

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЕЙ  
С РАДИАЦИОННО-КОНВЕКТИВНЫМ СПОСОБОМ ТЕПЛООБМЕНА  
ДЛЯ ПЕЧЕЙ С ЗАЩИТНЫМИ ИЛИ АГРЕССИВНЫМИ СРЕДАМИ**

**Л.А. Зайнуллин<sup>1</sup>, М.В. Калганов<sup>1</sup>, Д.В. Калганов<sup>4</sup>,  
Н.Б. Лошкарев<sup>4</sup>, А.Р. Фатхутдинов<sup>2</sup>, А.И. Пугин<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>ОАО «Научно-исследовательский институт металлургической  
теплотехники» (ОАО «ВНИИМТ»)

(г. Екатеринбург, Россия)

<sup>2</sup>ОАО «УРАЛЭНЕРГОЧЕРМЕТ» (г. Екатеринбург, Россия)

<sup>3</sup>ОАО «Синарский трубный завод» (г. Каменск-Уральский, Россия)

<sup>4</sup>ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»  
(г. Екатеринбург, Россия)

*Разработаны и изготовлены электронагреватели с радиационно-конвективным способом теплообмена между тепловыделяющими элементами и стенками герметичного корпуса.*

*В ходе исследований в промышленных условиях показано, что способ интенсификации отвода тепла от электроспиралей путем обдувки их потоком теплоносителя за счет работы индивидуального циркуляционного вентилятора повысил срок службы новых нагревателей на 30–50 % по сравнению с известными устройствами в результате снижения рабочей температуры этих тепловыделяющих элементов.*

*Герметичный корпус нагревателей позволяет использовать их в конвективных печах с защитными или агрессивными средами.*

**Ключевые слова:** электронагреватель, нагревательная конвективная печь, радиационно-конвективный теплообмен.

*Electric heaters are designed and manufactured with the radiative-convective heat transfer process between the heating elements and the walls of the enclosure.*

*During researches in industrial conditions it was shown that a way of an intensification of heat removal from electrospirals due to blowing by their stream of the heat carrier by means of the high temperature circulating fan raised service life of heaters for 30–50 %.*

*The tight case of heaters allows to use them in furnaces with the protective or aggressive atmosphere.*

**Keywords:** electric heater, heating convection furnace, radiation-convective heat transfer.

Для решения задач по повышению эффективности и надежности работы низкотемпературных нагревательных и термических печей с защитными или химически агрессивными средами в ОАО «ВНИИМТ» совместно с ОАО «УРАЛЭНЕРГОЧЕРМЕТ» были разработаны и исследованы инновационные электронагреватели закрытого типа с радиационно-конвективным способом передачи тепла от нагревательных элементов (например, проволочных электроспиралей) через стенки герметичного корпуса к обрабатываемому материалу.

Известные электронагреватели закрытого типа [1–3], применяемые, например, в протяжных печах для термообработки полосы и сортового проката

та в защитной среде имеют существенные недостатки. Так, по сравнению с электронагревателями открытого типа в таких устройствах (электрорадиантные трубы) имеет место существенное снижение величины теплового излучения (примерно в два раза) на нагреваемую поверхность из-за применения защитного корпуса, играющего роль теплового экрана. Попытка увеличить тепловую мощность этих нагревателей приводит, как правило, к перегреву электроспиралей (свыше 1100 °С) и снижению ресурса их работы.

В целях уменьшения рабочей температуры нагревателей закрытого типа, повышения эффективности и надежности их работы была разработана схема устройства, где реализуется выбранный способ теплообмена (рис. 1).

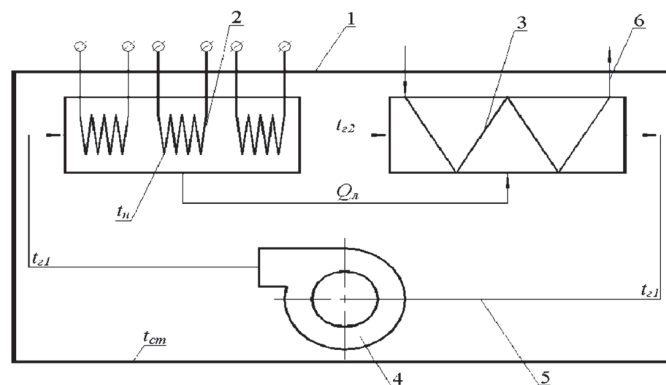


Рис. 1. Схема теплообмена в электронагревателе закрытого типа с радиационно-конвективным способом передачи тепла от спиралей к корпусу:

1 – герметичный защитный корпус нагревателя; 2 – электроспирали; 3 – трубчатый теплообменник; 4 – высокотемпературный вентилятор; 5 – подводящие и отводящие каналы; 6 – нагреваемый «загрязненный» воздух.

