



УДК 536.242

## ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ ЛИТИЙ-ИОННОГО АККУМУЛЯТОРА В УСЛОВИЯХ ВЫСОКИХ ТОКОВЫХ НАГРУЗОК

А.С. Красношлыков, Г.В. Кузнецов

Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет, г. Томск, Россия  
krasnas@tpu.ru

**Резюме:** Проведен численный анализ процесса формирования температурных полей в результате выделения Джоулева тепла в сегменте типичной литий-ионной аккумуляторной батареи. Использовались программные пакеты ANSYS Electric и ANSYS Fluent. При математическом моделировании учитывались конвективный и кондуктивный механизмы теплопереноса и выделение тепловой энергии при прохождении электрического тока через материал пластин батареи. В результате численного моделирования установлены температуры электролита аккумулятора при прохождении токов, близких к предельно допустимым. Получены характерные распределения температур в исследуемой области. Выделен критический режим работы аккумулятора при нерегламентных токовых нагрузках.

**Ключевые слова:** литий-ионный аккумулятор, теплоперенос, Джоулево тепло, математическое моделирование, конвекция, теплопроводность.

**Благодарности:** Работа поддержана грантом Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации (Конкурс НШ-2016), № НШ-7538.2016.8.

## NUMERICAL ANALYSIS OF THE TEMPERATURE FIELDS OF THE LITHIUM-ION BATTERY UNDER CONDITIONS OF HIGH CURRENT LOADS

A.S. Krasnoshlykov, G.V. Kuznetsov

Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia  
krasnas@tpu.ru

**Abstract:** A numerical analysis of the formation of temperature fields as a result of the Joule heat release in a segment of a typical lithium-ion battery has been carried out. Software packages ANSYS Electric and ANSYS Fluent were used. At mathematical modeling of convective and conductive mechanisms of heat transfer and the release of thermal energy during the passage of electric current through the material of the plates of the battery were taken into account. As a result of the numerical simulation, the electrolyte temperatures of the accumulator are established when passing currents close to the maximum permissible. Temperature distributions in the investigated region have been obtained.

**Keywords:** Lithium-ion battery, heat transfer, Joule heat, mathematical modeling, convection, thermal conductivity.

**Acknowledgments:** *The reported research was supported by Russian Federation President Grant for state support of the Russian Federation leading scientific schools SS-7538.2016.8 (No.14.Y31.16.7538-SS).*

### **Введение**

Использование аккумуляторных батарей в качестве аварийных источников электроэнергии летательных аппаратов сопряжено с такими эксплуатационными требованиями, как запуск вспомогательной силовой установки, работа тормозной системы, функционирование систем управления и др. [1]. При этом происходит значительный рост тока нагрузки [1]. В результате увеличивается температура батареи и возможен эффект теплового разгона (увеличение температуры электролита, приводящее к росту зарядного тока, который впоследствии способен достичь значения, близкого к значению тока короткого замыкания) [2]. При этом происходит частичное или полное разрушение аккумуляторной батареи [2, 3].

Несколько аварийных ситуаций на самолетах компании *Boeing* в 2013 году [4, 5] подтверждают актуальность этой научно-технической проблемы.

Следует отметить, что при проектировании типичной литий-ионной аккумуляторной батареи необходимо учитывать как выделение тепла в результате электрохимических реакций, так и выделение теплоты при прохождении электрического тока через пластины, обусловленное омическим нагревом (Джоулево тепло) [3].

Большинство экспериментов с аккумуляторами сводится, по существу, к определению температуры поверхности последних при определенных условиях их использования и к оценке работоспособности конкретного варианта конструкции источника тепловыделения [6]. Следует отметить, что проведение экспериментальных исследований по этой проблеме также затруднено в связи с требованием герметичности исследуемого устройства и малой ( $7 \cdot 10^{-5}$  м) [7] толщины пластин и сепаратора. Для решения такого рода сложных задач наиболее целесообразным является применение методов математического моделирования процессов теплопереноса в материале твердых пластин и сепараторе аккумуляторной батареи, основанных на решении систем уравнений переноса массы, импульса и энергии [8–12] с учетом выделения Джоулева тепла.

