

Научная статья
УДК 621.1
doi:10.35694/YARCX.2022.57.1.016

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА ПЛАСТИНЧАТОГО ТЕПЛООБМЕННИКА УТИЛИЗАТОРА И ВОЗМОЖНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ЕГО ИЗГОТОВЛЕНИЯ

**Татьяна Николаевна Несиоловская¹, Роман Дмитриевич Адакин²,
Евгений Владимирович Уткин³**

¹Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Россия

^{2,3}Ярославская государственная сельскохозяйственная академия, Ярославль, Россия

¹nesiolovskayatn@ystu.ru

²adakin@mail.ru, ORCID 0000-0003-3330-9787

³utkin.e.v.97@mail.ru

Реферат. Статья посвящена утилизации тепла отработавших газов при работе печей, котлов, сушилок с помощью пластинчатого теплоутилизатора. С помощью 3D-моделирования проведено проектирование теплоутилизатора со сменными модулями на основе тонких пластин, определены геометрические характеристики теплообменника, его форма и толщина листов, схема движения теплоносителей, температуры и скорости входящих и выходящих теплоносителей, коэффициенты теплоотдачи для различных скоростей воздуха. Полученные данные верифицированы в ходе натурных испытаний изготовленного устройства на собранном для этого стенде. Теплоутилизатор показал хорошие результаты, его можно рекомендовать для использования в работе на соответствующих объектах.

Ключевые слова: теплоутилизатор, пластинчатый теплообменник, теплоносители, сменные модули

TEST RESULTS OF THE SAMPLE PLATE HEAT EXCHANGER OF THE UTILIZER AND POSSIBLE TECHNOLOGIES OF ITS MANUFACTURE

Tatyana N. Nesiolovskaya¹, Roman D. Adakin², Evgeniy V. Utkin³

¹Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia

^{2,3}Yaroslavl State Agricultural Academy, Yaroslavl, Russia

¹nesiolovskayatn@ystu.ru

²adakin@mail.ru, ORCID 0000-0003-3330-9787

³utkin.e.v.97@mail.ru

Abstract. The article is devoted to heat recovery of exhaust gases during operation of furnaces, boilers, dryers with the help of a plate heat exchanger. With the help of 3D-modeling design of heat recovery unit with replaceable modules on the basis of thin plates was carried out, geometric characteristics of heat exchanger, its shape and thickness of sheets, scheme of heat carriers movement, temperature and speed of incoming and outgoing heat carriers, heat transfer coefficients for different air velocities were determined. The obtained data were verified during full-scale tests of the manufactured device on the assembled stand for this purpose. The heat exchanger has shown good results, it can be recommended for use in work at relevant facilities.

Keywords: heat exchanger, plate exchanger, heat carriers, replaceable modules

Введение. Авторами статьи ранее были проведены исследования существующих конструкций теплообменников утилизаторов тепла [1]. Наибольший интерес с точки зрения изготовления и эксплуатации, в случае небольшой тепловой мощности (до 100 кВт), представляют теплообменники рекуперативного типа [2–4].

Рекуператор – это теплообменный аппарат, работающий в условиях, близких к стационарному тепловому состоянию, в котором теплообмен между теплоносителями осуществляется непрерывно через разделительную стенку [5].

Изучение существующих конструкций рекуперативных теплообменников позволило нам сделать вывод о целесообразности разработки теплоутилизатора на основе пластинчатого теплообменника, основными достоинствами которого являются: при производстве можно использовать относительно недорогие материалы и технологии по сравнению с другими конструкциями; малозатратная эксплуатация.

Большинство известных теплоутилизаторов рассчитано на работу с большими тепловыми мощностями (от нескольких сотен до нескольких тысяч киловатт). Для меньших мощностей утилизаторы практически отсутствуют.

Так, известен утилизатор тепла отходящих газов для промышленного применения фирмы Опекс [6], отличающийся более мелкой сеткой и мелким шагом между щелями теплообменника, а также увеличенными размерами. Данный теплообменник создаёт большие сопротивления движению воздуха, для чего требуется установка дополнительных вентиляторов. Также у данной модели присутствует пошаговое глубокое охлаждение отработанных газов до 50°C, не представлены мероприятия по утилизации едкого конденсата, кроме осушения отработанных газов.

