ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ

УДК 669.041+658.264:621.365

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-3-95-101>

ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА С ПОМОЩЬЮ ЛАБОРАТОРНЫХ УСТАНОВОК РЕКУПЕРАТИВНОГО ТИПА

Герасименко Т.Е., Мешков Е.И., Герасименко Н.П.

Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), Владикавказ, Россия

Аннотация

Постановка задачи: в статье приведена лабораторная установка, разработанная на кафедре теории и автоматизации металлургических процессов и печей ФГБОУ ВО СКГМИ (ГТУ), и описан принцип её работы, а также методика проведения исследования. **Цель работы:** совершенствование лабораторного оборудования для обеспечения наглядного представления о процессах теплообмена. Новизна: данная установка даёт возможность получить значительное количество теплофизических параметров, необходимых для исследования и моделирования процесса теплообмена по сравнению с существующими аналогами. **Результат:** разработанная установка позволяет проводить исследование процессов теплообмена вычислительным экспериментом с помощью математической модели, основанной на зональном методе. Конструкцией установки предусмотрена возможность быстрого переоборудования её из прямоточного режима работы в противоточный режим. Она оснащена системой автоматического контроля и регулирования. **Практическая значимость:** установка позволяет получить наглядное представление о теплопередаче, тепловых потоках, закономерностях, имеющих место при теплообмене, и является практическим учебным пособием при подготовке кадров высшей квалификации.

Ключевые слова: математическое моделирование, исследование теплообмена, лабораторные установки, рекуператоры.

Введение

Теплообменные процессы играют важную роль во многих энергетических устройствах и технологической аппаратуре. Металлургия, теплоэнергетика, химические, пищевые и криогенные технологии – лишь некоторые области, использующие теплообменные аппараты. В большинстве теплообменных аппаратов, применяемых во всех этих отраслях, теплота передается от горячего теплоносителя к холодному через стенку, то есть осуществляется теплообмен между теплоносителем и поверхностью теплообмена. Наиболее низкий теплообмен наблюдается в газовых теплообменниках, и его интенсификация является актуальной задачей. К газовым теплообменникам относят аппараты для утилизации тепла газов промышленных печей, применяемые в металлургии. Так как большинство металлургических процессов являются высокотемператур-

ными, то область применения утилизаторов довольно широка. Написано значительное количество работ, посвящённых процессам теплообмена в различных по конструкции аппаратах [1–3], поиску эффективных форм поверхностей и различным способам интенсификации теплообмена [4–7]. Несмотря на это, и сегодня продолжается поиск новых конструктивных решений и методов интенсификации теплообменных процессов.

Теория, материалы и методы исследования, технические и технологические разработки

На кафедре «Теории и автоматизации металлургических процессов и печей» СКГМИ (ГТУ) разработана лабораторная установка (рис. 1), позволяющая исследовать различные режимы теплообмена. Установка даёт возможность получить большее количество теплофизических параметров, необходимых для исследования и моделирования теплообмена, по сравнению с существующими аналогами [8, 9].

Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – кожух; 2 – входной патрубок; 3 – выходной патрубок; 4 – теплообменные элементы; 5–8 – термодатчики; 9 – расходомер холодного потока; 10 – автоматизированная система управления; 11 – эмулятор печи; 12 – входной канал; 13 – электронагреватель; 14 – тягодутьевое устройство; 15 – трубопровод; 16, 17 – шиберы; 18 – расходомер; 19 – термодатчик. 20 – устройством регулирования мощности; 21 – устройство регулирования частоты вращения двигателя; 22 – контроллер; 23 – устройство ввода аналоговых сигналов; 24 – устройство вывода аналоговых сигналов; 25 – устройство вывода дискретных сигналов; 26 – нагнетатель холодного потока; 27 – магнитный пускатель

