

ПРИМЕНЕНИЕ АБЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ КАБИН ЛЕСОПОЖАРНЫХ МАШИН

доктор технических наук, профессор **В.Д. Котенко**¹

доктор технических наук **В.В. Абразумов**²

кандидат технических наук, доцент **М.Г. Ермоченков**¹

1 – Мытищинский филиал ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», г. Мытищи, Российская Федерация

2 – «МЦК – Техникум им. С.П. Королева», г. Королев, Российская Федерация

Лесные пожары сопровождаются выделением огромного количества теплоты, а температура у кромки лесного пожара, где обычно работает лесопожарная техника, достигает 300...700 °С. На тушении лесных пожаров лесопожарные машины подвергаются интенсивному тепловому воздействию. Основным требованием к конструкции таких машин является наличие рациональной тепловой защиты. Исследования различных методов тепловой защиты кабин лесопожарных машин показали возможность снижения температуры на внутренней поверхности кабины, но практического применения эти методы не нашли из-за их низкой эффективности. Не предусматривается защита кабин от теплового излучения и в новых разработках лесопожарных машин. В работе предлагается использовать для защиты кабин лесопожарных машин покрытия на основе препрегов, успешно применяющиеся в конструкциях космических аппаратов. Новые технологии производства таких материалов, разработанные в последнее время, значительно удешевили производство этих материалов, что расширяет возможности их применения для другой техники, подвергающейся интенсивному тепловому воздействию. Расчёты показали, что теплозащитные покрытия кабин лесопожарных машин, изготовленные из препрегов, достаточно быстро прогреваются до допустимых температур, но использование запасов воды, находящейся в цистерне машины, для охлаждения внутренней поверхности кабин обеспечивает высокую эффективность защиты даже при предельных значениях тепловых потоков, возникающих в очаге лесного пожара. При этом вода не расходуется, она подогревается, циркулируя между цистерной и теплообменным аппаратом. Предлагаемый способ защиты кабин лесопожарных машин от теплового излучения является оригинальным и подлежит дальнейшей разработке.

Ключевые слова: лесопожарная машина, тепловой поток, теплозащитное покрытие, температура поверхностей, защищаемая поверхность

APPLICATION OF ABLATION MATERIALS FOR HEAT PROTECTION OF CABINS OF FIRE-FIGHTING MACHINES

DSc (Engineering), Professor **V.D. Kotenko**

DSc (Engineering), **V.V. Abrazumov**

PhD (Engineering), Associate Professor **M.G. Ermochenkov**

1 – Mytischki Branch (MB) of FSBEI HE "Bauman Moscow State Technical University",
Mytischki, Russian Federation

2 – FAEI of the Moscow region Interregional Centre of Competence – College of S.P. Korolev,
Korolev, Russian Federation

Abstract

Forest fires are accompanied by the release of a huge amount of heat, and the temperature at the edge of a forest fire, where firefighting equipment usually operates, reaches 300-700 °C. Fire engines are exposed to intense heat to extinguish forest fires. The main requirement for the design of such machines is the availability of rational thermal protection. Studies of various methods of thermal protection of cabins have showed the possibility of lowering the temperature on the inner surface of the cabin, but these methods show low efficiency. Protection of cabs from thermal radiation is not provided in the new developments of forest fire machines. It is proposed to use pre-preg coatings to protect cabins of forest fire engines. They are successfully used in spacecraft designs. Recent technologies for the production of such materials, developed recently, have significantly reduced the cost of production of these materials. It expands the possibilities of their application for other equipment subjected to intense heat exposure. The calculations have showed that the heat-protective coatings of the cabins made of pre-pregs quickly warm up to acceptable temperatures. However the use of water reserves in the tank of the car to cool the inside of the cabs provides high protection efficiency even at the limiting values of heat fluxes that occur in the fireplace. At the same time, water is not consumed; it is heated, circulating between the tank and the heat exchanger. The proposed method of protecting cabs of fire machines from thermal radiation is original one. It is a subject of further development.

