организовать максимальный нагрев в локальной зоне сварки с минимальным разогревом периферийных зон. При этом смещение точки достижения температуры плавления (X_S) видится наиболее важным.

Максимального смещения можно достичь, поставив со стороны одного электрода изолятор, толщиной h_2 выше эффективной [7] и исключив изолятор со стороны второго электрода. На рис. 4 представлены различные комбинации расположения изоляторов при сварке полимеров суммарной толщиной 4 мм.

Изменяя толщину картона для представленного варианта обработки, возможно, достичь смещения точки максимального нагрева от центрального ее расположения 1,15 мм (X_{S1}), что соответствует эффективной сварке деталей толщиной 3,15 и 0,85мм (рис. 4, граф. 1). Таким образом, изменение толщины картонных термоизоляторов позволяет в широких пределах решать задачу совмещения зоны расплава с контактирующими поверхностями свариваемых деталей из термопластов.

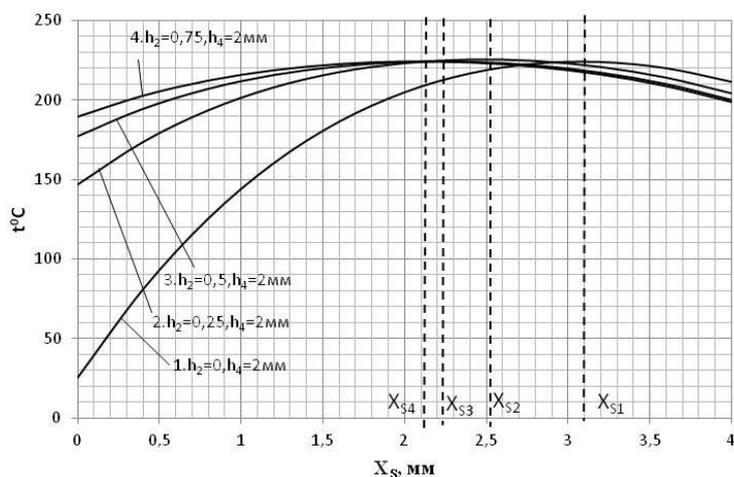


Рис. 4. Влияние несимметричных изоляторов на координату точки максимального нагрева X_S полиамида (ПА 66, $h_3=4$ мм, $p_3=2.107$ Вт/м³)

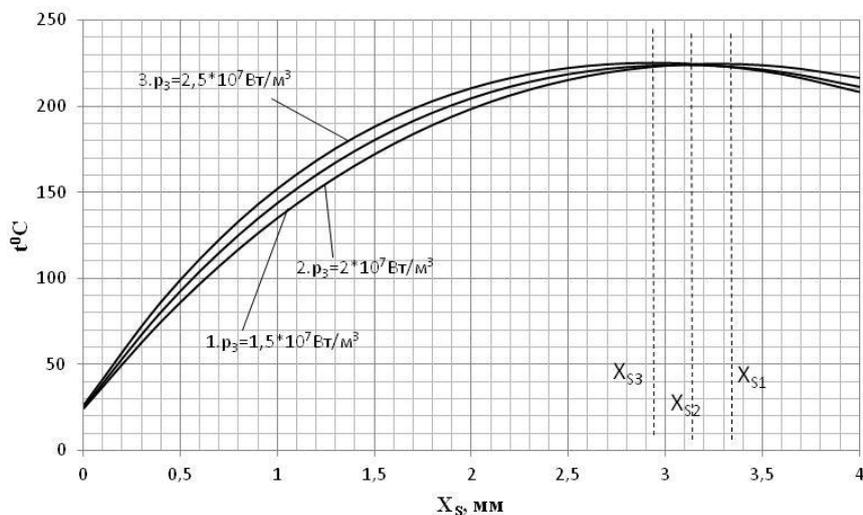


Рис. 5. Влияние удельной мощности воздействия на координату точки максимального нагрева X_S полиамида (ПА 66, $h_2=0$ мм, $h_4=4$ мм, $h_3=4$ мм)

Некоторое незначительное влияние на смещение координат точки максимального нагрева X_S оказывает изменение удельной мощности воздействия. Возможное смещение для сварки деталей суммарной толщины 4 мм в диапазоне удельных мощностей от $1,5 \times 10^7$ до $2,5 \times 10^7$ Вт/м³ показано на рис. 5.

