

УДК 621.3

Исследование теплофизических процессов в системе краткосрочного хранения и транспортировки биологических материалов

*Д-р техн. наук Т. А. ИСМАИЛОВ¹, канд. техн. наук О. В. ЕВДУЛОВ²,
канд. техн. наук М. А. ХАЗАМОВА, И. Ш. МИСПАХОВ³*
¹kafedra.toe@mail.ru, ²ole-ole-ole@rambler.ru, ³igram.mispahov@mail.ru
Дагестанский государственный технический университет
367015, г. Махачкала, проспект Имама Шамиля, 70

В статье представлены результаты исследования теплофизических процессов в термоэлектрической системе для краткосрочного хранения и транспортировки биологических материалов. Приведены тепловая и математическая модель системы. Математическое описание теплофизических процессов в приборе построено на основе системы двумерных нестационарных уравнений теплопроводности со сложными граничными условиями. Расчет проводился в соответствии с требуемыми режимами краткосрочного хранения биологического материала: температурный уровень — от -10 до -40 °С, предельная продолжительность хранения — до суток, возможность быстрого нагрева биологического объекта перед началом работы с ним. Результаты исследований представлены в виде двумерного температурного поля системы и находящегося в ней биологического материала, а также одномерных графиков зависимости изменения температуры в различных точках прибора во времени при различных величинах холодопроизводительности термоэлектрической батареи.

Ключевые слова: биологический материал, субстанция, термоэлектрическая батарея, математическая модель, контейнеры.

Thermal processes in short-term storage and transportation of biological materials

*D. Sc. T. A. ISMAILOV¹, Ph. D. O. V. EVDULOV²,
Ph. D. M. A. HAZAMOVA, I. Sh. MISPAHOV³*
*¹kafedra.toe@mail.ru, ²ole-ole-ole@rambler.ru,
³igram.mispahov@mail.ru*
Dagestan state technical university
367015, Russia, Mahachkala, pr. I. Shamilja, 70

The results of the study of thermal processes in the thermoelectric system for short-term storage and transportation of biological materials are given. The heat and the mathematical model of the system are given. The mathematical description of thermal processes in a device is based on a system of two-dimensional unsteady heat conduction equations with complex boundary conditions. The calculations have been made according to the required modes of biological material short-term storage: temperature range is from -10 to -40 oC, maximum storage time is up to 24 hours; one should be able to warm up the biological material quickly if necessary. Results are presented as a two-dimensional temperature distribution systems with biological material as well as one-dimensional diagrams of temperature changes at different points of the device in time at various values of thermoelectric cooling battery refrigerating capacity.

Keywords: biological material, compounds, thermoelectric battery, mathematical model, container.

Длительное сохранение жизнеспособности биоматериалов (органов, тканей, крови и т. д.) в настоящее время возможно только при низких температурах. В больших хранилищах биоматериалов применяется оборудование, использующее холод жидкого азота [1, 2]. Это позволяет обеспечивать стабильный уровень температур хранения биоматериалов, а материальные затраты на обслуживание таких установок связаны только с необходимостью регулярного пополнения запасов жидкого азота. В случае небольших хранилищ использование азотного оборудования становится менее выгодным. В основном это связано с тем, что при замораживании и хранении небольших количеств биоматериала, используемые азотные установки имеют небольшие размеры (сосуды Дьюара 2÷40 литров) [3]. Для пополнения уровня азота в данной установке требуется дополнительная система большого хранилища азота или регулярное приобретение небольших объемов жидкого азота у его производителей.

Для решения задачи хранения биоматериалов в небольших лабораториях, медицинских учреждениях, в местах, удаленных от производителей азота, применяются автономные рефрижераторы [4]. В основном, это установки, работающие по смешевому циклу Клименко или двух-трех каскадные фреоновые установки. Одним из существенных недостатков установок, работающих по циклу Клименко, является наличие полугерметичного компрессора, что приводит к утечкам рабочей смеси и потребности в ее периодической перезаправке сервисной организацией. Недостатком каскадных фреоновых установок является наличие двух или трех компрессоров, что уменьшает надежность таких систем. При этом оба типа фреоновых установок требуют высоких эксплуата-

ционных затрат и имеют высокую удельную стоимость на единицу хранящегося биоматериала.