Keywords: firefighting machine, heat flux, heat protection coating, surface temperature, protected surface

Введение

Лесные пожары ежегодно наносят огромный урон не только лесам и лесному хозяйству, но и требуют значительных финансовых затрат как на тушение пожаров, так и на восстановительные работы после пожаров.

Создание и усовершенствование лесной инфраструктуры (лесные дороги, противопожарные просеки, точки водоснабжения и лесохозяйственные мероприятия), является основой для профилактики лесных пожаров [1], а при тушении лесных пожаров – использование эффективной лесопожарной техники.

В непосредственной близости от кромки лесного пожара при верховых пожарах, где обычно работает лесопожарная техника, температура может достигать 300...700 °C, а тепловые потоки в

очаге лесного пожара составляют от 1,2 до 12 кВт/м². В зоне крупных лесных пожаров они достигают 100 – 200 кВт/м², при этом выделяется огромное количество теплоты – до $12,27 \cdot 10^{10}$ Дж/га. Пребывание пожарных в зоне подобных тепловых потоков недопустимо, так как может привести к ожогам кожи второй степени или смертельному исходу через несколько секунд.

При тушении лесных пожаров используются различные технические средства. Парк технических средств для тушения лесных пожаров постоянно пополняется современными техническими новинками, использующими новейшие разработки науки и техники.

В работе [2] анализируются технические новинки в последних разработках лесопожарных

машин зарубежными и отечественными фирмами, к которым относятся:

- спутниковая связь для коммуникации с другими пожарными автомобилями или штаб-квартирой;
- светодиодная система для освещения [3];
- дистанционное управление оператором при помощи пульта и наблюдение за местностью при помощи лазерных стереокамер;
- устройства для фрезерования почвы и продуктов сгорания древесины и забрасывания ими участков горения [4];
- применение насосов высокого давления [5];
- комплектация устройствами для заправки огнетушащей жидкостью ранцевых огнетушителей [6] и др.

Защита кабин в новых разработках лесопожарных машин, в которых находится пожарный расчёт, от интенсивного теплового воздействия не предусматривается.

Тепловое излучение является преобладающим фактором при работе машины на тушении лесных пожаров, в связи с чем эти машины должны иметь рациональную тепловую защиту.

Исследования тепловой защиты в виде отражающих и металлизированных плёнок, нанесённых на внешнюю поверхность машины, а также экранирование воздушной прослойки между обшивкой кузова и материалом внутренней отделки салона автомобиля асбестовым полотном толщиной 2 мм ПЭТФ плёнкой, показали, что с помощью этих методов обеспечивается понижение температуры на внутренних поверхностях кабины [7]. Однако практического применения эти методы защиты кабин лесопожарных машин от интенсивного теплового излучения не нашли, поскольку ПЭТФ плёнка разрушается при температуре 180°C.

Тепловая защита, основанная на испарении воды, стекающей по поверхности автомобиля или распыленной вокруг него в виде аэрозоли, также не нашла практического применения по причине невозможности защитить от теплового воздействия сложную конструкцию машин и образования парового облака, затрудняющего дыхание.

Материалы и методы для эффективной защиты от теплового излучения кабин лесопожарных машин. Эффективная теплозащита кабин лесопожарных машин может быть обеспечена использованием в их конструкциях абляционных материалов, которые успешно применяются для тепловой защиты аэрокосмических аппаратов. Это полимерные композиционные материалы, детали из которых изготавливают автоклавным формованием или прессованием многослойных препрегов. Препреги получают пропиткой многослойных вязально-прошивных полотен (толщиной до 24 мм) из кремнезёмных и кремнезёмно-капроновых тканей растворами фенолформальдегидной смолы в этиловом спирте (бакелитовый лак) с последующим удалением растворителя сушкой до требуемых значений, что обеспечивает им хорошие драпировочные свойства. Все материалы, используемые для изготовления препрегов, отечественного производства.