В отношении оставшихся вне рассмотрения параметров изоляторов, возможно оказывающих влияние на смещение зоны максимального нагрева, таких как коэффициент теплопроводности λ_2 , удельная теплоемкость, c_{p2} и плотность ρ_2 можно сказать следующее: в широком диапазоне изменяется только плотность. Разнообразие различных картонов, достаточно велико, от картона чемоданного ГОСТ 22351-77 ($c_{p2}=485$ кг/м³) до картона электроизоляционного для трансформаторов и аппаратов с масляным заполнением ГОСТ 4194-88 ($c_{p2}=1300$ кг/м³). Расчеты с использованием предложенного программного комплекса показывают, что влияние плотности изолятора при прочих постоянных параметрах оказывает незначительное влияние на динамику разогрева полимера.

Практическая значимость. Заключение

На основе вышесказанного можно сделать вывод о необходимости построения технологического процесса электротермической сварки полимеров с учетом возможности смещения зоны максимального нагрева (расплава) полимера за счет изменения толщины термоизоляторов. Созданное программное обеспечение дает возможность по-новому подойти к исследованию режимов ВЧ-нагрева, решению практических задач повышения качества сварных соединений деталей из термопластов.

Список литературы

1. Филиппенко Н.Г., Лившиц А.В., Каргапольцев С.К. Контроль и управление высокочастотной электротермией. Новые аспекты: монография. LAP Academic Publishing, Saarbrücken, Deutschland, 2013. 157 с.
2. Попов С.И., Ларченко А.Г., Лившиц А.В., Филиппенко Н.Г. Исследование влияния диэлектрических элементов рабочего конденсатора высокочастотной электротермической установки на процесс обработки полимерных материалов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2013. № 3 (39). С. 270-275. [Investigation of electrothermal installations operating condenser dielectric components influence on polymeric materials high-frequency processing]
3. Попов С.И., Лившиц А.В., Филиппенко Н.Г. Восстановление подшипников буксовых узлов подвижного состава // Сборник научных трудов SWorld. Материалы международной научно-практической конференции «Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития'2012» (2-12 октября 2012 г.). Т. 2, № 3. Одесса: КУПРИЕНКО, 2012. С. 39-43.
4. Думчев И.С., Ларченко А.Г., Попов С.И., Филиппенко Н.Г., Лившиц А.В. Восстановление полиамидных сепараторов подшипников буксового узла подвижного состава ОАО «РЖД» // Молодой ученый. 2012. № 12 (47). С. 48-51.
5. Марков А.В., Грачёв С.Ю. Математическая модель высокочастотной сварки термопластов // 19 международная научная конференция «Математические методы в техни-

- ке и технологиях» (ММТТ-19): тр. Т. 5. Секция 5. Воронеж: Воронеж. гос. технол. акад., 2006. С. 87-89.
6. Кузнецов Г.В., Шеремет М.А. Разностные методы решения задач теплопроводности. Томск: Изд-во ТПУ, 2007. 172 с.
 7. Лившиц А. В., Филиппенко Н.Г. Расчет нагрева элементов технологической системы при высокочастотной термической обработке: свидетельство государственной регистрации программ для ЭВМ № 2013617957. 2013.
 8. Лившиц А. В., Филиппенко Н.Г. Программный модуль формирования технологической документации на основе графической информации: свидетельство государственной регистрации программ для ЭВМ № 2013619699. 2013.
 9. Попов С.И. Автоматизация управления технологическими процессами восстановления эксплуатационных свойств полимеров: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Иркутск, ИрГУПС. 18 с.

Unbalanced heat isolation in high-frequency electrothermics of polymers

05, May 2014

DOI: 10.7463/0514.0709325

A. V. Livshits

Irkutsk State University of Railway Transport, 664074, Irkutsk, Russian Federation

livnet@list.ru

The polymeric materials are widely applied in many industries because they have a number of advantages, which allow their use instead of traditional materials. Nevertheless, the issues of manufacturing products from polymeric materials and their applications are insufficiently studied. The same can be said about high-frequency (HF) electrothermics of polymers. Therefore, mathematical simulation of electrothermic processes is of interest both in terms of science and in terms of applications.

Traditionally, the technological scheme with one insulator made of cardboard is used to implement the HF heating processes for welding of polymers without analyzing their insulating properties. For welding of polymer parts with various thickness it is interesting to consider the scheme with two heat insulators in the form of five-layer plate, including electrodes, insulators, and processed material. As a result of the conducted research activities the article presents a mathematical model in the form of a system of differential equations of unsteady heat conductivity taking into account internal sources of heat with appropriate boundary conditions, and software to implement it.