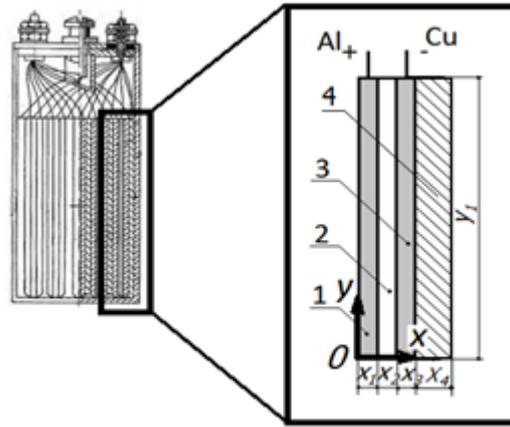
**Цель работы** – численное исследование распределений температур в аккумуляторе в условиях интенсивного тепловыделения, обусловленного высокими токовыми нагрузками.

### **Постановка задачи**

Рассматривается типичный сегмент литий-ионного аккумулятора, включающий медную и алюминиевую пластины, слой электролита между ними и твердую стенку исследуемого устройства. Область решения показана на рис.1. В связи с идентичностью каждой секции аккумулятора можно обоснованно ограничиться при постановке задачи рассмотрением одной секции, граничащей со стенкой корпуса (рис. 1, б).

В общем случае в рассматриваемой системе теплоперенос осуществляется за счет термогравитационной конвекции и теплопроводности. При малых толщинах слоев электролита процессами естественной конвекции можно пренебречь. Но для такого упрощения необходимы достаточные основания. Поэтому при постановке задачи учитывались процессы не только теплопроводности в электродах, электролите и стенке корпуса аккумулятора, но также и свободная конвекция в слое гексафторфосфата лития ( $\text{LiPF}_6$ ).

При постановке задачи не учитывалось возможное выделение тепла в результате экзотермических химических реакций электролита и материала электродов.



а) б)

Рис. 1. а) общий вид области решения; б) рассматриваемый сегмент аккумулятора. 1 – положительный электрод (алюминиевая пластина); 2 – жидкий электролит (LiPF<sub>6</sub>); 3 – отрицательный электрод (медная пластина); 4 – стенка аккумулятора (полипропилен)

Джоулево тепло вычислялось с использованием метода векторного потенциала [13]:

$$Q^j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [\rho] \{J_{ii}\} \cdot \{J_{ii}\},$$

где  $Q^j$  – мощность выделения тепла в единице объёма, Вт/м<sup>3</sup>;  $n$  – количество точек интегрирования;  $[\rho]$  – матрица сопротивления;  $\{J_{ii}\}$  – суммарная плотность тока в элементе при интеграции точки  $i$ .

Предполагалось, что тепловыделение в пластинах распределено равномерно по направлениям  $x$  и  $y$ .

Уравнения неразрывности, движения и энергии для слоя жидкого электролита:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \rho_2 u_2}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_2 u_2 u_2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_2 v_2 u_2)}{\partial y} = \\ & = \rho_2 g_x - \frac{\partial P_2}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_2 \frac{\partial u_2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_2 \frac{\partial u_2}{\partial y} \right); \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \rho_2 v_2}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_2 u_2 v_2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_2 v_2 v_2)}{\partial y} = \\ & = \frac{\partial P_2}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_2 \frac{\partial v_2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_2 \frac{\partial v_2}{\partial y} \right); \end{aligned} \quad (3)$$

$$\rho_2 C_{p2} \left( \frac{\partial T_2}{\partial t} + u_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} + v_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} \right) = \lambda_2 \left( \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial y^2} \right). \quad (4)$$