Тепловая защита, изготовленная из абляционных материалов и размещённая на внешней поверхности защищаемого аппарата, при высокой температуре набегающего потока постепенно сгорает, разрушается и уносится потоком газа. Этот процесс термодеструкции, который аналогичен процессу термодеструкции нагреваемой древесины [8, 9, 10], сопровождается отводом большого количества теплоты из поверхностных слоёв материала, что ограничивает тепловой поток в защищаемый аппарат.

Изготовление многослойных препрегов достаточно сложная и дорогостоящая технология. Однако, последние исследования в области производства таких материалов, проведённые учёными МФ МГТУ им. Н.Э. Баумана совместно с сотрудниками ЗАО «ЗЭМ» РКК «Энергия», позволили разработать [11] и запатентовать [12] принципиально новую вакуумную технологию изготовления многослойных препрегов. Вакуумная технология существенно снижает затраты на производство многослойных препрегов, делает её безотходной и экологически чистой, что открывает возможности для применения абляционных материалов и в другой технике, подвергающейся в

процессе работы интенсивному тепловому воздействию, в том числе для тепловой защиты кабин лесопожарных машин.

Результаты и обсуждение

Ниже на основе расчётов производится анализ возможности применения абляционных материалов для защиты от теплового воздействия кабин в лесопожарных машинах.

При проведении расчётов принималось, что изготовленные из многослойных препрегов теплозащитные покрытия имеют следующие свойства: теплопроводность $\lambda = 0,367$ Вт/(м·К), удельная теплоёмкость $c = 963$ Дж/(кг·К), плотность $\rho = 1715$ кг/м³, толщина $\delta = 0,024$ м (24 мм).

При расчётах использовалась следующая система дифференциальных уравнений, описывающая тепломассообмен в теплозащитном материале [13, 14]:

– уравнение переноса энергии

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \operatorname{div} (q^\lambda + q^k) + \frac{\partial \rho}{\partial \tau} U,$$

где T – температура, К; τ – время, с; q^λ – поток теплоты за счет теплопроводности, Вт/м²; q^k – конвективный поток теплоты за счет переноса газовой фазы, Вт/м²; U – тепловой эффект процесса термодеструкции, Дж/кг;

– уравнение переноса массы в твердой фазе

$$\frac{\partial \rho_1}{\partial \tau} = - \sum_{\gamma_1}^{n_1} \sum_{\psi_1}^{m_1} \frac{\partial \rho_{\gamma_1, \psi_1}}{\partial \tau},$$

где n и γ – количество и номер компонента композиционного материала соответственно; m и ψ – количество и номер стадии термодеструкции соответственно;

– уравнение переноса газовой фазы

$$\frac{\partial \rho_2}{\partial \tau} = \operatorname{div} (q^{\text{конв}} + q^D) + \frac{d\rho_2}{d\tau},$$

где $q^{\text{конв}}$ и q^D – конвективный и диффузионный потоки массы в материале; нижние индексы 1 и 2 относятся к твердой и газовой фазе соответственно.

Задача решалась с граничными условиями 1-го и 2-го рода. На внешней поверхности задавался тепловой поток (соответственно 1,2, 12 и

200 (100) кВт/м²), а на внутренней – температура поддерживается постоянной – 45°С (318К).

На рис. 1 представлены результаты расчётов температуры (а, б, в) и тепловых потоков (г) на внутренней поверхности ограждения при соответствующих значениях тепловых потоков на внешней поверхности ограждения.

Из анализа результатов расчёта следует, что при плотности тепловых потоков на внешней поверхности ограждения 1,2, 12 и 200 кВт/м² заданная температура на внутренней поверхности (45 °С) достигается через ~35 (рис. 1, а), 8 (рис. 1, б) и 4 (рис. 1, в) минуты соответственно.

