



Способ повышения точности обработки путем двухфазного охлаждения шпиндельного узла металлорежущего станка



Д.Ю. Дубров

*к.т.н.,
ООО «ДИАПАЗОН 1»;
г. Ростов-на-Дону*



Ю.С. Дубров

*к.т.н.,
ООО «ДИАПАЗОН 1»;
г. Ростов-на-Дону*

e-mail: dus137@mail.ru



Д.А. Сыромятников

*магистр Донского
государственного
технического
университета;
г. Ростов-на-Дону*

Аннотация. Рассмотрена конструкция экспериментального шпиндельного узла (ЭШУ), оснащенного тепловыми трубами и камерой с легкоплавким веществом, в которой осуществляется автономное охлаждение подшипников за счет фазовых переходов первого рода – испарения и плавления в шпиндельном узле (ШУ), разработанным и изготовленным авторами. Проведенные экспериментальные исследования работоспособности предложенной конструкции подтверждают снижение температуры в зоне нагрева подшипников и как следствие – уменьшение радиального биения шпинделя.

Ключевые слова: шпиндельный узел, температура, фазовые переходы, охлаждение, подшипники, тепловые трубы, легкоплавкие вещества, радиальное биение.

Точность изделий машиностроения, получаемых на металлорежущих станках, является важнейшей характеристикой их качества. Повышение точности изготовления деталей и сборки узлов увеличивает

значения показателей безотказности и долговечности механизмов и машин. По данным [1, 2], одним из наиболее ответственных узлов любого металлообрабатывающего станка является ШУ, всегда участвующий в движении формообразования и входящий в привод главного движения. Качество шпиндельного узла оказывает самое существенное влияние на точность, надежность, производительность всего станка. На его долю приходится от 50% до 80% погрешностей в общем балансе точности.

В качестве опор шпинделей станков применяются подшипники качения и скольжения. Так как от шпинделей требуется высокая точность, то подшипники качения, используемые в опорах шпинделей, должны быть высоких классов точности. Материалом подшипников долгое время была нержавеющая или хромистая сталь. Однако из-за высокой температуры в зоне контакта за счет трения в связи с повышением скоростей вращения были сконструированы гибридные подшипники, в которых стали изготавливать шарики (ролики) из керамики, что резко повысило их эксплуатационные характеристики. Дальнейшее повышение скоростей вращения заставило станкостроителей изготавливать полностью керамические подшипники, в которых не только тела вращения, но и наружные и внутренние кольца изготавливаются из керамики. Вместе с тем следует отметить, что в станкостроении подавляющее большинство подшипников изготавливаются из стали.

Как показывают многочисленные статистические данные, более 70% мирового рынка подшип-

ников делят 8 ведущих международных производственных групп, включая SKF из Швеции, Schaeffler из Германии, Timken из США, NSK, NTN, NACHI, Minebea из Японии, которые монополизировали наиболее высокотехнологичный сегмент. По данным [1], на долю России приходится всего лишь 6% мирового подшипникового рынка (рис. 1).

Основным направлением повышения конкурентоспособности современных станков является обеспечение высокой выходной точности. Практика отечественного и зарубежного станкостроения показывает, что важнейшим путем достижения высокой точности станков является уменьшение тепловых погрешностей станка. Это достигается воздействием на его температурное поле различными методами. Так, увеличение температуры узла на каждые 15 °С вдвое снижает ресурс смазки и приводит к тому, что в целом подшипниковый узел быстрее выходит из строя [2]. В связи с этим для диагностики состояния конструкции станка все шире применяются методы термодинамики. Диагностическим признаком является температура конструкции как термодинамический показатель состояния системы [3]. Температура конструкции несет информацию о параметрах функционирования станка, например опор шпинделя.

Для современных станков характерен существенный рост скоростей резания, что повышает тепловую нагруженность ШУ станка. В связи с этим наиболее уязвимым в конструкции ШУ является подшипник. Применение вместо металлических гибридных подшипников позволило повысить их температурную устойчивость в 5 раз. Однако их высокая стоимость оставляет актуальной проблему повышения долговечности металлических подшипников, которые в основном используются в современном станкостроении.