Уравнение теплопроводности для пластин и стенки аккумулятора:

$$\rho_1 C_{p1} \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \left( \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} \right); \quad (5)$$

$$\rho_3 C_{p3} \frac{\partial T_3}{\partial t} = \lambda_3 \left( \frac{\partial^2 T_3}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_3}{\partial y^2} \right); \quad (6)$$

$$\rho_4 C_{p4} \frac{\partial T_4}{\partial t} = \lambda_4 \left( \frac{\partial^2 T_4}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_4}{\partial y^2} \right). \quad (7)$$

где  $u, v$  – составляющие вектора скорости в проекции на оси  $x, y$ , соответственно;  $P$  – давление;  $T$  – температура;  $\rho$  – плотность;  $x, y$  – декартовы координаты;  $t$  – время;  $C_p$  – теплоемкость;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $\mu$  – динамическая вязкость; индексы 1, 2, 3, 4 – соответствуют алюминию, электролиту, меди и полипропилену.

Начальные условия для системы уравнений (1–7) заданы в виде:

$$u(x,y)=0; T(x,y)=T_0; P(x,y)=P_0.$$

Граничные условия для уравнений (1–7) имеют вид:

$$\begin{aligned} x = 0, 0 < y < y_1 \quad \frac{\partial T_1}{\partial x} &= 0; \\ x = x_1, 0 < y < y_1 \quad \begin{cases} T_1 = T_2 \\ \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \end{cases}, \begin{cases} u_2 = 0 \\ v_2 = 0 \end{cases}; \\ x = x_1 + x_2, 0 < y < y_1 \quad \begin{cases} T_2 = T_3 \\ \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} = \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} \end{cases}, \begin{cases} u_2 = 0 \\ v_2 = 0 \end{cases}; \\ x = x_1 + x_2 + x_3, 0 < y < y_1 \quad \begin{cases} T_3 = T_4 \\ \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} = \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial x} \end{cases}; \\ x = x_1 + x_2 + x_3 + x_4, 0 < y < y_1 \quad \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial x} = a(T_4 - T_{OC}); \\ y = 0, 0 < x < x_1 \quad \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} &= 0; \\ y = 0, x_1 < x < x_2 \quad \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} = 0, \begin{cases} u_2 = 0 \\ v_2 = 0 \end{cases}; \\ y = 0, x_2 < x < x_3 \quad \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial y} &= 0; \\ y = 0, x_3 < x < x_4 \quad \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial y} &= 0; \\ y = y_1, 0 < x < x_1 \quad \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} &= 0; \\ y = y_1, x_1 < x < x_2 \quad \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} = 0, \begin{cases} u_2 = 0 \\ v_2 = 0 \end{cases}; \\ y = y_1, x_2 < x < x_3 \quad \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial y} &= 0; \\ y = y_1, x_3 < x < x_4 \quad \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial y} &= 0. \end{aligned}$$

### Анализ результатов

Проведено численное моделирование процессов теплопереноса при протекании постоянного тока через пластины аккумулятора (рис. 1) с использованием пакетов программ *ANSYS Electric* и *ANSYS Fluent*. Геометрические размеры области решения: высота пластин ( $0 < y < y_1$ ) 140 мм, толщина каждого элемента (алюминиевой, медной пластин и слоя электролита) 0,5 мм, толщина стенки аккумулятора 2 мм [7].

Приняты следующие варианты силы тока нагрузки на аккумуляторную батарею:  $I_n=50$  А,  $I_n=60$  А,  $I_n=70$  А [6]. В качестве электролита принят  $\text{LiPF}_6$  [14, 15]. Температура термического разложения данного электролита составляет  $125^\circ\text{C}$  [16]. Но следует отметить, что уже при  $60^\circ\text{C}$  в объеме электролита происходят химические реакции, описанные в работах [3, 6], которые могут привести к тепловому разгону аккумуляторной батареи.