Лабораторная установка включает кожух 1 с входным 2 и выходным 3 патрубками, размещённые внутри кожуха 1 теплообменные элементы 4, термодатчики 5, 6, 7 и 8, установленные во входном 2 и выходном 3 патрубках, а также на входе и выходе теплообменных элементов 4, расходомер холодного потока 9 и автоматизированную систему управления 10, соединённую каналами связи с термодатчиками 5–8 и расходомером 9. Установка снабжена эмулятором печи 11 с входным каналом 12 и установленным внутри электронагревателем 13. Причём эмулятор печи 11 соединён с теплообменными элементами 4, расположенными рядами, с образованием каналов для прохода горячего потока. На выходе теплообменных элементов 4 установлено тягодутьевое устройство 14. Входной 2 и выходной 3 патрубки кожуха 1 выполнены съёмными, с возможностью направления холодного потока по прямотоку или противотоку относительно горячего потока.

Выходной патрубок 3 кожуха 1 соединён трубопроводом 15 с входным каналом 12 эмулятора печи 11 с возможностью регулирования расхода теплового потока шиберами 16 и 17, установлен-

ными в выходном патрубке 3 кожуха 1 и соединительном трубопроводе 15. Во входном канале 12 эмулятора печи 11 дополнительно установлен расходомер 18 и термодатчик 19. Электронагреватель 13 снабжён устройством регулирования мощности 20, а тягодутьевое устройство 14 снабжено устройством регулирования частоты вращения двигателя 21, соединённым каналами связи с автоматизированной системой управления 10. Автоматизированная система управления 10 снабжена контроллером 22 с устройствами ввода аналоговых сигналов 23, вывода аналоговых сигналов 24 и вывода дискретных сигналов 25. Кожух 1 и его выходной патрубок 3, а также соединительный трубопровод 15 снабжены тепловой изоляцией, при этом во входном патрубке 2 кожуха 1 установлен нагнетатель холодного потока 26, который соединён через магнитный пускатель 27 с автоматизированной системой управления 10 каналом связи.

Лабораторная установка работает следующим образом. В эмулятор печи через входной канал поступает холодный поток, например воздух или газы, за счёт создания разрежения тягодутьевым устройством. В эмуляторе печи холодный поток

нагревается с помощью электронагревателя. Затем горячий поток поступает в теплообменные элементы, в которых осуществляется процесс теплообмена. Одновременно во входной патрубок поступает холодный поток, например воздух, за счёт нагнетателя. В результате теплообмена через стенку теплообменных элементов холодный поток нагревается, а горячий поток охлаждается. При этом охлаждённый поток выбрасывается в атмосферу через тягодутьевое устройство, а нагретый поток поступает в выходной патрубок. Причём нагретый поток может быть в полном объёме выброшен в атмосферу, а может быть направлен полностью или частично через соединительный трубопровод во входной канал.

Перераспределение потоков осуществляют за счёт регулирования сечения трубопровода и выходного патрубка с помощью шиберов. Использование соединительного трубопровода позволяет исследовать теплообмен, имитирующий работу рекуператора промышленных печей, а выполнение входного и выходного патрубков съёмными, с возможностью перемены их местами, позволяет исследовать теплообмен при противоточном или прямоточном движении потоков, что существенно расширяет функциональные возможности установки.

Регулирование интенсивности теплообмена и температурного режима осуществляют за счёт изменения частоты вращения двигателя тягодутьевого устройства, а также за счёт изменения мощности электронагревателя.

Управление теплообменом осуществляют автоматизированной системой управления, в которой данные с термодатчиков, а также расходомеров поступают на устройство ввода аналоговых сигналов. После чего контроллер выполняет анализ поступивших сигналов и, согласно алгоритму управления, производит расчёт управляющих воздействий для нагревателя и тягодутьевого устройства. После этого сигнал поступает на регулятор мощности электронагревателя и на регулятор частоты вращения двигателя тягодутьевого устройства. Устройство вывода дискретных сигналов управляет электрическим пускателем нагнетателя холодного потока. Автоматизированная система управления позволяет легко изменять режимные параметры теплообмена и получать данные, позволяющие исследовать и моделировать этот процесс.

Результаты исследования и их обсуждение

Важнейшими параметрами, полученными при моделировании, является распределение температур и изменение температурного напора вдоль поверхности теплообмена. Для определе-

ния этих параметров запишем уравнения теплового баланса, а для пояснения представим схему теплообмена и характерные температурные профили горячего и холодного потоков (рис. 2).