На практике в настоящее время уменьшение вредного влияния температурных деформаций в высокоавтоматизированных станках может быть достигнуто путем интенсивного отвода теплоты

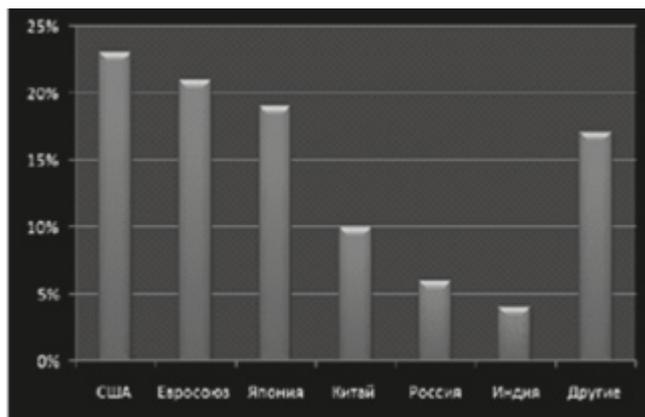


Рис. 1. Мировой подшипниковый рынок

при помощи жидкостной системы охлаждения. Ее конструкция представляет собой специальную «рубашку» (полости внутри корпуса шпинделя для прохождения жидкости), куда под давлением подается теплоноситель. Базовой охлаждающей жидкостью является вода, однако для предотвращения коррозии может использоваться тосол или иные смеси. Водяное охлаждение в последнее время широко применяется и в электрошпинделях.

Применение различных методов охлаждения ШУ ограничивается перепадом температур между верхним кольцом подшипника и корпусом, обусловленное ухудшением условий работы опоры и возможностью заклинивания из-за перегрева. Известны устройства для отвода тепла, в которых в качестве элементов, отводящих тепло, используют тепловые трубы. Использовать тепловые трубы предложил В.Н. Юрин. Это позволяет автоматически управлять процессом изменения температуры и тепловых деформаций узлов станка при обработке деталей, а также упростить станок [4].

Тепловые трубы смонтированы на элементах конструкции станка или выполнены по их форме, например, обхватывают станину стойки. Тепловые трубы элементов, являющихся источниками тепла, связаны с регулируемой охлаждающей установкой. Однако эти методы достаточно сложны и дороги и не всегда могут быть использованы на практике. Для поиска более простого и надежного метода стабилизации температуры в шпиндельном узле нами по методике А.Н. Резникова была рассчитана температура в подшипнике качения (подшипник шариковый радиальный однорядный 209: диаметр беговой дорожки наружного кольца $d_n = 85$ мм, внутреннего $d_p = 45$ мм, ширина подшипника $L = 19$ мм, число шариков $Z = 9$) [5]. Потери на трение в подшипнике при некотором режиме его эксплуатации и непрерывной работе в течение 30 мин характеризуются мощностью $W = 50$ Вт. Подшипник изготовлен из стали ШХ15.

Результаты расчета представлены в табл. 1.

Опыт охлаждения с помощью фазовых переходов первого рода в других технических областях позволяет сделать вывод о возможности применения таких подходов к температурной стабилизации шпиндельных узлов металлорежущих станков [6, 7]. Для стабилизации этой температуры нами предлагается направить теплоту, образующуюся от трения подшипников ШУ, используя зону транспорта тепловой трубы, в контейнер, заполненный легкоплавким веществом, температура плавления которого должна быть меньше допустимой температуры нагрева ШУ.

В дальнейшем авторами выполнен расчет количества легкоплавкого вещества, необходимого для