При малых поперечных размерах (относительно продольных) исследуемого сегмента аккумулятора визуализация полей температур затруднена, поэтому целесообразно рассматривать распределения температур по поперечной координате. На рис. 2 показано распределение температуры по оси  $x$  при различных условиях теплообмена на поверхности стенки корпуса аккумулятора. Из рис. 2, а видно, что при охлаждении поверхности исследуемого устройства ( $\alpha=5$  Вт/м<sup>2</sup>·К) перепад температур ( $\Delta T$ ) составляет  $0,2^\circ\text{C}$ . При интенсификации теплообмена (рис. 2, б) с поверхности стенки корпуса аккумуляторной батареи ( $\alpha=10$  Вт/м<sup>2</sup>·К)  $\Delta T$  составляет  $0,3^\circ\text{C}$ . Отсутствие перепада температур в электротехнической части аккумулятора, представленной пластинами электродов и электролитом (I-III), обусловлено высокой теплопроводностью используемых материалов. Относительно низкий перепад по толщине твердой стенки (IV) объясняется тем, что корпус аккумуляторной батареи является термически тонким телом (число  $Bi < 3$ ).

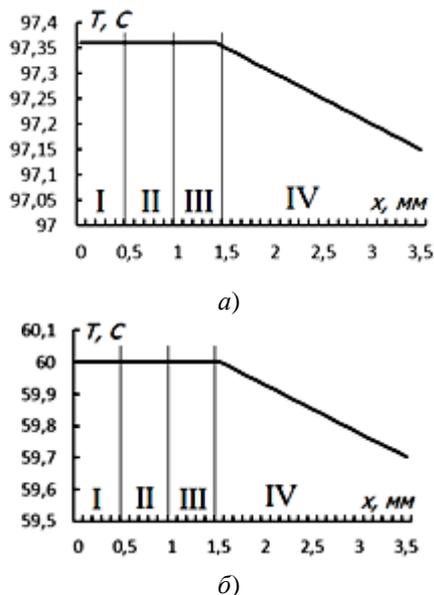


Рис. 2. Распределение температуры по оси  $x$  исследуемого устройства при  $I_n=60$  А при различных условиях теплообмена на поверхности стенки корпуса аккумуляторной батареи: а)  $\alpha=5$  Вт/м<sup>2</sup>·К; б)  $\alpha=10$  Вт/м<sup>2</sup>·К. I –алюминиевая пластина, II – электролит, III – медная пластина, IV – стенка аккумулятора

На рис. 3 показана зависимость средней температуры электролита от времени при теплоизолированном корпусе аккумулятора. Видно, что при отсутствии охлаждения с поверхности стенки корпуса аккумулятора и токовой нагрузки выше номинального ( $>50$  А) температура достигает критических значений ( $60^\circ\text{C}$ ) за 800 с. Следует отметить, что при

достижении температуры электролита выше  $60^{\circ}\text{C}$  вследствие недостаточного теплоотвода от батареи в окружающую среду, возникает риск разгерметизации аккумулятора из-за испарения электролита и роста давления внутри корпуса. В результате возможно возникновение нештатной ситуации на борту воздушного судна.

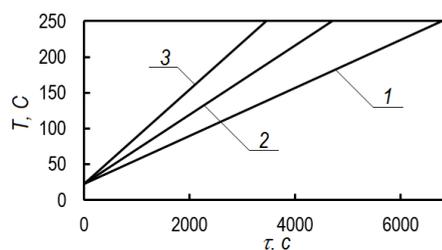


Рис. 3. Зависимость температуры сепаратора аккумулятора от времени при различной токовой нагрузке (охлаждение отсутствует)  $I_n$ :  
1 – 50, 2 – 60, 3 – 70 А

При охлаждении поверхности аккумулятора ( $\alpha=5 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$  на границе  $x=x_1+x_2+x_3$ ,  $0 < y < y_1$ ) рост температуры электролита значительно замедляется. До постоянного, по существу, значения температура поднимается за 8000 с (рис. 4). При рассматриваемых вариантах токовой нагрузки 50, 60 и 70 А и коэффициенте теплоотдачи  $5 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$  температура электролита в установившемся режиме выше номинальной и составляет 74,3; 97,3 и  $124,5^{\circ}\text{C}$ , соответственно.