Разрушение материала в наружном поверхностном слое (термодеструкция) зависит от времени действия и плотности теплового потока. При плотности теплового потока 1,2 и 12 кВт/м² термодеструкция в поверхностном слое не происходит, а при плотности теплового потока 100 кВт/м² термодеструкция в поверхностном слое начинается на ~20 минуте, что приводит к уменьшению коэффициента теплопроводности, следовательно, и к уменьшению теплового потока в защищаемую поверхность (рис. 1, г). При плотности теплового потока 200 кВт/м² термодеструкция начинается сразу же. Чтобы уменьшить вероятность разрушения теплозащитного покрытия в дальнейших расчётах максимальная плотность теплового потока принималась равной 100 кВт/м². Тем не менее, повреждённые в результате термодеструкции элементы ограждения кабины должны допускать их замену.

Одним из вариантов увеличения времени работы покрытия является охлаждение её внутренней поверхности водой. Лесопожарные машины, как правило, оборудованы водяными баками. Так, лесопожарный агрегат Рубцовского УралВагонЗавода ЛПА-521 имеет бак (цистерну) ёмкостью 4 м³ [6]. Вода при этом не расходуется, а лишь циркулирует между цистерной и теплообменником, подогреваясь с 20 °С до 40 °С. На подогрев 1 кг воды расходуется 84000 Дж.

По плотности тепловых потоков на защищаемой поверхности (рис. 1, г) и количеству теплоты, затрачиваемой на подогрев 1 кг воды,

можно рассчитать расход воды для поддержания заданной температуры на этой поверхности (+45 °С), а также площадь поверхности при заданной продолжительности воздействия теплового потока на внешней поверхности. Результаты таких расчётов приведены в табл. 1.

Выводы

Анализ проведенных расчётов позволяет сделать следующие выводы:

- при падающем на внешнюю поверхность тепловом потоке $q_0 = 1,2 \text{ кВт/м}^2$ теплозащитное покрытие из абляционного материала может работать длительное время без охлаждения;

- при падающем на внешнюю поверхность тепловом потоке $q_0 = 12 \text{ кВт/м}^2$ защищаемую поверхность необходимо охлаждать водой, при этом четырех кубометров воды достаточно для защиты $19,5 \text{ м}^2$ поверхности в течение 1 часа или $9,7 \text{ м}^2$ в течение 2 часов;

- при падающем на внешнюю поверхность тепловом потоке $q_0 = 100 \text{ кВт/м}^2$ четырех кубометров воды достаточно для защиты $14,3 \text{ м}^2$

поверхности в течение 1-го часа или $7,1 \text{ м}^2$ в течение 2-х часов.

В расчётах принималось, что тепловой поток равномерно распределён по всей внешней поверхности. Кабины лесопожарных машин имеют сложную геометрическую форму, и только часть их поверхности будет подвергаться интенсивному тепловому воздействию, в связи с чем расход воды для охлаждения внутренней поверхности уменьшится. Это обстоятельство можно использовать для увеличения защищаемой поверхности или времени пребывания в зоне пожара.

Представленные расчёты указывают на целесообразность проведения дальнейших работ по применению абляционных материалов для защиты кабин лесопожарных машин от интенсивного теплового воздействия.