Рассмотренные системы для хранения биологических материалов, как было отмечено выше, имеют ограничения по продолжительности работы, так как требуют пополнение объема используемого в них жидкого азота. Кроме этого, в рассмотренных случаях невозможна одновременная перевозка в одной системе биологических субстанций, имеющих различные температуры хранения. Указанные ограничения можно снять путем использования в аппаратах для хранения биологических материалов термоэлектрических батарей (ТЭБ) [5–7], которые могут обеспечить требуемый температурный режим объектов при их перевозке, характеризуются высоким ресурсом работы, экологичностью, возможностью регулировки температуры в объеме. Однако существующие конструкции термоэлектрических устройств такого рода не могут обеспечить одновременное хранение и перевозку нескольких типов биологических субстанций, имеющих различные температуры хранения.

В данных условиях актуальным является разработка системы, позволяющей устранить указанные недостатки существующих аппаратов для хранения и перевозки биологических материалов. В качестве таковой предлагается рассмотреть систему, принципиальная схема которой показана на рис. 1 [8]. В указанной системе исполнительными элементами являются ТЭБ 1, охлаждающие контейнеры 2 с помещенными в них биологическими материалами 3. Причем для отдельно взятого контейнера с биологической субстанцией определенного вида применяется ТЭБ, обеспечивающая температурный режим хранения именно этого объекта. Ввиду того, что температурный уровень, при котором происходит краткосрочное хранение большинства биологических материалов, лежит в пределах $-10 \div -40$ °С, в системе предполагается применение ТЭБ каскадного исполнения. Отвод теплоты от ТЭБ осуществляется посредством системы теплоотвода 4, выполняемой воздушной, жидкостной, а также с использованием различного рода тепловых аккумуляторов. Для устранения теплопритоков из окружающей среды применяется теплоизоляция 5.

Представляет интерес исследование работы данной системы, а также анализ теплофизических процессов, происходящих в ней. Ввиду того, что в настоящее время существуют стандартные методики расчета ТЭБ, ограничимся исследованием влияния на теплофизические параметры системы только значений холодопроизводительности батареи.

В соответствии с конструкцией системы для хранения и перевозки биологического материала ее тепловая схема может быть представлена в виде, изображенном на рис. 2, где в общем случае каждый i -ый ($i = 1, 2, \dots, n$) биологический материал $БМ_i$ 1 в соответствующей упаковке 2 помещен в камеру 3, заполненную высокотеплопроводным материалом 4. С дном каждой i -ой камеры приведена в хороший тепловой контакт ТЭБ, имеющая холодопроизводительность $q_{ТЭБ}$. В зависимости от температурного режима в камере ТЭБ могут иметь каскадное исполнение.

Согласно представленной схеме, при составлении математической модели задачи, может быть рассмотрен только один фрагмент системы, включающий в себя биологический материал, его упаковку, высокотеплопроводный материал, камеру характеризующуюся наличием на нижней поверхности теплового потока от ТЭБ, отвод теплоты с которой осуществляется за счет принудительного воздушного охлаждения. Исследование системы при хранении нескольких биологических материалов может быть осуществлено по той же модели с учетом применения геометрических параметров и значения $q_{ТЭБ}$. В соответствии с изложенным, может быть рассмотрена упрощенная модель системы, включающая в себя только один фрагмент тепловой схемы, изображенный на рис. 2. При этом предполагается, что передача теплоты в системе осуществляется только за счет теплопроводности.

Математическая формулировка задачи расчета температурного поля данной системы имеет следующий вид [9]:

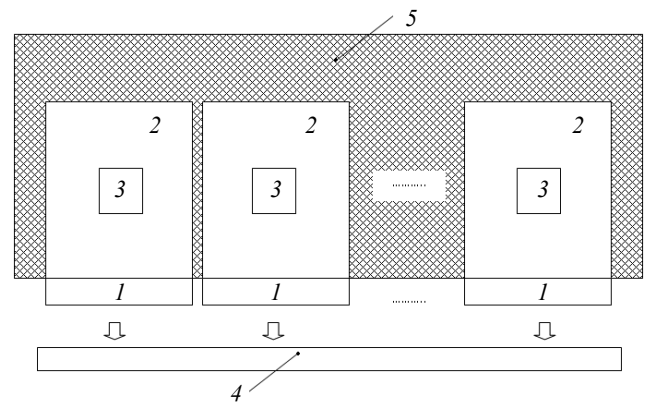


Рис. 1. Принципиальная схема термоэлектрической системы для краткосрочного хранения и перевозки биологических субстанций