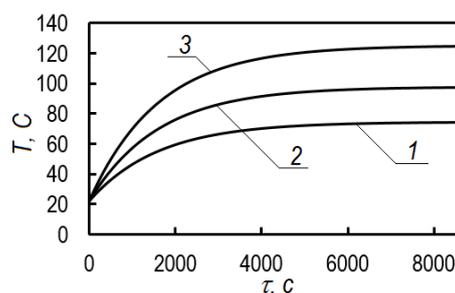


Рис. 4. Зависимость температуры сепаратора аккумулятора от времени при различной токовой нагрузке (при  $\alpha=5 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ )  $I_n$ :  
1 – 50; 2 – 60; 3 – 70 А

При интенсивной теплоотдаче с поверхности стенки корпуса аккумулятора ( $\alpha = 10 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ ) температура электролита растет до значений выше регламентных только при токе нагрузки 70 А и составляет  $73,7^{\circ}\text{C}$  (рис. 5). При этом температура исследуемого устройства поднимается до установившегося режима за 4000 с.

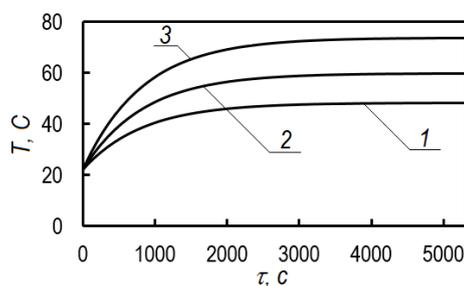


Рис. 5. Зависимость температуры сепаратора аккумулятора от времени при различной токовой нагрузке (при  $\alpha=10 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ ),  $I_n$ :  
1 – 50; 2 – 60; 3 – 70 А

Результаты выполненных исследований показывают, что даже в условиях достаточно интенсивного тепловыделения в пластинах электродов, обусловленного высокими токовыми нагрузками, можно обеспечить допустимый по регламенту эксплуатации аккумуляторных батарей уровень температур электролита за счет теплоотвода с внешней поверхности корпуса аккумулятора. При этом достаточно достижение коэффициента теплоотдачи с этих поверхностей  $10 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ .

В практике использования аккумуляторных батарей летательных аппаратов создание сложных систем охлаждения (принудительное воздушное и водяное охлаждения), способных обеспечивать высокую интенсивность теплосъема ( $\alpha$  более  $10 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ ), затруднено технико-экономическими условиями. Следует отметить, что существуют устройства простые по конструкции, и в то же время имеющие высокий коэффициент эффективной теплопроводности – термосифоны и тепловые трубки. Последние могут обеспечивать достаточно интенсивное охлаждение любых энергонасыщенных технических устройств, в том числе и аккумуляторных батарей воздушных судов.

#### **Заключение**

По результатам численного моделирования процессов конвективно-кондуктивного теплопереноса установлено, что увеличение интенсивности теплоотдачи с поверхности стенки корпуса аккумуляторной батареи в диапазоне изменения коэффициента  $\alpha$  от 5 до  $10 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$  приводит к значительному снижению температур жидкого электролита (на  $26^\circ\text{C}$  при постоянной токовой нагрузке 50 А) по сравнению с условиями теплоизоляции по внешнему контуру корпуса аккумуляторной батареи. При  $I_n=60$  и 70 А температура снижается в условиях охлаждения на  $37$  и  $51^\circ\text{C}$  соответственно.

При токовой нагрузке не более 60 А и коэффициенте теплоотдачи  $10 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$  температуры как поверхности аккумулятора, так и его электролита не превышают регламентных значений температур ( $60^\circ\text{C}$ ).

На основании анализа и обобщения результатов численного моделирования можно сделать вывод, что даже относительно умеренный теплоотвод с поверхности корпуса оказывает большое влияние на работоспособность аккумуляторной батареи. Особенно важным это становится при проектировании аккумуляторов, используемых как аварийные источники электроэнергии (например, аккумуляторные батареи воздушных судов) для режимов интенсивных нагрузок.