Расчет температуры подшипника качения

№ п/п	Формула	Расчет
1	$L_p \approx cFo^m$, где $F = \frac{w\tau}{d^2}$, где $F = (w\tau)/d^2$, где d – диаметр вала При $10 \leq Fo \leq 100$, $c = 2,33m \approx 0,5$ $0,1 \leq Fo \leq 10$, $c = 3,7m \approx 0,3$	$Fo = 38,2$ $L_p = 14,4$
2	$w = 0,065 \cdot 10^4 \text{ м}^2/\text{с}$	
3	$M1 = \frac{d_n L_p}{d_p z}$	$M1 = 10,7$
4	$M2 = \frac{d_n L_p}{d_p z}$	$M2 = 5,7$
5	$L = \frac{\theta_n - \theta_b}{\theta_1 - \theta_2} = \ln(L - \varepsilon) $ $l_b \approx cFo^m$ $\varepsilon = \Delta/r_n$	$\varepsilon = \Delta/r_n = 17,5/50 = 0,35$ $\Delta = (100-65)/2 = 17,5$ $L = 1,61$ $l_b \approx cFo^m = 3,7 \cdot 2 \cdot 2,769^{0,3} = 5,02$
6	$Fo^m = wm/d^2$ $q = \frac{W}{\pi L(d_n + d_b)}$ $qL_n - (L_n + M_1)q_1 - M_2q_2 = 0$ $qL_b - (L_b + M_2)q_2 - M_1q_1 = 0$ $\theta = \frac{2(q - q_1)\sqrt{w\tau}}{\lambda\sqrt{\pi}} L_n$	$Fo^m = wm/d^2 = 2,769$ $q = 6,808 \text{ Вт/м}^2$ $\{6808 \cdot 1,61 - (1,61 + 10,7)q_1 - 5,7q_2 = 0\}$ $\{6808 \cdot 5,02 - (5,02 + 5,3)q_2 - 10,7q_1 = 0\}$ $q_1 = 742 \text{ Вт}$ $q_2 = 3192 \text{ Вт}/\theta = 27 \text{ }^\circ\text{C}$ Полная температура нагрева подшипника составляет $47 \text{ }^\circ\text{C}$

стабилизации температуры во время работы станка [8].

Использование процессов плавления, сопровождающихся эндотермическими эффектами (тепловая энергия поглощается на границе раздела твердой и жидкой фаз), позволяет рассматривать предлагаемую систему охлаждения как экономичную и весьма надежную. При этом основной проблемой является поддержание обратимости процесса, т.е. необходимость содержать рабочее вещество в как можно более продолжительном по времени состоянии фазового перехода.

Стабилизация температуры основана на отводе тепла за счет поглощения скрытой теплоты плавления рабочего вещества с температурой плавления ниже допустимой температуры нагрева подшипников, расположенных внутри специально сконструированного и изготовленного контейнера.

За время работы станка τ в подшипнике ЭШУ выделится количество теплоты Q_1 , равное:

$$Q_1 = W\tau, \tag{1}$$

где W – мощность, Вт; τ – время работы станка, с.

С другой стороны, в контейнере с легкоплавким веществом вследствие теплопередачи произойдет нагрев легкоплавкого вещества в твердой фазе до температуры плавления. Вещество полностью расплавится до жидкого состояния и затем также произойдет его нагревание до допустимой температуры. В нашем случае для станков класса точности H – это температура, равная $70 \text{ }^\circ\text{C}$:

$$Q_2 = mC_m(T_{пл} - T_{ср}) + mr + mC_{ж}(T_{доп} - T_{пл}), \tag{2}$$

где m – масса плавящегося вещества; C_m – удельная теплоемкость твердой фазы плавящегося вещества; $C_{ж}$ – удельная теплоемкость жидкой фазы плавящегося вещества; $T_{пл}$ – температура плавления; $T_{ср}$ – температура окружающей среды; $T_{доп}$ – допустимая температура нагрева ШУ; r – удельная теплота плавления.

Считаем, что $Q_1 = Q_2$,

$$W\tau = mC_m(T_{пл} - T_{ср}) + mr + mC_{ж}(T_{доп} - T_{пл}), \tag{3}$$

тогда объем камеры, заполненной легкоплавким веществом, можно найти из выражения:

$$V = \frac{W\tau}{\gamma \{mC_m(T_{пл} - T_{ср}) + mr + mC_{ж}(T_{доп} - T_{пл})\}}, \quad (4)$$

где γ – плотность легкоплавкого вещества.

Таким образом, авторы рекомендуют применять метод отвода тепла, в котором используется скрытая теплота плавления вещества. Применение данного метода основано на увеличении времени нестационарного теплового режима шпинделя путем использования контейнера, заполненного плавким хладагентом (рабочим веществом), фазовые превращения которого происходят при температурах ниже предельно допустимых для шпинделей станков. Снижение температуры достигается способностью легкоплавкого хладагента аккумулировать в процессе нагрева и фазового превращения (из твердой фазы в жидкую) значительное количество тепла, выделяемого трущимися подшипниками.

При фазовом переходе поглощается значительное количество тепла хладагентом, и температура нагрева подшипника стабилизируется за счет наступления динамического равновесия между выделением тепла и его потерями на плавление хладагента и путем передачи тепла в окружающую среду (рис. 2). В качестве легкоплавких веществ рекомендуется использовать парафин, воск, стеариновую кислоту и др.