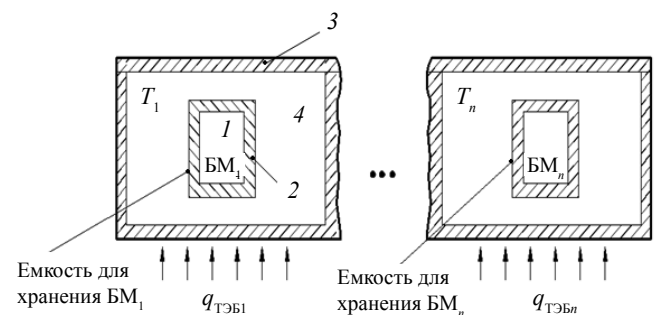


Рис. 2. Тепловая схема системы для хранения и перевозки биологического материала

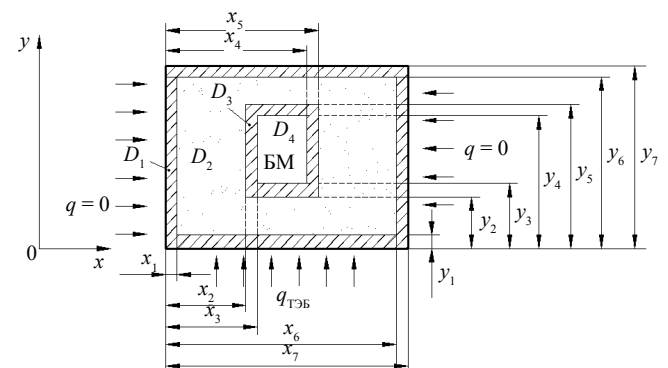


Рис. 3. Расчетная схема системы для хранения и перевозки биологического материала

$$\left. \begin{aligned} a_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + a_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} &= \frac{\partial T_1}{\partial \tau}, \text{ при } x, y \in D_1; \\ a_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + a_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial y^2} &= \frac{\partial T_2}{\partial \tau}, \text{ при } x, y \in D_2; \\ a_3 \frac{\partial^2 T_3}{\partial x^2} + a_3 \frac{\partial^2 T_3}{\partial y^2} &= \frac{\partial T_3}{\partial \tau}, \text{ при } x, y \in D_3; \\ a_4 \frac{\partial^2 T_4}{\partial x^2} + a_4 \frac{\partial^2 T_4}{\partial y^2} &= \frac{\partial T_4}{\partial \tau}, \text{ при } x, y \in D_4. \end{aligned} \right\} (1)$$

Краевые условия:

$$T_1 = T_2 = T_3 = T_4 = T_{\text{ср}}, \text{ при } \tau = 0$$

$$\left. \begin{aligned} \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} &= 0, \text{ при } x = 0; 0 < y < y_7; \\ \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} &= 0, \text{ при } x = x_7; 0 < y < y_7; \\ \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} &= \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x}, \text{ при } x = x_1; y_1 < y < y_6; \\ \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} &= \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x}, \text{ при } x = x_2; y_2 < y < y_5; \\ \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} &= \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial x}, \text{ при } x = x_3; y_3 < y < y_4; \\ \lambda_4 \frac{\partial T_3}{\partial x} &= \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x}, \text{ при } x = x_4; y_3 < y < y_4; \\ \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} &= \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x}, \text{ при } x = x_5; y_2 < y < y_5; \\ \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} &= \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x}, \text{ при } x = x_6; y_1 < y < y_6; \\ \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} &= q_{\text{ТЭБ}}, \text{ при } y = 0; 0 < x < x_7; \\ \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} &= \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y}, \text{ при } y = y_1; x_1 < x < x_6; \\ \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} &= \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial y}, \text{ при } y = y_2; x_2 < x < x_5; \\ \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial y} &= \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial y}, \text{ при } y = y_3; x_3 < x < x_4; \\ \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial y} &= \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial y}, \text{ при } y = y_4; x_3 < x < x_4; \\ \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial y} &= \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y}, \text{ при } y = y_5; x_2 < x < x_5; \\ \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} &= \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y}, \text{ при } y = y_6; x_1 < x < x_6; \\ \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} &= \alpha_{\text{ср}} (T_1 - T_{\text{ср}}), \text{ при } y = y_7; 0 < x < x_7 \end{aligned} \right\} (2)$$