$t_{z1}$  – температура теплоносителя (воздуха) на входе в нагреватель;  $t_{z2}$  – температура теплоносителя на входе в теплообменник;  $Q_{\lambda}$  – лучистый тепловой поток от спиралей;  $t_n$  – температура электроспиралей;  $t_{cr}$  – температура стенки

Система уравнений, приближенно описывающая теплообмен внутри рассматриваемого нагревателя в установившемся режиме, имеет вид:

$$Q_{эл} = Q_{\lambda} + Q_{\Gamma},$$

$$Q_{\lambda} = \varepsilon_{пр} \cdot F_{н} \left[ \left( \frac{T_{н}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{cr}}{100} \right)^4 \right], \quad (1)$$

$$Q_{\Gamma} = \alpha_1 \cdot F_{н} [t_i - 0,5(t_{r1} + t_{r2})],$$

$$Q_{\Gamma} = \alpha_2 \cdot F_m [0,5(t_{r1} + t_{r2}) - t_{cr}],$$

$$Q_{\Gamma} = V_{\Gamma} \cdot \rho_{\Gamma} \cdot C_{\Gamma} (t_{r2} - t_{r1}),$$

где  $Q_{эл}$  – электрическая мощность, выделяемая на спираль, Вт;  $Q_{\lambda}$  – лучистый тепловой поток от спиралей к теплообменнику и стенкам корпуса, Вт;  $Q_{\Gamma}$  – тепловая мощность, переносимая теплоносителем, Вт;  $\varepsilon_{пр}$  – приведенный коэффициент лучистого теплообмена, Вт/м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>;  $F_{н}$  – площадь поверхности

электроспиралей,  $m^2$ ;  $T_n$  – температура электроспиралей, К;  $T_{ст}$  – температура стенки корпуса электронагревателей, К;  $\alpha_1$  – коэффициент конвективной теплоотдачи от спиралей к теплоносителю,  $Вт/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ;  $t_{r1}$  – температура теплоносителя на входе в нагреватель,  $^\circ C$ ;  $t_{r2}$  – температура теплоносителя на входе в теплообменник,  $^\circ C$ ;  $\alpha_2$  – коэффициент конвективной теплоотдачи от теплоносителя к поверхности теплообменника,  $Вт/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ;  $F_m$  – площадь теплообменника,  $m^2$ ;  $V_r$  – производительность высокотемпературного вентилятора,  $m^3/c$ ;  $\rho_r$  – средняя плотность теплоносителя,  $кг/m^3$ ;  $C_r$  – средняя удельная теплоемкость теплоносителя,  $Дж/(кг \cdot ^\circ C)$ .

На рис. 2 представлена конструкция электронагревателя, а в таблице приведена техническая характеристика этого единичного устройства.

Изготовленные в металле, описанные выше устройства, были использованы в качестве нагревателей в конвективной печи теплового обезжиривания тонколистового полотна стеклосетки, поставленной и введенной в эксплуатацию на ОАО «Синарский трубный завод» в 2014 г. Выбор конструкции нагревателей закрытого типа связан с тем, что при проведении тепловой обработки стеклосетки имеет место, пиролиз, содержащихся в ней, парафинов (предельных углеводородов), сопровождающийся выделением углерода в твердой фазе (сажи) с последующим осаждением его на элементах изоляторов и электроспиралей, что значительно увеличивает вероятность короткого электрического замыкания и выхода из строя этих устройств.