В соответствии со схемой рис. 2 авторами изготовлен экспериментальный шпиндельный узел с комплексной системой охлаждения и в дальнейшем были проведены сравнительные экспериментальные исследования температуры нагрева подшипников и радиального биения шпинделя (рис. 3).

Для измерения температуры использован мультиметр модели DT838. Диапазон измеряемых температур от $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+1370\text{ }^{\circ}\text{C}$ с разрешением $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ и точностью $\pm 3\%$.

Термодатчики размещались в отверстиях крышек корпуса (передней и задней). Измерения производились каждые 5 минут и результаты заносились в таблицу.

Испытания проводились без нагрузки, частота вращения $n = 1350\text{ мин}^{-1}$.

Анализ полученных экспериментальных данных (рис. 4) показывает, что при непрерывной работе в течение 30 мин нагрев подшипника № 1 обычного шпиндельного узла составляет $57\text{ }^{\circ}\text{C}$, а подшипника № 2 – $48\text{ }^{\circ}\text{C}$ (кривая 1 и 2).

Для подшипников, работающих с двухфазной системой температурной стабилизации, за то же время она составляет соответственно $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $43\text{ }^{\circ}\text{C}$. При этом расчетное значение полной температуры нагрева составляет $47\text{ }^{\circ}\text{C}$ (табл. 1).

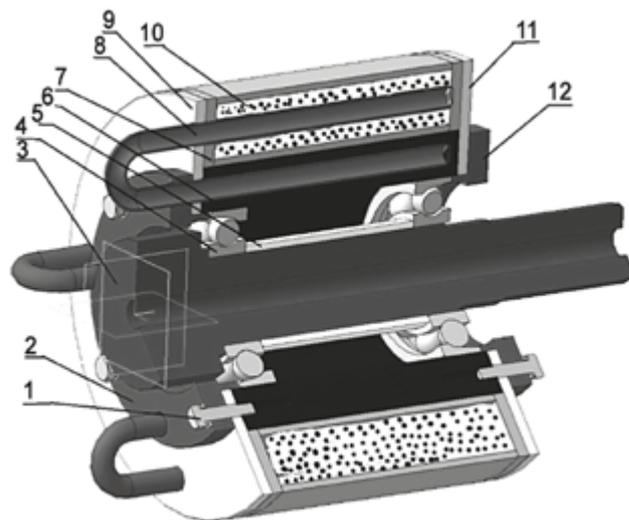


Рис. 2. Комплексная система охлаждения шпиндельного узла

1 – крепежные элементы; 2 – передняя крышка ШУ; 3 – вал; 4 – подшипники; 5 – нижняя втулка; 6 – корпус ШУ; 7 – контейнер с легкоплавким веществом; 8 – тепловая труба; 9 – крышка контейнера передняя; 10 – легкоплавкое вещество; 11 – крышка контейнера задняя; 12 – задняя крышка ШУ

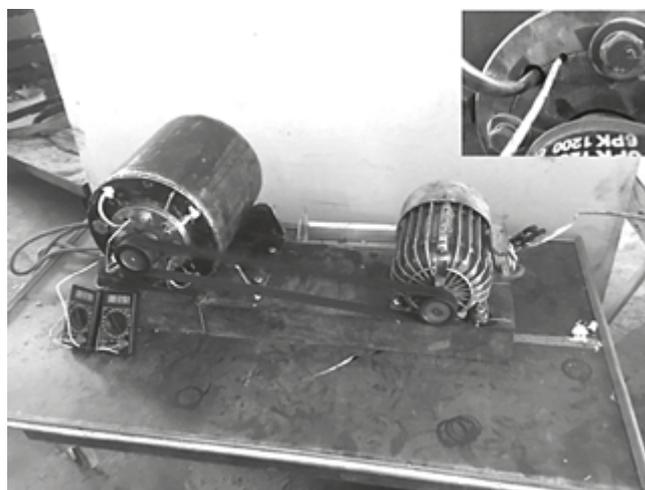


Рис. 3. Общий вид установки

Подшипники, работающие с предлагаемой системой охлаждения, проработали 330 мин с температурой, не превышающей $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ (кривые 3 и 4).

Для оценки температурных полей использовался тепловизор модели *Seek Thermal Compact XR*. Использование тепловизора позволяет получить полную картину работы подшипникового узла, оценить температурные поля всего механизма и сохранить изображение (рис. 5).