где T_1, T_2, T_3, T_4 — температуры камеры, высокотеплопроводного материала, упаковки и биологического материала; a_1, a_2, a_3, a_4 — коэффициент температура про водности камеры, высокотеплопроводного материала, упаковки и биологического материала; $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ — коэффициент теплопроводности камеры, высокотеплопроводного материала, упаковки и биологического материала; $\alpha_{\text{ср}}$ — коэффициент теплообмена с окружающей средой; $T_{\text{ср}}$ — температура окружающей среды.

Двумерная формулировка задачи справедлива для случая полной тепловой изоляции боковой поверхности камеры, что в большинстве случаев соответствует практической реализации прибора.

Решение задачи (1) — (2) осуществлено численным методом конечных элементов. Расчет проводился в соответствии с требуемыми режимами краткосрочного хранения биологического материала: температурный уровень — от -10 до -40 °С, предельная продолжительность хранения — до суток, возможность быстрого нагрева биологического объекта перед началом работы с ним.

За исходные принимались следующие данные [10]: $\lambda_1 = 45,4$ Вт/(м·К); $\lambda_2 = 40$ Вт/(м·К); $\lambda_4 = 0,439$ Вт/(м·К); $C_1 = 480$ Дж/(кг·К); $C_2 = 700$ Дж/(кг·К), $C_4 = 3458$ Дж/(кг·К), $\rho_1 = 7850$ кг/м³, $\rho_2 = 2000$ кг/м³, $\rho_3 = 1041$ кг/м³, $T_{\text{ср}} = 295$ К. Наличием упаковок биологического материала, для упрощения расчетов, пренебрегали. Геометрические размеры фрагмента ТЭС, содержащего одну емкость с биологическим объектом, и наложенной конечно-элементной сеткой показаны на рис. 4. Размеры даны в сантиметрах.

Результаты расчетов приведены на рис. 5–7.

На рис. 5 представлено двумерное температурное поле фрагмента ТЭС в стационарном режиме при плот-