– для горячего потока (контур K_1)

$$G_1 c_1 T' - G_1 c_1 T'' - Q = 0$$

$$\text{и } Q = -G_1 c_1 (T' - T''); \quad (1)$$

– для холодного потока (контур K_2)

$$G_2 c_2 t' + Q - G_2 c_2 t'' = 0$$

$$\text{и } Q = G_2 c_2 (t'' - t'), \quad (2)$$

где G_1, G_2 – массовый расход соответственно горячего и холодного потока, $\text{м}^3/\text{с}$; T и T'' – температура горячего потока соответственно на входе и выходе из аппарата, $^\circ\text{C}$; t' и t'' – температура холодного потока соответственно на входе и выходе из аппарата, $^\circ\text{C}$; c_1, c_2 – теплоёмкость соответственно горячего и холодного потока, $\text{кДж}/\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C}$.

Для всей поверхности уравнение теплообмена можно записать в виде

$$Q = G_1 c_1 (T' - T'') = G_2 c_2 (t'' - t') = kF \Delta_{\text{ср}}, \quad (3)$$

где k – коэффициент теплопередачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; F – поверхность теплообмена, м^2 ; $\Delta_{\text{ср}}$ – средний температурный напор, $^\circ\text{C}$.

Уравнение теплообмена для элементарной поверхности df представим в виде следующих соотношений:

$$G_1 c_1 dT + k(T - t)df = 0$$

$$\text{и } G_2 c_2 dt - k(T - t)df = 0. \quad (4)$$

Введём относительную координату $x = f/F$, тогда $df = Fdx$, и из соотношения (4) получаем систему дифференциальных уравнений первого порядка

$$\begin{cases} \frac{dT}{dx} = -\frac{kF}{G_1 c_1} (T - t) = -a(T - t); \\ \frac{dt}{dx} = \frac{kF}{G_2 c_2} (T - t) = b(T - t), \end{cases} \quad (5)$$

где a и b – числа единиц переноса теплоты:

$$a = \frac{kF}{G_1 c_1}, \quad b = \frac{kF}{G_2 c_2}.$$

Эта система должна решаться с граничными условиями для точки начала отсчёта поверхности теплообмена f .

$$T = T' \quad \text{и} \quad t = t' \quad \text{при} \quad x = 0. \quad (6)$$

Рис. 2. Схема теплообмена и характерные температурные профили горячего и холодного потоков в режиме прямотока (а), противотока (б)

Наиболее общий способ решения – повышение порядка дифференциальных уравнений при сведении системы (5) к уравнению относительно одной из переменных T или t . Выразим из первого уравнения системы (5) температуру холодного потока

$$t = T + \frac{1}{a} \frac{dT}{dx} \quad (7)$$

и продифференцируем её по x

$$\frac{dt}{dx} = \frac{dT}{dx} + \frac{1}{a} \frac{d^2T}{dx^2}, \quad (8)$$

а теперь подставим во второе уравнение системы (5) найденные значения

$$\frac{dT}{dx} + \frac{1}{a} \frac{d^2T}{dx^2} = b \left[T - \left(T + \frac{1}{a} \frac{dT}{dx} \right) \right], \quad (9)$$

откуда

$$\frac{d^2T}{dx^2} + (a+b) \frac{dT}{dx} = 0. \quad (10)$$

Решение этого однородного дифференциального уравнения второго порядка имеет вид

$$T = \lambda_1 e^{y_1 x} + \lambda_2 e^{y_2 x}, \quad (11)$$

где y_1 и y_2 – корни характеристического уравнения $y^2 + (a+b)y = 0$, так что $y_1 = 0$, а $y_2 = -(a+b)$. Тогда

$$T = \lambda_1 + \lambda_2 e^{-(a+b)x}. \quad (12)$$

Подставив в выражение (7) это значение T и производную $\frac{dT}{dx} = -\lambda_2 (a+b) e^{-(a+b)x}$, получим

$$t = \lambda_1 - \lambda_2 \frac{b}{a} e^{-(a+b)x}. \quad (13)$$

Постоянные интегрирования λ_1 и λ_2 найдем из граничных условий (6)

$$\begin{aligned} T' &= \lambda_1 + \lambda_2 \text{ и} \\ t' &= \lambda_1 + \lambda_2 \left(1 - \frac{a+b}{a} \right) = \lambda_1 - \frac{b}{a} \lambda_2. \end{aligned} \quad (14)$$