Теплоутилизатор для глубокой утилизации тепла дымовых газов поверхностного типа [7] рассчитан на утилизацию продукта горения кот-

лов, работающих на твёрдом сернистом топливе, и отличается сложностью конструкции. Следует отметить, что авторами патента на изобретение разработан узел утилизации конденсата, что делает эту установку безопасной при использовании. Конструкция теплообменника имеет много ходов и загибов, что приводит к повышенным значениям гидравлических сопротивлений, преодолеть которые необходимо будет с затратой электроэнергии на работу дутьевых вентиляторов.

Цель нашего исследования – разработать эффективный пластинчатый теплообменник мощностью до 100 кВт для использования тепла уходящих дымовых газов при работе различных печей, котлов, сушилок путём нагрева холодного воздуха, без прямого контакта с дымовыми газами, для дальнейшего безопасного использования при обогреве помещений.

Результаты и обсуждение. Для достижения поставленной цели нами проведено несколько численных трёхмерных моделирований [8], в ходе которых определены такие параметры, как: конструкция теплообменника, форма и толщина листов, схема движения теплоносителей, температуры и скорости входящих и выходящих теплоносителей (рис. 1). Особый интерес в данном моделировании представляют коэффициент теплопередачи λ и коэффициенты теплоотдачи α , которые рассчитываются исходя из полученных опытных данных (табл. 1). Коэффициенты показывают работоспособность теплообменника. Для того чтобы верифицировать полученные данные, необходимо провести ряд натурных испытаний, по результатам которых можно сделать вывод о пригодности теплообменника к работе с подтверждением его характеристик.

С этой целью нами был спроектирован и изготовлен образец теплоутилизатора, который состоит из теплообменника 1, отверстий 2 для входящих холодного и горячего теплоносителей и труб 3 для выходящих теплоносителей (рис. 2). Схема движения теплоносителей показана на опытном

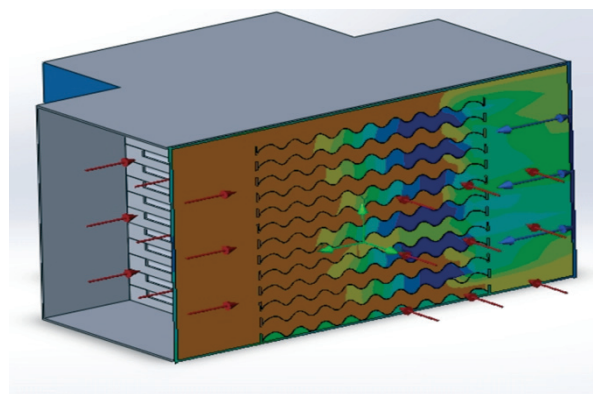


Рисунок 1 – 3D-модель (в разрезе) пластинчатого теплоутилизатора

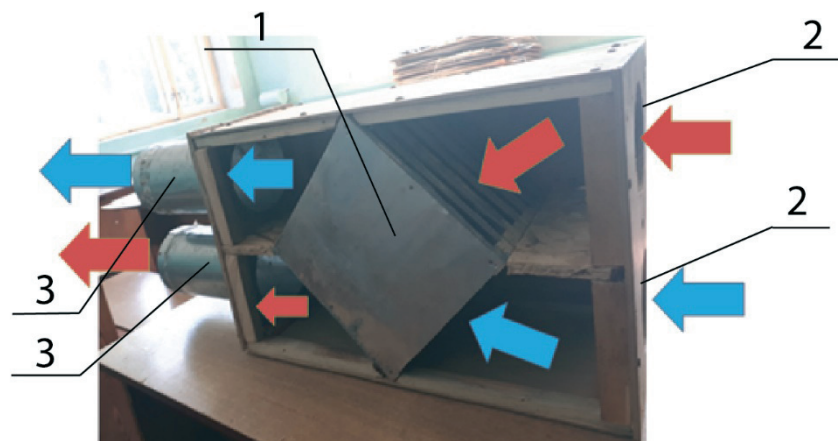


Рисунок 2 – Теплоутилизатор с перекрёстным движением теплоносителей, разработанный на базе ФГБОУ ВО Ярославская ГСХА

образце. Горячий и холодный теплоносители направляются на отдельные входы теплообменника 1. Интенсивность передачи тепла осуществляется за счёт использования тонких алюминиевых пластин, которые легко нагреть отработанными газами. Холодный теплоноситель забирает тепло от нагретых пластин и направляется для обогрева помещений. Получаемое тепло является бесплатным добавочным и безопасным, поскольку горячий и холодный теплоносители непосредственно друг с другом не контактируют, а теплообмен разделён стенками теплообменника.