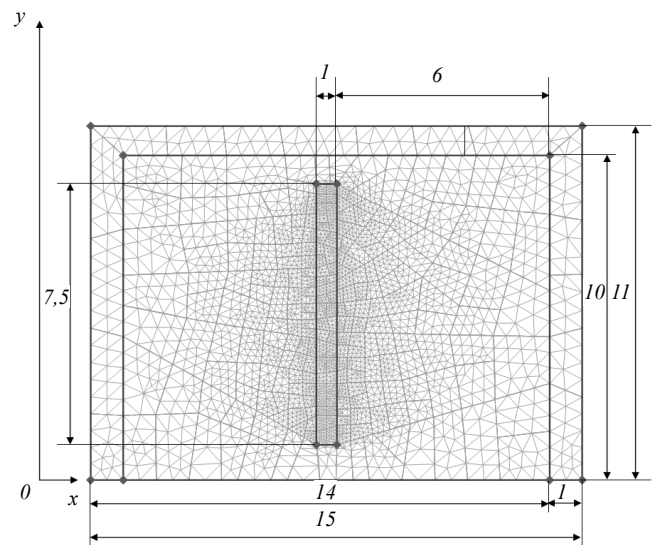


Рис. 4. Модель блока ТЭС с конечно-элементной сеткой и геометрическими размерами

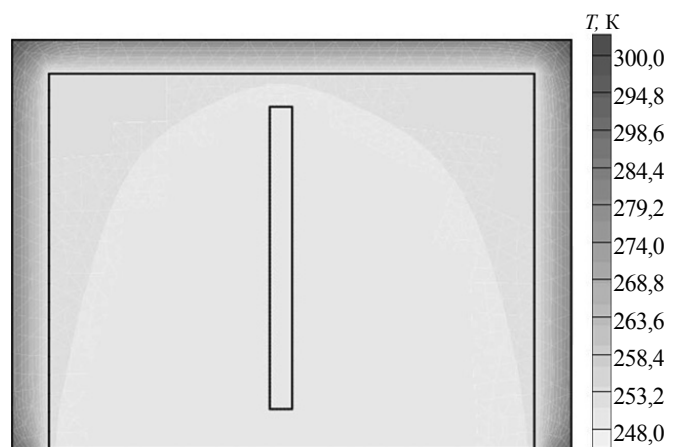


Рис. 5. Двумерное температурное поле фрагмента ТЭС в стационарном режиме при $q_{\text{ТЭБ}} = 3000$ Вт/м²

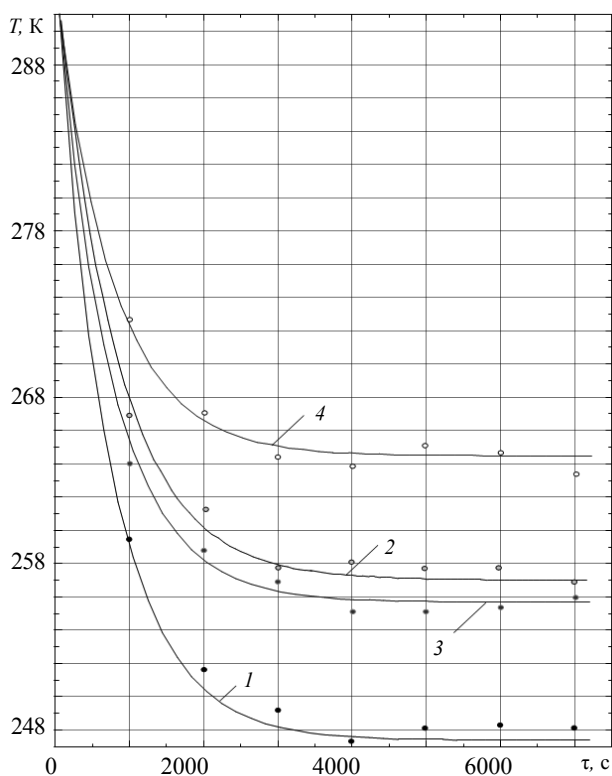


Рис. 6. Изменение температуры контрольных точек опытного образца ТЭС во времени при токе питания однокаскадной ТЭБ 5 А, двухкаскадной ТЭБ — 8 А; 1 — температура холодного спаев двухкаскадной ТЭБ; 2 — температура имитатора биологического материала, охлаждаемого двухкаскадной ТЭБ; 3 — температура холодного спаев однокаскадной ТЭБ; 4 — температура имитатора биологического материала, охлаждаемого однокаскадной ТЭБ

ности теплового потока ТЭБ $q_{ТЭБ} = 3000 \text{ Вт/м}^2$. Согласно представленным данным изменение температуры по стенке емкости незначительное (десять доли градуса), что связано с высоким коэффициентом теплопроводности материала и ее малой толщиной. Изменение температуры в теплопроводном наполнителе и биологическом материале носит вид, близкий к параболическому.

На рис. 6 приведены графики зависимости изменения во времени температуры контрольных точек систем (точками обозначены соответствующие результаты эксперимента). Согласно результатам расчета, продолжительность выхода прибора на стационарный режим работы лежит в пределах, сопоставимых с существующими аналогами. Для случая, соответствующего данным рис. 6, время, необходимое для стабилизации температуры биологической субстанции, составляет примерно 1,2 ч. Данное обстоятельство необходимо учитывать при использовании ТЭС на практике, то есть целесообразным является включение прибора до помещения в него биологического материала с целью вывода его на рабочий режим. При этом увеличение мощности ТЭБ вплоть до максимального значения, соответствующего оптимальной величине тока питания, понижает температуру всех точек системы прибор — биологический объект. Согласно данным рис. 7, при значениях $q_{ТЭБ} = 4000; 4350; 4500 \text{ Вт/м}^2$ температура биологического материала снижается соответственно до 250, 248, 244 К.