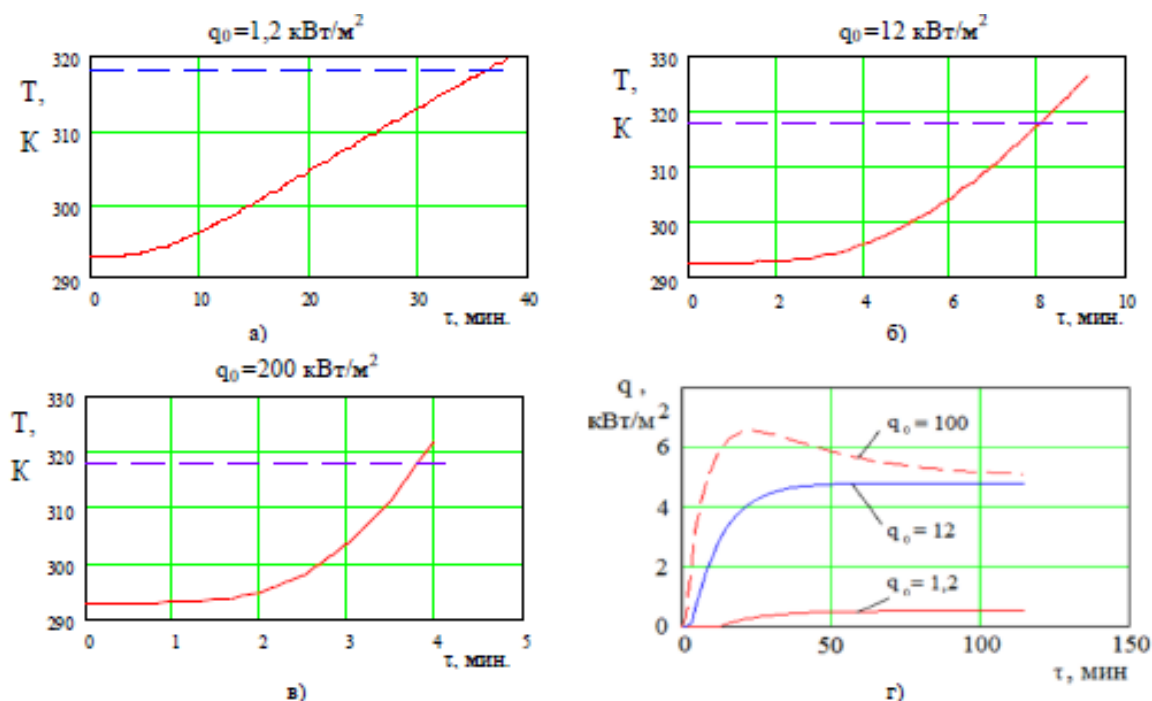


Рис. 1. Изменение температуры (а, б, в) и тепловых потоков (г) на внутренней поверхности ограждения при различных значениях тепловых потоков на внешней поверхности

Результаты расчетов расхода воды и площади защищаемой поверхности

Плотность теплового потока на внешней поверхности, кВт/м ²	Максимальная плотность теплового потока на защищаемой поверхности, кВт/м ²	Количество теплоты, подведённой к защищаемой поверхности, МДж/ч	Количество использованной охлаждающей воды, кг/(час·м ²)	Поверхность охлаждения при тепловом воздействии 1 час, м ²	Поверхность охлаждения при тепловом воздействии 2 час, м ²
1,2	0,509	1,83	21,8	183	91
12	4,795	17,26	205,4	19,5	9,7
100	6,549	23,58	280,7	14,3	7,1