Отсюда

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= T' - \Delta \frac{a}{a+b} = t' + \Delta \frac{b}{a+b}, \\ \lambda_2 &= \Delta \frac{a}{a+b}. \end{aligned} \quad (15)$$

где $\Delta = T' - t'$.

Подставив значения постоянных интегрирования в (12) и (13), окончательно получим:

$$T = T' - \Delta \frac{a}{a+b} (1 - e^{-(a+b)x}); \quad (16)$$

$$t = t' + \Delta \frac{b}{a+b} (1 - e^{-(a+b)x}). \quad (17)$$

На входе в теплообменник ($x=0$) тождественно $T = T'$ и $t = t'$, на выходе: из него ($x=1$) получается

$$T'' = T' - \Delta \frac{a}{a+b} (1 - e^{-(a+b)}); \quad (18)$$

$$t'' = t' + \Delta \frac{b}{a+b} (1 - e^{-(a+b)}). \quad (19)$$

Найденные соотношения позволяют проследить изменение температурного напора вдоль поверхности F . Из выражений (16) и (17) следует

$$T - t = T' - t' - \Delta \left(\frac{a}{a+b} + \frac{b}{a+b} \right) (1 - e^{-(a+b)x}) \quad (20)$$

или $\Delta = \Delta e^{-(a+b)x}$.

Можно убедиться, что из выражения (20) по теореме о среднем напоре непосредственно получается известное уже выражение для средне-логарифмического температурного напора

$\Delta_{\text{ср}} = \int_0^1 \Delta dx$. При этом надо учесть, что получаемые в ходе интегрирования фрагменты имеют следующий смысл применительно к прямотоку: $\Delta = \Delta_1$; $\Delta e^{-(a+b)} = \Delta_2$; $a + b = \ln(\Delta_1 / \Delta_2)$.

С использованием приведённой методики составлена математическая модель процесса теплообмена и программа для ЭВМ, которая позволяет, применяя выражения (18) и (19), проследить изменение температур потоков и температурного напора вдоль поверхности теплообмена F (рис. 3). Проявить работу математической модели можно с помощью примера. Для примера в качестве горячего и холодного теплоносителя использовался атмосферный воздух с температурой $T'=300$ °С и $t'=25$ °С. Работа установки производилась в режиме прямотока. При этом массовый расход горячего и холодного воздуха составлял соответственно $G_1 = 500$ м³/ч и $G_2 = 300$ м³/ч, суммарная поверхность теплообменных элементов лабораторной установки $F = 0,69$ м², а длина установки $l = 4$ м.

По результатам расчёта были построены температурные кривые (рис. 4).

Form1

Температура газа в НАЧАЛЕ газохода, С: 300

Температура окружающего воздуха, С: 25

Толщина стенки газохода, м: 0.015

Коэффициент, зависящий от положения стенки: 2.56

Степень черноты стенки газохода: 0.82

Процентная доля углекислого газа: 0

Процентная доля воды: 0

Процентная доля кислорода: 21

Процентная доля азота: 79

Процентная доля сернистого ангидрида: 0

Скорость движения газа в начале газохода, м/с: 20

Длина газохода, м: 4

Заданная длина участка газохода, м: 1

Расход отходящих газов при н.у., куб. м/ч: 500

Рассчитать

Номер участка	Температура горячего потока	Температура холодного потока	Скорость газа	Температурный напор
0	300	25	20	275
1	282	58	18,8	224
2	266	87	18,3	179
3	251	114	17,8	137
4	238	138	16,9	100

Рис. 3. Расчётные значения примера реализации метода

Рис. 4. Температурные кривые, полученные при реализации метода в установке

Продemonстрированный способ определения температурных кривых пригоден также для протитотока, реализуемого в приведённой в данной работе установке. При этом в общем случае изменяются исходные дифференциальные уравнения и граничные условия. С использованием других частных подходов к решению задач теплообмена, приведённых в источниках литературы [10–12], можно расширять ещё и спектр полученных расчётных параметров, изучая, тем самым, процессы, протекающие в утилизационных установках рекуперативного типа и теплообмен в целом.