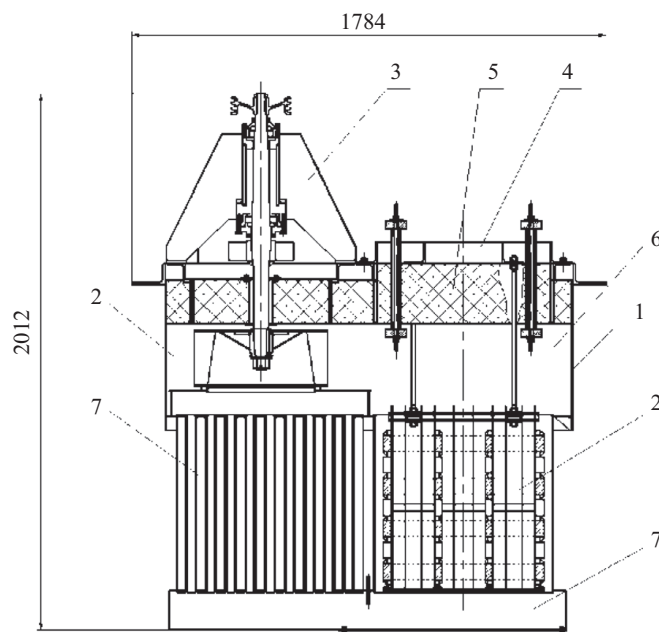


Рис. 2. Конструкция электронагревателя закрытого типа с радиационно-конвективным способом теплообмена:

1 – корпус; 2 – подвесная система крепления проволочных спиралей; 3 – циркуляционный вентилятор специального исполнения; 4 – несущий фланец; 5 – теплоизоляционный слой; 6, 7 – верхний и нижний перепускные короба; 8 – трубчатый теплообменник; 9 – встроенный спиральный корпус вентилятора

### Техническая характеристика электронагревателя

Показатель	Ед. изм.	Значение
Максимальная электрическая мощность нагревателя	кВт	55
Электрическая мощность одной фазы	кВт	18,3
Количество фаз	шт.	3
Электрическое сопротивление одной фазы	Ом	2.64
Материал проволоки спирали		X20H80
Диаметр проволоки	мм	5,5
Максимальная температура теплоносителя, циркулирующего внутри нагревателя	°С	650
Число оборотов рабочего колеса вентилятора	об/мин	1460
Электродвигатель вентилятора		
тип		АИР100L2У3
мощность	кВт	5,5
число оборотов	об/мин	2860
Тип клиновых ремней		A-1250
Вентилятор оборудован встроенной системой охлаждения вала		
Производительность вентилятора, до	м <sup>3</sup> /с	до 3,0
Полный напор при нормальных условиях, до	Па	до 2000
Общая поверхность корпуса нагревателя, включая теплообменник	м <sup>2</sup>	26
Материал стенки корпуса нагревателя, сталь		12Х18Н10Т

Электронагреватель состоит из следующих основных частей: корпуса 1, подвесной системы крепления проволочных спиралей 2 и циркуляционного вентилятора 3 специального исполнения с вертикальным расположением вала. Корпус нагревателя состоит из несущего фланца 4 с теплоизоляционным слоем 5, верхнего 6 и нижнего 7 перепускных коробов, трубчатого теплообменника 8, встроенного спирального корпуса вентилятора 9.

Теплообмен внутри нагревателя осуществляется следующим образом. Электрическая мощность, выделяемая в виде тепла в проволочных нихромовых спиральных, переносится внутри корпуса нагревателя двумя способами. Одна часть теплового потока за счет излучения от спиралей передается на боковые стенки вертикальных каналов, которые снаружи обдуваются потоками «загрязненного» воздуха. Другая часть теплового потока от спиралей передается конвекцией за счет обдувки их поверхности теплоносителем, движущимся внутри корпуса нагревателя, поддерживаемого работающим вентилятором.

Конвективный теплообмен реализован следующим образом. Выходя из встроенного спирального корпуса вентилятора, этот поток через верхний перепускной короб поступает в три параллельно расположенных канала, где нагревается, обдувая проволочные спирали. Далее, по нижнему перепускному каналу, теплоноситель подается во внутрь трубчатки теплообменника, отдавая тепло через стенки трубок внешнему «загрязненному» потоку воздуха. Охлажденный воздух за счет разрежения, создаваемого циркуляционным вентилятором, поступает на его вход для повторения этого теплообменного цикла.