Для проведения натурных испытаний теплоутилизатора был собран испытательный стенд (рис. 3), на котором представлены: 1 – источник тепла (тепловая пушка мощностью 3 кВт); 2 – вентилятор, обеспечивающий подачу холодного воздуха; 3 – теплоутилизатор.

Испытания проводились в несколько этапов с изменением одного параметра с равным шагом для определения его влияния на теплоотдачу теплоутилизатора, при этом остальные параметры

не изменялись. Изменяемым параметром являлась скорость входящего холодного теплоносителя. Это обеспечивалось путём изменения положения заслонки вентилятора 2. Интервал времени (t) каждого измерения составлял около 2 мин. Результаты представлены в таблице 2.

При сравнении коэффициентов теплоотдачи α (табл. 1 и 2) можно сделать вывод о том, что натурный образец показал результаты лучше, чем это предполагалось при численном моделировании. Коэффициент теплоотдачи характеризует интенсивность теплообмена на границе стенки. По данному коэффициенту можно сделать вывод о хорошей работоспособности теплообменника и возможности его применения на рабочих объектах.

Теплообменник может быть изготовлен несколькими способами: с использованием штамповки, сварочных и клеевых технологий.

Выбор сварочной или клеевой технологии во многом зависит от температурного режима работы теплообменника: при высоких температурах необ-



1 – тепловая пушка, 3 кВт; 2 – вентилятор холодного воздуха; 3 – теплоутилизатор.

Рисунок 3 – Испытательный стенд

Таблица 1 – Данные, полученные численным моделированием

Показатель	Значение показателя				
Температура пластин (t), °C	206	172	149	132	121
Температура горячего воздуха (t), °C	252,0	247,4	245,0	243,0	243,0
Температура холодного воздуха (t), °C	60,0	43,7	37,3	34,0	31,5
Скорость горячего воздуха, м/с	1	2	3	4	5
Скорость холодного воздуха, м/с	5	5	5	5	5
Количество тепла, отданное холодному воздуху (Q), кВт	8,89140	16,89583	22,54106	26,69814	30,70387
Коэффициент теплоотдачи холодного воздуха (α), Вт/м ² К	60,90	131,69	201,80	272,43	343,06
Теплоёмкость холодного воздуха (Cp), кДж/кг К	1,015	1,013	1,009	1,009	1,009
Коэффициент теплопередачи холодного воздуха (λ), Вт/(м·К)	3,50	3,49	3,34	3,21	3,13
Массовый расход холодного воздуха (G), кг/с	0,06	0,13	0,20	0,27	0,34
Кинематическая вязкость холодного воздуха (ν), м ² /с	0,00001897	0,000017	0,000017	0,000017	0,000017
Критерий Nu холодного воздуха	29,5800	64,14699	102,7126	144,2776	186,3265
Критерий Re холодного воздуха	2419	4900	7253	9699	11993

ходима сварка, а при относительно низких можно использовать клеевые технологии. Изображённый на рисунке 4 теплообменный модуль собран с помощью пластин и проставок, образующих щели

для прохода горячего и холодного теплоносителей.

Другой вариант изготовления теплообменных модулей – вырубка из листа с последующей

Таблица 2 – Данные, полученные при проведении натурных испытаний

Показатель	Значение показателя				
Скорость горячих газов, м/с	2,4	2,4	2,5	2,5	2,5
Скорость холодных газов, м/с	4,3	5,7	6,6	7,1	7,2
Температура на входе горячих газов, °C	22,0	22,2	22,3	22,3	22,3
Температура на входе холодных газов, °C	22,0	22,2	22,3	22,3	22,3
Температура на выходе горячих газов, °C	61	58	52	51	51
Температура на выходе холодных газов, °C	31,0	30,5	29,0	29,0	29,0
Диаметр на выходе, мм	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
Количество тепла, отданное холодному воздуху (Q), кВт	5,98	7,29	6,79	7,30	7,40
Коэффициент теплоотдачи холодного воздуха (α), Вт/м ² К	199,3	265,3	295,3	332,1	336,8
Теплоёмкость холодного воздуха (Cp), кДж/ кг К	1,015	1,013	1,009	1,009	1,009
Коэффициент теплопередачи холодного воздуха (λ), Вт/(м·К)	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8
Массовый расход холодного воздуха (G), кг/с	0,65	0,86	1,00	1,08	1,09
Кинематическая вязкость холодного воздуха (ν), м ² /с	0,000015	0,000015	0,000015	0,000015	0,000015
Критерий Nu холодного воздуха	121,03	161,09	179,30	201,60	204,51
Критерий Re холодного воздуха	4853	6434	7450	8014	8127
Количество тепла, отданного горячим воздухом (Q), кВт	25,92	31,47	30,11	31,30	31,74