Библиографический список

1. Воробьёв, Ю. Л. Лесные пожары на территории России: Состояние и проблемы, МЧС России / Ю. Л. Воробьёв, В. А. Акимов, Ю. И. Соколов. – М. : ДЭКС-ПРЕСС, 2004. – 312 с.
2. Тепловая защита для лесопожарных машин / В. В. Абразумов, И. В. Глебов, М. Г. Ермоченков [и др.] // Научные тенденции: Вопросы точных и технических наук: матер. XIV междунар. науч. конференции. – Санкт-Петербург, 2018. – С. 20–25.
3. Morita group – Morita new concept car. – URL: <http://www.morita119.com/en/innovation/awards/index.html>.
4. Mert, A. AUTONOMOUS FIREGUARD for Husqvarna / A. Mert. – URL: <http://aydinmert.net/>.
5. Ивеко МАГИРУС – Машины для тушения лесных пожаров. – URL: <http://www.magirus.ru/forest.shtml>.
6. Рубцовский филиал УВЗ. Лесопожарный агрегат ЛПА-521. – URL: <http://www.uvzrmz.ru/product/105/>.
7. Морозюк, Ю. В. Обеспечение безопасности пожарных машин от воздействия теплового облучения пожаров лесоскладов капельной водяной защитой : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01 / Ю.В. Морозюк. – Москва, 1994. – 25 с.
8. Heat and mass transfer in fry drying of wood / D. Grenier, P. Bohuon, J-M. Méot, D. Lecomte, H. Baillères // Drying Technology. – 2007. – № 25. – P. 211–218.
9. Esteves, B. Wood modification by heat treatment: a review / B. Esteves, H. Pereira // Bioresources. – 2009. – № 4 (1). – P. 370–404.
10. Calonego, W F. Decay resistance of thermally-modified Eucalyptus grandis wood at 140°C, 160°C, 180°C, 200°C and 220°C / W. F. Calonego, E. T. Durgante Severe, E. L. Furtado // Bioresour Technol. – 2010. – № 101. – P. 9391–9394.
11. Технология получения препрегов с высоким содержанием полимера / В. Д. Котенко, И. В. Сапожников, В. А. Романенко [и др.] // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. – 2013. – № 1 (93). – С. 77–81.
12. Патент 2484956, МПКВ29В15/10, МПКВ29В15/12, МПКС08J5/24. Способ изготовления препрега / В. В. Абразумов, В. Д. Котенко, Л. Н. Кузнецова, В. А. Пашенко, Е. В. Редянова, В. А. Романенко, И. В. Сапожников, А. Ф. Стрекалов, А. И. Терёхин ; заявитель и патентообладатель ЗАО «Завод экспериментального машиностроения Ракетно-космической корпорации «Энергия» им. С.П. Королёва». – № 2012112234/04: заявл. 29.03.2012; опубл. 20.06.2013.
13. Deliiski N. Modeling of thermal processes in the technologies for wood processing / N. Deliiski, L. Dzurenda ; Technikal University, Zvolen, 2010. – 224 p.
14. Hybrid integral transform solution for the analysis of drying in spherical capillary-porous solid based on Luikov equations with pressure gradient with pressure gradient / R. S. G. Conceicao, E. N. Macedob, L. B. D. Pereira, J. N. N. Quaresma // International Journal of Thermal Sciences. – 2013. – № 71. – P. 216–236.