На рис. 3 и 4 приведены результаты расчетов теплообмена внутри нагревателя, исходя из решения системы уравнений (1), в сравнении с экспериментальными данными, полученными в ходе исследований на работающей печи.

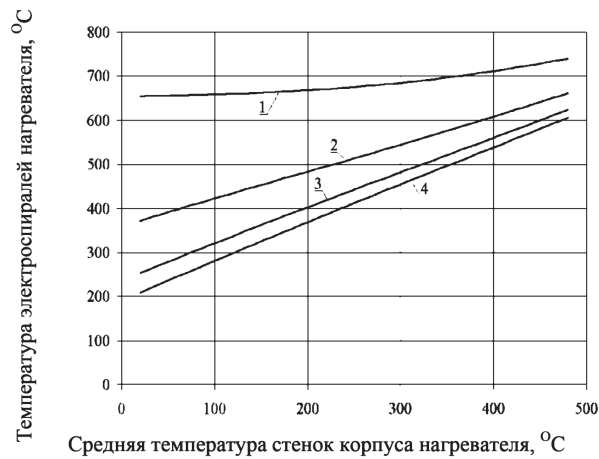


Рис. 3. Расчетные зависимости изменения температуры электроспиралей от средней температуры стенок корпуса нагревателя при различной производительности циркуляционного вентилятора. Производительность циркуляционного вентилятора: 1 – 0 м<sup>3</sup>/с; 2 – 1,0 м<sup>3</sup>/с; 3 – 1,5 м<sup>3</sup>/с; 4 – 2,8 м<sup>3</sup>/с. Подводимая электрическая мощность на нагреватель 55 кВт

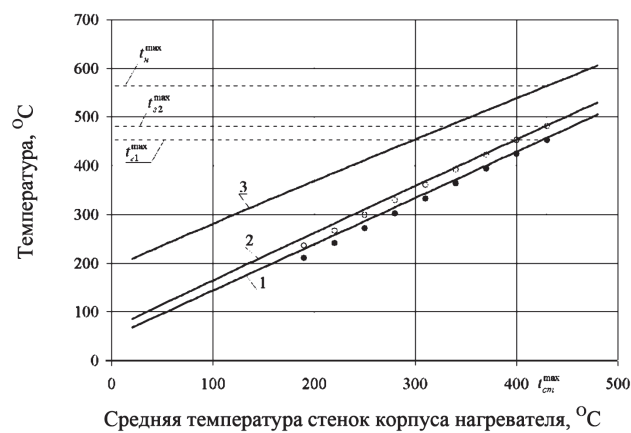


Рис. 4. Зависимости изменения температур электроспиралей и теплоносителя в контуре нагревателя от средней температуры стенок корпуса: 1 – расчетная температура теплоносителя на входе в нагреватель  $t_{r1}$ ; 2 – расчетная температура теплоносителя на входе в теплообменник  $t_{r2}$ ; 3 – расчетная температура электроспиралей нагревателя  $t_n$ ;  $\circ\circ\circ$  –  $t_{r1}$  по данным эксперимента;  $\bullet\bullet\bullet$  –  $t_{r2}$  по данным эксперимента.  $t_n^{\max}$ ,  $t_{r1}^{\max}$ ,  $t_{r2}^{\max}$  – максимальные значения температур электронагревателей и теплоносителя в условиях работы печи. Подводимая электрическая мощность на нагреватель 55 кВт. Производительность циркуляционного вентилятора 2,8 м<sup>3</sup>/с

На рис. 3, в частности, представлены расчетные зависимости изменения температуры поверхности электроспиралей от средней температуры поверхности стенок герметичного корпуса нагревателя при различной производительности циркуляционного вентилятора. Известно, что изменение температуры стенок корпуса нагревателя определяется условиями теплообмена не только на внутренней, но и на внешней его поверхности. Описание тепловой работы внешнего основного циркуляционного контура печи приведено в последующих публикациях, развивающих эту тему.