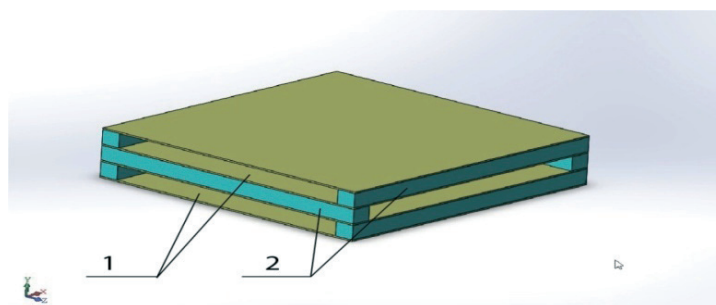
Результаты испытаний опытного образца пластинчатого теплообменника утилизатора и возможные технологии его изготовления

гибкой (рис. 5). Благодаря использованию такой технологии можно получить модуль из нескольких пластин без сварки и клеевых технологий.

Для изготовления модуля теплообменника рекомендуется использовать недорогие сплавы алюминия в виде тонких листов (менее 1,5 мм).

При использовании теплоутилизатора при съёме тепла с продукта горения различных печей, котлов, сушилок необходимо увеличить размер пластин теплообменника примерно до 700х700 мм для получения большей выходной мощности и, соответственно, большего объёма нагретого воздуха. Для сравнения, при испытаниях размеры пластин составляли 200х200 мм, а выходная мощность

в среднем 6,5 кВт. Размер щелей рекомендуется делать не менее 40...50 мм, для уменьшения гидравлического сопротивления. Для повышения тепловой мощности целесообразно использовать несколько теплообменников, причём последовательно устанавливать рекомендуется не более двух (для уменьшения гидравлического сопротивления), а параллельно – такое их количество, при котором тепловая мощность не будет превышать 50% от тепловой мощности печи, чтобы избежать снижения температуры отработанных газов ниже точки росы. В противном случае выпадет конденсат с концентрированными едкими веществами, для удаления которого необходимо будет



1 – пластины; 2 – проставки.

Рисунок 4 – Элемент теплообменного модуля

проводить специальные мероприятия. Следует отметить, что при параллельном присоединении теплоутилизатора к выходной трубе печи гидравлическое сопротивление, создаваемое теплообменниками, не суммируется, а определяется по максимальному значению, создаваемому одним из теплообменников, при этом общая тепловая мощность теплоутилизатора увеличивается пропорционально числу смонтированных теплообменников.

На основании анализа данных, полученных при проведении натурных и численных испытаний, авторы подали заявку на полезную модель конструкции теплоутилизатора [9].

Выводы. Авторами представлена модель опытного образца пластинчатого теплоутилизатора отработанных газов для различных теплогенерирующих устройств, в том числе для хлебопекарно-кондитерских печей. Проектирование данного устройства было выполнено с помощью 3D-моделирования. В ходе проведения численных испытаний нами определены геометрические характеристики теплообменника, его форма и толщина листов, схема движения теплоносителей, температуры и скорости входящих и выходящих теплоносителей, коэффициенты теплоотдачи (α) для различных скоростей воздуха. Для верифи-

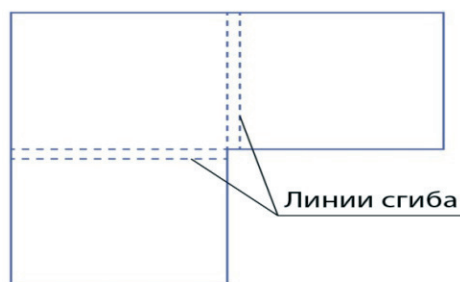


Рисунок 5 – Выкройка элемента модуля теплообменника

кации полученных данных проведены натурные испытания, для чего был изготовлен теплоутилизатор и собран испытательный стенд. Теплоутилизатор показал хорошие результаты, на основании чего можно рекомендовать его для использования в работе на соответствующих объектах. Авторы предлагают способы его изготовления и варианты компоновки для применения на объектах.