#### **Литература**

1. Брускин Д.Э., Синдеев И.М. Электроснабжение летательных аппаратов. М.: Высшая школа, 1988. 263 с.
2. Van Mierlo J., Maggetto G. Comparison of the environmental damage caused by vehicles with different alternative fuels and drive trains // *Automobile Engineering*. 2003. No. 36. P. 583–593.
3. Ahmadou Samba, Noshin Omar Development of an Advanced Two-Dimensional Thermal Model for Large size Lithium-ion Pouch Cells // *Electrochimica Acta*. 2014. No. 117. P. 246–254.
4. Rebecca Slayton, Graham Spinardi Radical innovation in scaling up: Boeing’s Dreamliner and the challenge of socio-technical transitions // *Technovation*. 2016. No. 47. P. 47–58.
5. Tao Song, Yan LI, Jiashan Song, Zhao Zhang Airworthiness considerations of supply chain management from Boeing 787 Dreamliner battery issue // *Procedia Engineering*. 2014. № 80. P. 628–637.
6. Ребров С.Г., Янчур С.В., Мансуров В.С., Московкин С.А. Исследования литий-ионных аккумуляторов космического назначения на пожаровзрывобезопасность // «Труды МАИ». 2014. № 72.
7. Леонова Т.А., Дудник А.И., Михеев А.Е., Осипова И.В., Чурилов Г.Н. Разрядные характеристики литий-ионных аккумуляторов с углеродными электродами // *Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. Ак. М.Ф. Решетнева*. 2012. № 4 (44). с. 25–27.
8. Oliveira J.L.G., Tecchio C., Paiva K.V., Mantelli M.B.H., Gandolfi R., Ribeiro L.G.S. Passive aircraft cooling systems for variable thermal conditions // *Applied Thermal Engineering*. 2015. V. 79. P. 88–97.

9. Muravyov S.V., Borikov V.N., Natalinova N.M. A Computer System: Measurement of Welding Surge Current // Measurement and Control. 2009. V. 42. No. 2. P. 44–47.
10. M. Sievers, U. Sievers, S.S. Mao, Thermal modelling of new Li-ion cell design modifications // Forschung im Ingenieurwesen. 2010. V. 74 (4). P. 215–231.
11. Botte G.G., Subramanian R.E., Mathematical modeling of secondary lithium batteries // Electrochimica Acta. 2000. V. 45. P. 2595–2609.
12. Inui Y., Kobayashi Y., Watanabe Y., Watase Y., Kitamura Y. Simulation of temperature distribution in cylindrical and prismatic lithium ion secondary batteries // Energy Conversion and Management. 2007. V. 48 (7). P. 2103–2109.
13. Ansys Help. FLUENT Theory Guide.
14. Forgez C., Vinh Do D., Friedrich G., Morcrette M., Delacourt C. Thermal modeling of a cylindrical LiFePO<sub>4</sub>/graphite lithium-ion battery // Journal of Power Sources. 2010. V. 195 (9). P. 2961–2968.
15. Chunsheng Wang and Jian Hong Ionic Electronic Conducting Characteristics of LiFePO<sub>4</sub> Cathode Materials // Electrochemical and Solid-State Letters. 2007. V. 10 (3). P. 65–69.
16. Reza Younesi, Gabriel M. Veith, Patrik Johansson, etc Lithium salts for advanced lithium batteries: Li–metal, Li–O<sub>2</sub>, and Li–S // Energy & Environmental Science. 2015. V. 8. P. 1905.