Из анализа полученных данных следует, что в условиях постоянной электрической мощности, равной 55 кВт, температура поверхности спиралей существенно снижается при увеличении производительности вентилятора, обеспечивающего перенос тепла конвективным способом, т. е. обдувкой их теплоносителем. Температура спиралей существенно зависит также от температуры стенок корпуса нагревателя. Так, при максимальной температуре стенок в условиях работающей печи 430 °С и производительности циркуляционного вентилятора 2,8 м³/с, расчетная температура нагревательных элементов составляет 585 °С, что создает хорошие условия для длительной эксплуатации спиралей, обеспечивая тем самым надежную работу всего нагревательного устройства. Уменьшение производительности вентилятора за счет снижения частоты вращения рабочего колеса, например, с 2,8 до 1,0 м³/с приводит к существенному повышению температур спиралей до 635 °С, что в реальных условиях эксплуатации печи нецелесообразно.

На рис. 4 приведены расчетные и экспериментальные зависимости изменения температур газовой среды в контуре нагревателя от средней температуры поверхности стенок его корпуса при постоянных производительности вентилятора 2,8 м³/с и электрической мощности, подаваемой на спирали (55 кВт). Кривые 1 и 2, рис. 4, соответствуют изменению температур теплоносителя в контуре согласно схеме (см. рис. 1):

$t_{z1}$  – температура газа на входе в нагреватель;

$t_{z2}$  – температура газа на входе в теплообменник.

Кривая 3 соответствует изменению температуры электроспиралей  $t_{\text{н}}$ .

Результаты расчетов температур теплоносителя  $t_{r1}$  и  $t_{r2}$  в зависимости от температур стенок корпуса удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными, полученными в ходе проведения исследований на работающей печи. Так, повышение температуры стенок корпуса, характерного для режима нагрева печи, приводит к увеличению и температуры теплоносителя внутри рассматриваемого нагревателя. При максимальной температуре стенок 430 °С, зафиксированной в ходе исследований, температуры теплоносителя составили  $t_{r1} = 456$  °С,  $t_{r2} = 478$  °С, что вполне удовлетворяет условиям длительной эксплуатации материала стенок, выполненных из стали 12Х18Н10Т. Кроме того, применение в циркуляционном контуре нагревателя теплообменника с развитой поверхностью в сочетании с интенсивным движением теплоносителя внутри него (кратность циркуляции теплоносителя составляет примерно 1.5 1/с) в режиме нагрева печи обеспечивается постоянный тепловой поток, равный 55 кВт, при незначительной разности температур теплоносителя внутри нагревателя ( $t_{r1} - t_{r2} = 20-25$  °С).

Из анализа полученных расчетных и экспериментальных данных следует, что в начале режима нагрева соотношение конвективной и радиационной составляющих общего теплового потока, отводимого от электроспиралей, составляет 5:1, а в конце нагрева, соответственно, 2:1.

### **Выводы**

Разработан и исследован электронагреватель с радиационно-конвективным способом теплообмена между нагревательными элементами и стенками герметичного корпуса.

В ходе расчетных и экспериментальных исследований нового нагревателя в условиях работы печи показано, что способ отвода тепла от электроспиралей путем обдувки их потоком теплоносителя в циркуляционном контуре, позволяет повысить ресурс его работы на 30–50 % по сравнению с известными устройствами за счет снижения рабочей температуры этих тепловыделяющих элементов.

Разработанные электронагреватели рекомендуются для использования в низкотемпературных печах с конвективным типом теплообмена в защитных или агрессивных средах.

### **Список использованных источников**

1. Аптерман В.Н. Протяжные печи / Аптерман В.Н., Тымчак В.М. – М.: Металлургия, 1969. – 320 с.
2. Казанцев Е.И. Промышленные печи. – М.: Металлургия, 1975. – 367 с.
3. Тымчак В.М. Расчет нагревательных и термических печей. Справочное издание / Тымчак В.М., Гусовский В.Л. – М.: Металлургия, 1983. – 480 с.

## **Контактная информация**

Данная статья опубликована в сборнике докладов международной научно-практической конференции «Современные научные достижения металлургической теплотехники и их реализация в промышленности», посвященной 95-летию основания кафедры ТИМ, УрФУ и 85-летию основания Научно-исследовательского института металлургической теплотехники ОАО «ВНИИМТ», прошедшей в Екатеринбурге 17–18 сентября 2015 г.

Научно-исследовательский институт металлургической теплотехники (ОАО «ВНИИМТ») предлагает эффективные технологии переработки металлургического сырья и энергоэффективные печные агрегаты для металлургии и машиностроения.