В дальнейшем были проведены исследования влияния температуры нагрева корпуса шпиндельного узла на радиальное биение, которое зависит от радиального смещения оси шпинделя, определяемого термоструктурными деформациями. Исследо-

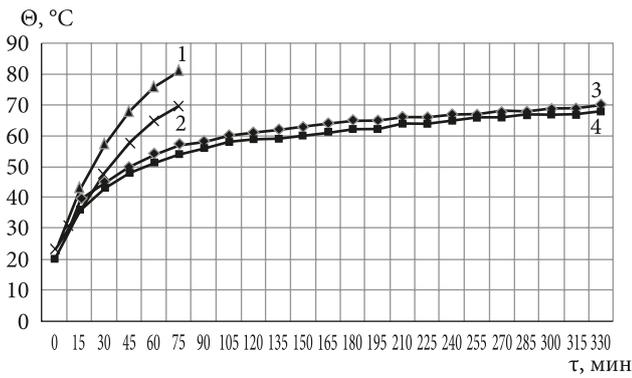


Рис. 4. Зависимость температуры нагрева корпуса ЭШУ от времени работы:
 1 – подшипник № 1 (без системы термостабилизации);
 2 – подшипник № 2 (без системы термостабилизации);
 3 – подшипник № 1 (с системой термостабилизации);
 4 – подшипник № 2 (с системой термостабилизации)

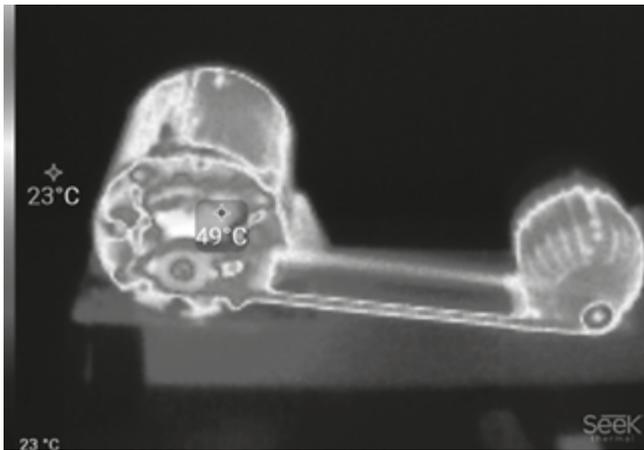


Рис. 5. Температурное поле ЭШУ с контейнером и ТТ (τ=60 мин.)

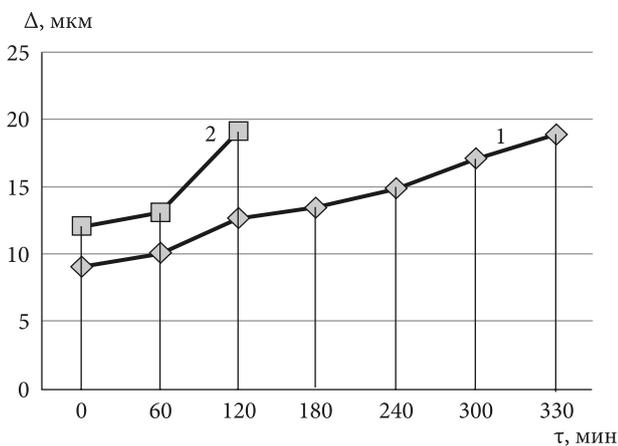


Рис. 6. Сравнение результатов измерения радиального биения
 1 – радиальное биение установки без комплексной системы охлаждения; 2 – радиальное биение установки с комплексной системой охлаждения

вания проводились согласно методике испытания станков (ГОСТ Р ИСО 230-1-2010). Применялась измерительная рычажно-зубчатая головка ИИГМ с ценой деления 0,001 мм.

Результаты, показанные на рис. 6, говорят о существенном влиянии двухфазного охлаждения корпусов подшипников на радиальное биение шпиндельного узла.

Следует отметить, что при использовании ШУ с керамическими и гибридными подшипниками, работающими при 70...100 тысячах оборотов, можно говорить о возможности стабилизации температуры путем применения системы охлаждения предлагаемого типа.

Выводы

1. В представленной работе рассмотрена задача стабилизации температуры в шпиндельных узлах принципиально новым способом охлаждения за счет фазопереходных процессов.