Рекомендуется увеличить размеры пластин до 700x700, при этом не сужать проходные щели, теплообменники устанавливать последовательно не более двух, а параллельно – таким образом, чтобы суммарная мощность теплообменников теплоутилизатора не превышала 50% мощности печи, от продукта горения которой снимается тепло во избежание возможного конденсирования газов.

Список источников

1. Козлов, Н. А. Способы утилизации тепла / Н. А. Козлов, Р. Д. Адакин, Е. В. Уткин, О. Г. Несиоловский. – Текст : непосредственный // История и перспективы развития транспорта на севере России. – 2020. – № 1. – С. 125–129.
2. O'Connor, D. A novel heat recovery device for passive ventilation systems : PhD thesis ; University of Sheffield / D. O'Connor. – URL: [http://etheses.whiterose.ac.uk/15904/1/A Novel Heat Recovery Device for Passive Ventilation Systems.pdf](http://etheses.whiterose.ac.uk/15904/1/A%20Novel%20Heat%20Recovery%20Device%20for%20Passive%20Ventilation%20Systems.pdf). (дата обращения: 20.07.2021). – Текст : электронный.
3. Meng, Yang Energy efficiency performance enhancement of industrial conventional wood drying kiln by adding forced ventilation and waste heat recovery system: A comparative study / Yang Meng, Guangyuan Chen, Gonghua Hong, Mingjie Wang, Jianmin Gao, Yao Chen // Maderas: Ciencia y Tecnologia. – 2019. – URL: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/7083206.pdf> (дата обращения: 21.07.2021). – Текст : электронный.
4. Ahmad, Mardiana Idayu Novel heat recovery systems for building applications : PhD thesis ; University of Nottingham / Mardiana Idayu Ahmad. – URL: <http://eprints.nottingham.ac.uk/13852/1/546574.pdf> (дата обращения: 25.07.2021). – Текст : электронный.
5. Черноногова, И. В. Варианты систем для утилизации теплоты теплогенерирующих установок малой мощности / И. В. Черноногова, О. Г. Несиоловский. – Текст : непосредственный // Инновационный путь развития АПК : сборник научных трудов по материалам XXXIX Международной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава. – Ярославль : Изд-во ФГБОУ ВО Ярославская ГСХА, 2016. – С. 16–19. – ISBN 978-5-98914-163-0.
6. Утилизатор тепла отходящих газов (промышленного применения). – URL: <https://opeks.energy/utilizator-tepla-otxodyashix-gazov-promyshlennogo-primeneniya/> (дата обращения: 16.06.2021). – Текст : электронный.
7. Патент 2555919 C1 Российская Федерация, МПК F22B 1/18(2006.01). Теплоутилизатор для глубокой утилизации тепла дымовых газов поверхностного типа и способ его работы : № 2014113843/06 : заявл. 04.08.2014 ; опубликовано 07.10.2015 / Гофрин О. С., Зюзин Б. Ф. ; патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тверской государственный технический университет». – Текст : непосредственный.
8. Несиоловский, О. Г. Численное моделирование процессов в пластинчатом теплообменнике-утилизаторе / О. Г. Несиоловский, Н. А. Козлов, Р. Д. Адакин, Е. В. Уткин // История и перспективы развития транспорта на севере России. – 2019. – № 1. – 93–96.
9. Пластинчатый теплообменник утилизатор малой тепловой мощности : № 2020126343: заявл. 04.08.2020 / Уткин Е. В., Несиоловский О. Г., Адакин Р. Д., Козлов Н. А. – Текст : непосредственный.