Если Вас заинтересовала информация, представленная в данной статье Вы можете обратиться по следующим координатам.

ОАО «Научно-исследовательский институт металлургической теплотехники»  
(ОАО «ВНИИМТ»)

620137, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Студенческая, д. 16

Генеральный директор

Зайнуллин Лик Анварович

Тел. +7 (343) 374-03-80

Факс.: +7 (343) 374-29-23

Email: [aup@vniimt.ru](mailto:aup@vniimt.ru)

[www.vniimt.ru](http://www.vniimt.ru)



Министерство образования и науки Российской Федерации  
Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина  
Институт материаловедения и металлургии  
Кафедра «Теплофизика и информатика в металлургии»

## **Современные научные достижения металлургической теплотехники и их реализация в промышленности**

**Сборник докладов международной  
научно-практической конференции  
«Современные научные достижения металлургической  
теплотехники и их реализация в промышленности»,  
посвященной 95-летию основания кафедры ТИМ,  
УрФУ и 85-летию основания ОАО «ВНИИМТ»**

**Екатеринбург, 17–18 сентября 2015 г.**



Екатеринбург  
2015

УДК 669.04:004(06)  
ББК 34.303-12я431(0)

**Рецензенты:**

д-р техн. наук, проф. **А.Н. Дмитриев** (гл. науч. сотр., Институт металлургии Уральского отделения РАН);

д-р техн. наук, проф. **Е.В. Торопов** (профессор кафедры «Промышленная теплоэнергетика», ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет))

**С 56 Современные научные достижения металлургической теплотехники и их реализация в промышленности:** Сборник докладов международной научно-практической конференции, посвященной 95-летию основания кафедры ТИМ, УрФУ и 85-летию основания ОАО «ВНИИМТ» (Екатеринбург, 17–18 сентября 2015 г.); Под ред. Г.М. Дружинина, Л.А. Зайнуллина, В.В. Лаврова, Н.А. Спирина, Ю.Г. Ярошенко. – Екатеринбург, 2015. – 436 с.

ISBN 978-5-9907151-1-0

В сборник включены доклады, представленные на международной научно-практической конференции «Современные научные достижения металлургической теплотехники и их реализация в промышленности» (17–18 сентября 2015 г.), посвященной 95-летию основания кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии», УрФУ и 85-летию основания НИИМТ ОАО «ВНИИМТ». Доклады отражают становление двух научных центров, организатором которых был видный металлург-теплотехник Н.Н. Доброхотов. Это становление двух коллективов – кафедры и института – прослеживается в докладах, отразивших результаты научно-исследовательских работ ученых вузов и НИИ, предприятий и организаций России, стран ближнего и дальнего зарубежья по современным проблемам металлургической теплотехники черной и цветной металлургии. Тематика докладов конференции отражает динамику сотрудничества кафедры УрФУ и НИИМТ ОАО «ВНИИМТ», достижения специалистов в области теплотехники агломерационного и доменного производства, теплотехники нагревательных печей для нагрева металла и агрегатов для термообработки. Отражены также методы и способы эффективного использования энергетических ресурсов, информационные технологии в металлургии, а также актуальные проблемы экологии и управления тепловыми режимами технологических агрегатов в металлургии, машиностроении, промышленности строительных материалов.

Материалы сборника представляют интерес для специалистов, занимающихся решением теплотехнических проблем в металлургии и других отраслях промышленности, а также могут быть полезны студентам высших учебных заведений.

УДК 669.04:004(06)  
ББК 34.303-12я431(0)

Редакционная коллегия: д.т.н. Г.М. Дружинин, д.т.н. Л.А. Зайнуллин, д.т.н. В.В. Лавров, д.т.н. Н.А. Спирин, д.т.н. Ю.Г. Ярошенко.

Все статьи в номере опубликованы при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Постановление № 211, контракт № 02.А03.21.0006).

All the articles were financially supported by the Government of the Russian Federation (Act 211, contract no. 02.A03.21.0006).

Ответственность за содержание предоставленных материалов несут авторы докладов. Воспроизведение сборника или его части без ссылки на издателя запрещается.

ISBN 978-5-9907151-1-0

© Уральский федеральный университет, 2015  
© Авторы статей, 2015