The software that implements a mathematical model enables to study the mutual influence between the geometrical and electro-physical parameters of technological system of HF heating of the thermoplastics. From the calculations presented in numerical and graphic form the following areas of heating polymer are identified: uniform heating, regional zones of thermal influence of insulators.

The article presents the research results of influence of heat insulators with different thickness on the distribution of thermoplastics temperature field. It is determined that the zone of maximum value of heating polymer can be displaced by modifying the parameters of insulating layers, thereby improving the welding quality of polymeric items.

According to research results, we can conclude that there is a demand for creating a technological process for electro-thermic welding of polymers with a possibility to displace a zone of

maximum heating (melting) polymer owing to changing heat insulation thickness. The developed software allows a new approach to the study of HF-heating modes, the solution of practical tasks to improve the welded joints quality of parts made from thermoplastics.

Publications with keywords: [electroheat](#), [frequency heating](#), [the system of non-stationary thermal conductivity](#), [electro-thermic welding](#), [mathematical modeling of high-frequency heating](#)

Publications with words: [electroheat](#), [frequency heating](#), [the system of non-stationary thermal conductivity](#), [electro-thermic welding](#), [mathematical modeling of high-frequency heating](#)

References

1. Filippenko N.G., Livshits A.V., Kargapol'tsev S.K. *Kontrol' i upravlenie vysokochastotnoy elektrotermiey. Nove aspeky* [Control and management of high-frequency electroheating. New aspects]. LAP Academic Publishing, Saarbrucken, Deutschland, 2013. 157 p. (in Russian).
2. Popov S.I., Larchenko A.G., Livshits A.V., Filippenko N.G. [Investigation of electrothermal installations operating condenser dielectric components influence on polymeric materials high-frequency processing]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie - Modern technologies. System analysis. Modeling*, 2013, no. 3 (39), pp. 270-275. (in Russian).
3. Popov S.I., Livshits A.V., Filippenko N.G. [Recovery of axle bearings for rolling stock]. *Sbornik nauchnykh trudov SWorld. Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Nauchnye issledovaniya i ikh prakticheskoe primenenie. Sovremennoe sostoyanie i puti razvitiya 2012"* [Proc. of the SWorld. International scientific-practical conference "Scientific research and their practical application. Modern state and ways of development'2012], 2-12 October 2012, Vol. 2, no. 3. Odessa, KUPRIENKO Publ., 2012, pp. 39-43. (in Russian).
4. Dumchev I.S., Larchenko A.G., Popov S.I., Livshits A.V., Filippenko N.G. [Recovery of polyamide cages of axle bearings for rolling stock of JSC "Russian Railways"]. *Molodoy uchenyy*, 2012, no. 12 (47), pp. 48-51. (in Russian).
5. Markov A.V., Grachev S.Yu. [Mathematical model of high-frequency welding of thermoplastics]. *19 mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya "Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyakh" (MMTT-19): tr.* [Proc. of the 19 International Scientific Conference "Mathematical Methods in Engineering and Technology" (MMTT-19)]. Vol. 5. Sec. 5. Voronezh, VSTA Publ., 2006, pp. 87-89. (in Russian).

6. Kuznetsov G.V., Sheremet M.A. *Raznostnye metody resheniya zadach teploprovodnosti* [Difference methods for solving heat conduction problems]. Tomsk, TPU Publ., 2007. 172 p. (in Russian).
7. Livshits A. V., Filippenko N.G. *Raschet nagreva elementov tekhnologicheskoy sistemy pri vysokochastotnoy termicheskoy obrabotke* [Calculation of heating of elements of technological systems during high-frequency thermal treatment]. Certificate of state registration of computer program, no. 2013617957 RF, 2013. (in Russian).
8. Livshits A. V., Filippenko N.G. *Programmnyy modul' formirovaniya tekhnologicheskoy dokumentatsii na osnove graficheskoy informatsii* [Software module of formation of the technological documentation based on graphical information]. Certificate of state registration of computer program, no. 2013619699 RF, 2013. (in Russian).
9. Popov S.I. *Avtomatizatsiya upravleniya tekhnologicheskimi protsessami vosstanovleniya ekspluatatsionnykh svoystv polimerov. Avtoref. diss.* [Automation of control of technological processes of restoration of operational properties of polymers. Abstract of cand. diss.]. Irkutsk, IrGUPS, 18 p. (in Russian).