2. Спроектирован и изготовлен экспериментальный шпиндельный узел с двухфазной стабилизацией температуры (затраты теплоты за счет перехода жидкости в пар в тепловых трубах и латентная энергия плавления легкоплавкого вещества в контейнере) с объемом камеры с легкоплавким веществом $V = 0,073 \text{ м}^3$.

3. Использование способа двухфазного охлаждения шпиндельного узла дает возможность стабилизировать температуру нагрева подшипников (температура подшипников через 330 мин работы составила 69 °С, работа обычного подшипника составила 83 °С за 75 мин), а также повысить точность обработки деталей на металлорежущих станках за счет снижения радиального биения шпинделя.

4. Предлагаемый способ охлаждения позволяет говорить о возможности стабилизации температуры шпиндельных узлов, оснащенных высокоскоростными керамическими и гибридными подшипниками.

Литература

1. http://prompk.ru/ntn-snr/index_indust_rus.htm.
2. <http://proton-spp.ru/temperatura-podshipnika.html>.
3. Бэр Г.Д. Техническая термодинамика. – М.: Мир, 1977. – 518 с.
4. Юрин В.Н. Шпиндельные узлы с тепловыми трубами // Станки и инструмент. – 1981. – № 4. – С. 16–18.
5. Резников А.Н., Резников Л.А. Тепловые процессы в технологических системах – М.: Машиностроение, 1990. – 288 с.

6. Алексеев В.А. Охлаждение радиоэлектронной аппаратуры с использованием плавящихся веществ / В.А. Алексеев. – М.: Энергия, 1975. – 88 с.

7. Алексеев В.А., Карабин А.Е. Новый тип тепловых аккумуляторов для охлаждения радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов [Электронный ресурс]. – Труды МАИ. – 2011. – Вып. 49. – Режим доступа: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=28050>, свободный. – Загл. с экрана. – № гос.рег. ФС77-58560. – 23.04.2015

8. Дубров Д.Ю., Дубров Ю.С., Сыромятников Д.А. О возможности стабилизации температуры шпиндельного узла металлорежущего станка //Интернет-журнал НАУКОВЕДЕНИЕ – Том 9. – № 6 – 2017. <https://naukovedenie.ru/PDF/155TVN617.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз.рус., англ.

Processing Accuracy Increasing with the Help of the Cutting Machine Spindle Unit Two-Phase Cooling

D.Yu. Dubrov, candidate of technical sciences, LLC «Diapazone-1», Rostov-on-Don

Yu.S. Dubrov, candidate of technical sciences, LLC «Diapazone-1», Rostov-on-Don

e-mail: dus137@mail.ru

D. A. Siromyatnikov, master of Donskoy state technical university; Rostov-on-Don

Summary. The design of the experimental spindle unit (ESU) equipped with heat pipes and a chamber with a fusible substance, in which the bearings are cooled autonomously due to the first kind phase transitions – evaporation and melting in the spindle unit (SU), developed and manufactured by the authors. The experimental studies of the proposed design confirm the temperature decreasing in the zone of bearings heating and as a result the spindle radial run decreasing.

Keywords: spindle unit, temperature, phase transitions, cooling, bearings, heat pipes, fusible substances, radial run-out.

References:

1. http://prompk.ru/ntn-snr/index_indust_rus.htm
2. <http://proton-spp.ru/temperatura-podshipnika.html>
3. Ber G.D. Technical thermodynamics. Mir. Moscow, 1977. 518 p.
4. Yurin V.N. Spindle units with heat pipes. Machines and tools. 1981, – No. 4. pp. 16–18.
5. Reznikov A.N. Reznikov L. A Thermal processes in technological systems.: Machine Building Moscow, 1990. – 288 p.
6. Alekseev V.A. Cooling of radio-electronic equipment using melting substances / V. A. Alekseev. Mechanical engineering. Moscow, 1975. 88 p.
7. Alekseev V.A., Karabin A.E. A new type of thermal accumulators for cooling radio-electronic equipment of spacecraft. Mai's work 2011, Issue.49. Available at: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=28050> (accessed 23 of April 2015).
8. Dubrov D.Yu., Dubrov Yu.S., Syromyatnikov D.A. On the issue of the cutting machine spindle unit temperature stabilization. Internet magazine «science-CONDUCTING». 2017, Volume 9, No. 6 <https://naukovedenie.ru/PDF/155TVN617.pdf> (access is free).