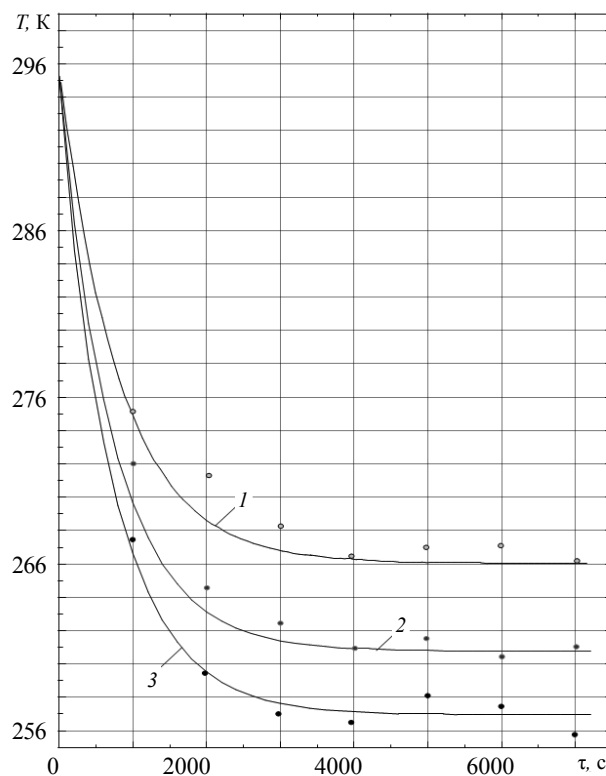


Рис. 7. Изменение температуры имитатора биологического материала во времени при различных значениях тока питания двухкаскадной ТЭБ; 1 — $q_{ТЭБ} = 4000 \text{ Вт/м}^2$, 2 — $q_{ТЭБ} = 4350 \text{ Вт/м}^2$; 3 — $q_{ТЭБ} = 4500 \text{ Вт/м}^2$

Дальнейшее увеличение силы тока вызывает превалирование теплоты Джоуля над теплотой Пельтье в ТЭ, увеличивающее температуру объекта воздействия. Таким образом, при фиксированной температуре горячих спаев ТЭБ предельное снижение температуры каждой точки устройства и биологического объекта ограничено величиной оптимального для данного типа ТЭБ тока питания. Получить более глубокое снижение температуры в системе можно, уменьшив температуру горячих спаев ТЭБ за счет использования специальных систем теплосъема.

Список литературы

1. Смолянинов А. Б., Кованько Г. Н., Багаутдинов Ш. М., Хурцилава О. Г. Криоконсервация и криохранилище стволовых клеток в банках пуповинной крови и костного мозга // Вестник Международной академии холода. 2009, № 2.
2. Иволгин Д. А., Смолянинов А. Б., Багаутдинов Ш. М., Коровина К. В., Шунькина К. В., Смирнова А. В. Современные способы криоконсервации стволовых клеток пуповинной крови для общественного регистра доноров // Вестник Международной академии холода, 2012, № 1.
3. Патент РФ на изобретение № 2159912. Автономная система азотного охлаждения для термостагирования и долгосрочного хранения продуктов // Кириллов Н. Г., БИ № 24 от 27.11.2000.
4. <http://ite.inst.cv.ua>.
5. <http://www.kryotherm.spb.ru>.

6. Малкович Б. Е.-Ш. Термоэлектрические модули на основе сплавов теллурида висмута // Доклады XI Межгосударственного семинара «Термоэлектрики и их применение», СПб: ФТИ РАН им. А. Ф. Иоффе, 2008.

7. Малкович Б. Е.-Ш. Термоэлектрические охлаждающие приборы в медицине // Доклады XI Межгосударственного семинара «Термоэлектрики и их применение» — СПб: ФТИ РАН им. А. Ф. Иоффе, 2000.

8. Патент РФ на изобретение №2416769. Термоэлектрический термостат для хранения и перевозки биоматериалов // Исмаилов Т. А., Миспахов И. Ш., Евдулов О. В., Юсуфов Ш. А., БИ №11 от 20.04.2011.

9. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967.

10. Ремизов А. Н., Максина А. Г., Потепенко А. Я. Медицинская и биологическая физика М.: Дрофа, 2004.