References

1. Kozlov, N. A. Sposoby utilizacii tepla / N. A. Kozlov, R. D. Adakin, E. V. Utkin, O. G. Nesiolovskij. – Tekst : neposredstvennyj // Istorija i perspektivy razvitija transporta na severe Rossii. – 2020. – № 1. – S. 125–129.
2. O'Connor, D. A novel heat recovery device for passive ventilation systems : PhD thesis ; University of Sheffield / D. O'Connor. – URL: [http://etheses.whiterose.ac.uk/15904/1/A Novel Heat Recovery Device for Passive Ventilation Systems.pdf](http://etheses.whiterose.ac.uk/15904/1/A%20Novel%20Heat%20Recovery%20Device%20for%20Passive%20Ventilation%20Systems.pdf). (data obrashhenija: 20.07.2021). – Tekst : jelektronnyj.
3. Meng, Yang Energy efficiency performance enhancement of industrial conventional wood drying kiln by adding forced ventilation and waste heat recovery system: A comparative study / Yang Meng, Guangyuan Chen, Gonghua Hong, Mingjie Wang, Jianmin Gao, Yao Chen // Maderas: Ciencia y Tecnologia. – 2019. – URL: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/7083206.pdf> (data obrashhenija: 21.07.2021). – Tekst : jelektronnyj.
4. Ahmad, Mardiana Idayu Novel heat recovery systems for building applications : PhD thesis ; University of Nottingham / Mardiana Idayu Ahmad. – URL: <http://eprints.nottingham.ac.uk/13852/1/546574.pdf> (data obrashhenija: 25.07.2021). – Tekst : jelektronnyj.

5. Chernonogova, I. V. Varianty sistem dlja utilizacii teploty teplogenerirujushhih ustanovok maloj moshhnosti / I. V. Chernonogova, O. G. Nesiolovskij. – Tekst : neposredstvennyj // Innovacionnyj put' razvitija APK : sbornik nauchnyh trudov po materialam XXXIX Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii professorsko-prepodavatel'skogo sostava. – Jaroslavl' : Izd-vo FGBOU VO Jaroslavskaja GSHA, 2016. – S. 16–19. – ISBN 978-5-98914-163-0.

6. Utilizator tepla othodjashhih gazov (promyshlennogo primeneniya). – URL: <https://opeks.energy/utilizator-tepla-otxodyashhih-gazov-promyshlennogo-primeneniya/> (data obrashhenija: 16.06.2021). – Tekst : jelektronnyj.

7. Patent 2555919 C1 Rossijskaja Federacija, MPK F22B 1/18(2006.01). Teploutilizator dlja glubokoj utilizacii tepla dymovyh gazov poverhnostnogo tipa i sposob ego raboty : № 2014113843/06 : zajavl. 04.08.2014 ; opublikovano 07.10.2015 / Gofrin O. S., Zyuzin B. F. ; patentoobladatel' Federal'noe gosudarstvennoe bjudzhetnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego professional'nogo obrazovanija «Tverskoj gosudarstvennyj tehničeskij universitet». – Tekst : neposredstvennyj.

8. Nesiolovskij, O. G. Chislennoe modelirovanie processov v plastinchatom teploobmennike-utilizatore / O. G. Nesiolovskij, N. A. Kozlov, R. D. Adakin, E. V. Utkin // Istorija i perspektivy razvitija transporta na severe Ros-sii. – 2019. – № 1. – 93–96.

9. Plastinchatyj teploobmennik utilizator maloj teplovoj moshhnosti : № 2020126343: zajavl. 04.08.2020 / Utkin E. V., Nesiolovskij O. G., Adakin R. D., Kozlov N. A. – Tekst : neposredstvennyj.

Сведения об авторах

Татьяна Николаевна Несиоловская – доктор технических наук, профессор кафедры управления предприятием, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ярославский государственный технический университет», spin-код: 2060-3887.

Роман Дмитриевич Адакин – доцент кафедры технического сервиса, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ярославская государственная сельскохозяйственная академия», spin-код: 2792-4702.

Евгений Владимирович Уткин – магистрант агротехнологического факультета, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ярославская государственная сельскохозяйственная академия».

Information about the authors

Tatyana N. Nesiolovskaya – Doctor of Technical Science, Professor of the Department of Enterprise Management, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Yaroslavl State Technical University", spin-code: 2060-3887.

Roman D. Adakin – Associate Professor of the Department of Technical Service, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Yaroslavl State Agricultural Academy", spin-code: 2792-4702.

Evgeniy V. Utkin – Master's Degree Student of Agrotechnological faculty, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Yaroslavl State Agricultural Academy".

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.