References

1. Vorob'ev Yu.L., Akimov V.A., Sokolov Yu.I. *Lesnye požary na territorii Rossii: Sostoyanie i problemy. MChS Rossii* [Forest fires in Russia: Status and problems. Russian Emergency Situations Ministry]. M.: DEKS-PRESS, 2004. 312 p. (in Russian)
2. Abrazumov V.V., Glebov I.V., Ermochenkova M.G., Kotenko V.D., Sinyukov N.V. *Teplovaya zashchita dlya lesopozharnykh mashin* [Thermal protection for forest fire machines]. *Nauchnye tendentsii: Voprosy tochnykh i tekhnicheskikh nauk: materialy XIV mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii*. [Scientific trends: Questions of exact and technical sciences: materials of XIV international scientific conference]. St. Petersburg, 2018. Pp. 20-25 (in Russian).
3. Morita group – Morita new concept car. URL: <http://www.morita119.com/en/innovation/awards/index.html>.
4. Mert, A. AUTONOMOUS FIRE GUARD for Husqvarna. URL: <http://aydinmert.net>.
5. *Iveko MAGIRUS – Mashiny dlya tusheniya lesnykh požarov* [Forest Fire Fighting Machines]. URL: <http://www.magirus.ru/forest.shtml>. (in Russian)
6. *Rubtsovskiy filial UVZ. Lesopozharnyy agregat LPA-521*. URL: <http://www.uvzrmz.ru/product/105> (in Russian).
7. Morozyuk Yu.V. *Obespechenie bezopasnosti požarnykh mashin ot vozdeystviya teplovogo oblucheniya požarov lesoskladov kapel'noy vodyanoy zashchitoy* [Ensuring the safety of fire engines from the effects of heat exposure to forest fires in forest storage by dropping water protection]: avtoref. ... kand. tekhn. Nauk [Abstract. ... PhD thesis]: 05.26.01. Moscow, 1994. 25 p. (in Russian).
8. Grenier D., Bohuon P., Méot J-M., Lecomte D., Baillères H. (2007) Heat and mass transfer in fry drying of wood. *Drying Technology*. № 25. P. 211-218.
9. Esteves B., Pereira H. (2009) Wood modification by heat treatment: a review. *Bioresources*. № 4 (1). P. 370-404.
10. Calonego W.F., Durgante Severe E.T., Furtado E.L. (2010) Decay resistance of thermally-modified *Eucalyptus grandis* wood at 140°C, 160°C, 180°C, 200°C and 220°C. *Bioresour Technol*. № 101. P. 9391-9394.
11. Kotenko V.D., Sapozhnikov I.V., Romanenko V.A et al. (2013) *Tekhnologiya polucheniya prepregov s vysokim sodержaniem polimera* [High polymer prepreg technology]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoy vestnik* [Technology for producing prepregs with a high polymer content Bulletin of Moscow State Forest University – Lesnoy Herald]. No. 1(93). P. 77-81. (in Russian).
12. Patent 2484956, MPKV29V15/10, MPKV29I5/12, MPKS08J5/24. *Sposob izgotovleniya preprega* [The method of manufacture of prepreg] / V.V. Abrazumov, V.D. Kotenko, L.N. Kuznetsova, V.A. Pashchenko, E.V. Redyanova, V.A. Romanenko, I.V. Sapozhnikov, A.F. Strekalov, A.I. Terekhin.; заявитель i патентообладатель ZAO «Zavod eksperimental'nogo mashinostroeniya Raketno-kosmichkoy korporatsii «Energiya» im. S.P. Koroleva». – № 2012112234/04; заявл. 29.03.2012; opubl. 20.06.2013. (in Russian)
13. Deliiski N., Dzurenda L. Modeling of thermal processes in the technologies for wood processing. Technical University, Zvolen, 2010. 224 p.
14. Conceicao R. S. G., Macedob E. N., Pereira L. B. D., Quaresma J. N. N. (2013) Hybrid integral transform solution for the analysis of drying in spherical capillary-porous solid based on Luikov equations with pressure gradient with pressure gradient. *International Journal of Thermal Sciences*. № 71. P. 216-236.

Сведения об авторах

Котенко Владимир Дмитриевич – доктор технических наук, профессор кафедры ЛТ5 «Проектирование объектов лесного комплекса» Мытищинского филиала ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», г. Мытищи, Российская Федерация; e-mail: kotenko@mgul.ac.ru.

Абразумов Владимир Владимирович – доктор технических наук, преподаватель, «Межрегиональный центр компетенций – Техникум имени С.П. Королева», г. Королев, Российская Федерация; e-mail: vabrazumov@mail.ru.

Ермоchenков Михаил Геннадьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры ЛТ5 «Проектирование объектов лесного комплекса» Мытищинского филиала ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», г. Мытищи, Российская Федерация; e-mail:ermochenkov@mgul.ac.ru.

Information about authors

Kotenko Vladimir Dmitrievich – DSc (Engineering), Professor of the department LT5 "Design of forestry complex objects", Mytishchi Branch of Moscow State Technical University named after N.E.Bauman, Mytishchi, Russian Federation; e-mail: kotenko@mgul.ac.ru.

Abrazumov Vladimir Vladimirovich – DSc (Engineering), Lecturer, "Interregional Competence Center – Technical College named after S.P. Korolev", Korolev, Russian Federation; e-mail: vabrazumov@mail.ru.

Ermochenkov Mikhail Gennadievich – PhD (Engineering), Associate Professor of the department LT5 "Design of forestry complex objects", Mytishchi Branch of Moscow State Technical University named after N.E.Bauman, Mytishchi, Russian Federation; e-mail: ermochenkov@mgul.ac.ru.