References

1. Smoljaninov A. B., Kovan'ko G. N., Bagautdinov Sh. M., Hurcilava O. G. Cryoconservation and cryopreservation of stem cells in banks of umbilical blood and bone marrow. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2009, No 2. (in Russian).

2. Ivolgin D. A., Smolyaninov A. B., Bagautdinov SH. M., Korovin C. V., Shunykina K. V., Smirnova A. V. Modern methods of cryopreservation stola-o cells popularnoj blood for public register of

donors. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2012. No 1. (in Russian).

3. Patent RF na izobretenie №2416769. The thermoelectric thermostat for storage and transportation of biomaterials // Ismailov T. A., Mispahov I. Sh., Evdulov O. V., Jusufov Sh. A., BI №11, 20.04.2011. (in Russian).

4. <http://ite.inst.cv.ua>.

5. <http://www.kryotherm.spb.ru>.

6. Malkovitch B. E-W. Thermoelectric modules based alloys of the bismuth telluride // Reports XI Interstate workshop «Thermoelectric-tricks and their application», St. Petersburg: PTI RAS them. A. F. Ioffe, 2008. (in Russian).

7. Malkovitch B. E-W. Thermoelectric cooling devices in medicine // the Reports XI Interstate workshop «Thermoelectrics and their application». — St. Petersburg: PTI RAS them. A. F. Ioffe, 2000. (in Russian).

8. Patent RF na izobretenie №2416769. Thermoelectric thermo stat for storage and transportation of biomaterials. // Ismailov T. A., Misakov IS, Avdulov O. V., Yusufov S. A., BI №11 from 20.04.2011. (in Russian).

9. Lykov A. V. Theory of heat conduction. — Moscow: High school, 1967. (in Russian).

10. Remizov A. N., Maxine A. G., Potapenko Y. A. Medical and biological technological physics. — Moscow: Drofa, 2004. (in Russian).

Требования к рукописям, представляемым в журнал «Вестник МАХ»

- В начале статьи, слева – УДК;
- после названия статьи – авторы с указанием места работы и контактной информации (e-mail);
- отдельно указываются ключевые слова на русском и английском (не более десяти);
- одновременно со статьей представляется аннотация (References) на русском и английском языках. Аннотация должна содержать от 100 до 250 слов (приблизительно 700 печатных знаков). Аннотация должна быть полноценной и информативной, не содержать общих слов, отражать содержание статьи и результаты исследований, строго следовать структуре статьи.
- статьи представляются набранными на компьютере в текстовом редакторе Word 97-2007 на одной стороне листа через 1,5 интервала, размер шрифта 14.
- объем статьи не более 12 страниц (формат А4, вертикальный, 210x297 мм; поля: левое - 2 см, правое - 2 см, верхнее - 2 см, нижнее - 2 см);
- иллюстрации представляются на магнитном носителе в следующем формате: растровые - TIFF-CMYK-300 dpi, TIFF-BM-800 dpi, векторные - EPS-CMYK4
- формулы и отдельные символы набираются с использованием редактора формул MathType (Microsoft Equation). (не вставлять формулы из пакетов MathCad и MathLab).
- в статьях необходимо использовать Международную систему единиц (СИ);
- Список использованных литературных источников должен быть оформлен по ГОСТу и содержать ссылки только на опубликованные работы. Номера ссылок в тексте должны идти строго по порядку их цитирования и заключаться в квадратные скобки. Количество пристатейных ссылок не менее 10-15

Статьи, оформленные с нарушением правил, редакцией не принимаются и возвращаются авторам без рассмотрения по существу. Автор гарантирует отсутствие плагиата и иных форм неправомерного заимствования результатов других произведений.

Данные об аффилировании авторов (author affiliation).

На отдельной странице и отдельным файлом: – сведения об авторах на русском и английском языках: фамилия, имя, отчество полностью, ученая степень, звания (звания в негосударственных академиях наук и почетные звания не указывать), должности основного места работы (учебы); наименование и почтовые адреса учреждений, в которых работают авторы, e-mail.

Статьи принимаются на магнитном носителе и в печатном экземпляре или высылаются на электронный адрес редакции vestnikmax@rambler.ru

С аспирантов и студентов плата за публикации не взимается