#### **Авторы публикации**

**Красношлыков Александр Сергеевич** – аспирант кафедры «Теоретическая и промышленная теплотехника» Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Кузнецов Гений Владимирович** – д-р физ.-мат. наук, заведующий кафедрой «Теоретическая и промышленная теплотехника» Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

#### **References**

1. Bruskin D.Je., Sindeev I.M. Jelektrosnabzhenie letatel'nyh apparatov. M.: Vysshaja shkola, 1988. 263 p.
2. Van Mierlo J., Maggetto G. Comparison of the environmental damage caused by vehicles with different alternative fuels and drive trains // Automobile Engineering. 2003. No. 36. P. 583–593.
3. Ahmadou Sambaa, Noshin Omar Development of an Advanced Two-Dimensional Thermal Model for Large size Lithium-ion Pouch Cells // Electrochimica Acta. 2014. No. 117. P. 246–254.
4. Rebecca Slayton, Graham Spinardi Radical innovation in scaling up: Boeing's Dreamliner and the challenge of socio-technical transitions // Technovation. 2016. No. 47. P. 47–58.
5. Tao Song, Yan LI, Jiashan Song, Zhao Zhang Airworthiness considerations of supply chain management from Boeing 787 Dreamliner battery issue // Procedia Engineering. 2014. No. 80. P. 628–637.
6. Rebrov S.G., Janchur S.V., Mansurov V.S., Moskovkin S.A. Issledovanija litij-ionnyh akkumuljatorov kosmicheskogo naznachenija na pozharovzryvobezопасnost' // «Trudy MAI». 2014. No. 72.
7. Leonova T.A., Dudnik A.I., Miheev A.E., Osipova I.V., Churilov G.N. Razrjadnye harakteristiki litij-ionnyh akkumuljatorov s uglerodnymi jelektrodami // Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo ajerokosmicheskogo universiteta im. Ak. M.F. Reshetneva. 2012. No. 4 (44). P. 25–27.
8. Oliveira J.L.G., Tecchio C., Paiva K.V., Mantelli M.B.H., Gandolfi R., Ribeiro L.G.S. Passive aircraft cooling systems for variable thermal conditions // Applied Thermal Engineering. 2015. V. 79. P. 88–97.
9. Muravyov S.V., Borikov V.N., Natalinova N.M. A Computer System: Measurement of Welding Surge Current // Measurement and Control. 2009. V. 42. No. 2. P. 44–47.
10. M. Sievers, U. Sievers, S.S. Mao, Thermal modelling of new Li-ion cell design modifications // Forschung im Ingenieurwesen. 2010. V. 74 (4). P. 215–231.
11. Botte G.G., Subramanian R.E., Mathematical modeling of secondary lithium batteries // Electrochimica Acta. 2000. V. 45. P. 2595–2609.

12. Inui Y., Kobayashi Y., Watanabe Y., Watase Y., Kitamura Y. Simulation of temperature distribution in cylindrical and prismatic lithium ion secondary batteries // Energy Conversion and Management. 2007. V. 48 (7). P. 2103–2109.

13. Ansys Help. FLUENT Theory Guide.

14. Forgez C., Vinh Do D., Friedrich G., Morcrette M., Delacourt C. Thermal modeling of a cylindrical LiFePO<sub>4</sub>/graphite lithium-ion battery // Journal of Power Sources. 2010. V. 195 (9). P. 2961–2968.

15. Chunsheng Wang and Jian Hong Ionic Electronic Conducting Characteristics of LiFePO<sub>4</sub> Cathode Materials // Electrochemical and Solid-State Letters. 2007. V. 10 (3). P. 65–69.

16. Reza Younesi, Gabriel M. Veith, Patrik Johansson, etc Lithium salts for advanced lithium batteries: Li–metal, Li–O<sub>2</sub>, and Li–S // Energy & Environmental Science. 2015. V. 8. P. 1905.

#### **Authors of the publication**

***Krasnoshlykov Alexander Sergeevich*** – post-graduate student of the Department of Theoretical and Industrial Heat Engineering. Energy Institute of the State Educational Institution of Higher Professional Education "National Research Tomsk Polytechnic University".

***Kuznetsov Genii Vladimirovich*** – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Department of Theoretical and Industrial Heat Engineering. Energy Institute of the State Educational Institution of Higher Professional Education "National Research Tomsk Polytechnic University".

***Поступила в редакцию***

***14 июля 2017 г.***