Заключение

Разработанная и приведённая в работе лабораторная установка позволяет решать задачи теплообмена широкого спектра с различными граничными условиями при разнообразных режимах эксплуатации, максимально приближенных к реальному процессу. В связи с этим установка является универсальной для изучения, исследования и моделирования процесса теплообмена. Она позволяет получить наглядное представление о теплопередаче, тепловых потоках, закономерностях, имеющих место при теплообмене, и является практическим учебным пособием при подготовке кадров высшей квалификации.

Список литературы

1. Мигай В.К. Повышение эффективности современных теплообменников. Л.: Энергия, 1980. 144 с.
2. Справочник по теплообменникам: В 2 т. Т.1 / пер. с англ. под ред. О.Г. Мартыненко и др. М.: Энергоатомиздат, 1987. 352 с.
3. Попов И.А., Гортышов Ю.Ф., Олимпиев В.В. Промышленное применение интенсификации теплообмена – современное состояние проблемы (Обзор) // Теплоэнергетика. 2012. №1. С. 3–14.
4. Антуфьев В.М. Эффективность различных форм конвективных поверхностей нагрева. М.: Энергия, 1966. 184 с.
5. Керн Д., Краус А. Развитые поверхности теплообмена. М.: Энергия, 1977. 464 с.
6. Калинин Э.К. Эффективные поверхности теплообмена. М.: Энергоатомиздат, 1998. 408 с.
7. Герасименко Т.Е., Мешков Е.И., Дикарева А.В. Состояние, проблемы и стимулирование утилизации тепла газов промышленных печей // Цветная металлургия. 2011. №1. С. 30–35.
8. А. с. 1695123 СССР. Установка для исследования работы теплообменного аппарата / В.М. Спицин, В.И. Караванов. Оpubл. 30.11.1991.
9. Пат. на полезную модель 65277 РФ. Лабораторная установка по теплопередаче / Т.А. Енютина, С.Г. Марченкова. Оpubл. 27.07.2007.
10. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии. Кн. 1, 2 / Айнштейн В.Г., Захаров М.К., Носов Г.А. и др.; под науч. ред. Айнштейна В.Г. М.: Химия, 2000. 1760 с.
11. Герасименко Т.Е., Мешков Е.И., Томилина А.А. Совершенствование и идентификация математической модели прокали углеродных материалов в барабанной вращающейся печи // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. №2. С. 116–125.
12. Арунцян Г.Г., Рутковский А.Л. Математическое моделирование в задачах проектирования систем управления сложными объектами. Калининград: Изд-во ФГОУ ВПО КГТУ, 2011. 304 с.

Поступила 22.02.17.

Принята в печать 07.06.17.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-3-95-101>

RESEARCH AND SIMULATION OF HEAT TRANSFER PROCESSES WITH THE HELP OF LABORATORY-SCALE RECUPERATORS

Tatiana E. Gerasimenko – Ph.D. (Eng.), Associate Professor
North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (the State Technological University), Vladikavkaz, Russia.
E-mail: gerasimenko_74@mail.ru

Evgeny I. Meshkov – D.Sc. (Eng.), Professor
North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (the State Technological University), Vladikavkaz, Russia.
E-mail: eimeshkov@gmail.com

Nadezhda P. Gerasimenko – Undergraduate Student
North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (the State Technological University), Vladikavkaz, Russia.
E-mail: gerasimenko_np@mail.ru

Abstract

Problem Statement: This article describes a laboratory installation designed by the Department of Theory and Automation of Metallurgical Processes and Furnaces of the North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy

(the State Technological University). The article also describes how the installation functions and the research procedure applied. **Objectives:** This work aims to improve laboratory equipment to provide a visual representation of heat transfer processes. **Originality:** In compari-

son with its counterparts, this installation can help obtain a great number of thermal parameters which are necessary for studying and modeling of heat transfer processes.

Findings: The developed unit enables to study the heat transfer processes by way of simulation using a mathematical model based on the zonal method. Due to its design, the unit can be quickly re-adjusted to run in counter-flow mode instead of once-through mode. It has an automatic control and adjustment functionality.

Practical Relevance: The unit gives an insight into heat transfer, heat flows and the heat exchange regularities, and it provides a practical guide which can be used for training highly qualified personnel.

Keywords: Mathematical modeling, study of heat transfer, laboratory units, recuperators.

References

1. Migay V.K. *Povyshenie effektivnosti sovremennykh teploobmennikov* [Improving the efficiency of modern heat exchangers]. Leningrad: Energiya, 1980, 144 p. (In Russ.)
2. *Spravochnik po teploobmennikam* [Handbook of heat exchangers]. In 2 volumes. Vol. 1, trans. from English. Ed. by O.G. Martynenko et al. Moscow: Energoatomizdat, 1987, 352 p. (In Russ.)
3. Popov I.A., Gortyshov Yu.F., Olimpiev V.V. Industrial application of intensified heat transfer technology – The current status of the problem (overview). *Teploenergetika* [Heat power engineering], 2012, no. 1, pp. 3–14. (In Russ.)
4. Antufiev V.M. *Effektivnost' razlichnykh form konvektivnykh poverkhnostey nagreva* [The effectiveness of convection heat surfaces of various design]. Moscow: Energiya, 1966, 184 p. (In Russ.)
5. Kern D., Kraus A. *Razvitye poverkhnosti teploobmena* [Extended heat transfer surfaces]. Moscow: Energiya, 1977, 464 p. (In Russ.)
6. Kalinin E.K. *Effektivnye poverkhnosti teploobmena* [Efficient heat transfer surfaces]. Moscow: Energoatomizdat, 1998, 408 p. (In Russ.)
7. Gerasimenko T.E., Meshkov E.I., Dikareva A.V. The status and the problems of industrial furnace gas heat recovery and the incentives for it. *Tsvetnaya metallurgiya* [Non-ferrous metallurgy], 2011, no. 1, pp. 30–35. (In Russ.)
8. Spitsin V.M., Karavaev V.I. *Ustanovka dlya issledovaniya raboty teploobmennogo apparata* [A unit for studying the heat exchanger in operation]. C.S. SU, no. 1695123, 1991.
9. Enyutina T.A., Marchenkova S.G. Patent RU, no. 65277, 2007. (In Russ.)
10. Einstein V.G., Zakharov M.K., Nosov G.A. et al. *Obshchiy kurs protsessov i apparatov khimicheskoy tekhnologii* [The general course in chemical processes and units]. Ed. by Einstein V.G. Moscow: Khimiya, 2000, 1760 p. (In Russ.)
11. Gerasimenko T.E., Meshkov E.I., Tomilina A.A. Improving and identifying the mathematical model for the calcination of carbon materials in a rotary kiln. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2016, no. 2, pp. 116–125. (In Russ.)
12. Arounyants G.G., Rutkovskiy A.L. Mathematical modeling as part of designing control systems for complex objects. Kaliningrad: Publishing House of KSTU, 2011, 304 p. (In Russ.)

Received 22/02/17

Accepted 07/06/17

Образец для цитирования

Герасименко Т.Е., Мешков Е.И., Герасименко Н.П. Исследование и моделирование процессов теплообмена с помощью лабораторных установок рекуперативного типа // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т.15. №3. С. 95–101. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-3-95-101>

For citation

Gerasimenko T.E., Meshkov E.I., Gerasimenko N.P. Research and simulation of heat transfer processes with the help of laboratory-scale recuperators. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2017, vol. 15, no. 3, pp. 95–101. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-3-95-101>