

## ДИНАМИКА ИЗМЕНЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗМЕЛЬЧЕННЫХ ДРЕВЕСНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ДИСПЕРСНОЙ СИСТЕМЕ МАССИВА ПРИ КУЧЕВОМ ХРАНЕНИИ

доктор технических наук, профессор **В.И. Мелехов**  
старший преподаватель **А.Н. Деснев**  
старший преподаватель **В.Е. Данилов**  
кандидат технических наук **Т.В. Тюрикова**

ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова»,  
г. Архангельск, Российская Федерация

Хранение измельченных древесных материалов на лесоперерабатывающие предприятия осуществляется на открытых площадках в сформированных кучах, которые имеют различные формы и размеры. Недостатком при хранении древесиной массы таким способом является неконтролируемый самонагрев щепы до критических температур под воздействием термофильных микроорганизмов. При отсутствии должного контроля над процессом самонагревания теряется полезная масса древесины, в значительной степени ухудшается ее качество и появляется риск возгорания древесины. Для предотвращения негативных последствий необходимо из массива измельченного древесного материала отводить избыточную тепловую энергию в окружающую среду. Цель работы – исследование динамики количественных показателей теплофизических характеристик измельченных древесных материалов (технологической щепы, опилок, стружки, и коры) в среде массива насыпной кучи при хранении. При проведении работ использовали стандартные методы термического анализа, исследования проводили в лаборатории пожарно-технической экспертизы строительных и отделочных материалов и ЦКП НО «Арктика» С(А)ФУ имени М.В. Ломоносова. В результате получено математическое описание зависимости коэффициентов теплопроводности и теплоемкости измельченных древесных материалов от влажности и температуры, численные значения температур тления, воспламенения и самовоспламенения технологической щепы, опилок, отсева от щепы и коры. Результаты экспериментальных исследований применены для моделирования тепло-массообменных процессов в объектах хранения измельченной древесины и для совершенствования технологии безопасного хранения технологической щепы.

**Ключевые слова:** измельченная древесина, щепа, дисперсная система, теплопроводность и теплоемкость дисперсионной среды древесных материалов, температура тления, температура самовоспламенения

## DYNAMICS OF CHANGE OF THERMAL PHYSICAL CHARACTERISTICS OF MILLED WOOD MATERIALS IN A SOLID WOOD DISPERSION SYSTEM UNDER PILE STORAGE

DSc (Engineering), Professor **V.I. Melekhov**

Senior Lecturer **A.N. Desnev**

Senior Lecturer **V.E. Danilov**

PhD (Engineering) **T.V. Tiurikova**

FSAEI HE "Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov", Arkhangelsk, Russian Federation

### Abstract

Shredded wood materials are stored at wood processing enterprises in open areas in formed piles that have various shapes and sizes. The disadvantage of wood mass storage in this way is uncontrolled self-heating of wood chips to critical temperatures under the influence of thermophilic microorganisms. In the absence of proper control over the self-heating process, the useful mass of wood is lost, its quality is significantly deteriorated and there is a risk of wood burning. It is necessary to remove excess thermal energy from the array of ground wood material to prevent negative consequences. The purpose of the work is to study the dynamics of quantitative indicators of the thermophysical characteristics of chopped wood materials (wood chips, sawdust, shavings, and bark) in an environment of bulk pile during storage. During the work, standard thermal analysis methods have been used. The studies have been carried out in the laboratory of fire and technical expertise of building and finishing materials and the central design department of Common Use Center "Arctic", Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov. As a result, a mathematical description of the dependence of the coefficients of thermal conductivity and heat capacity of ground wood materials on humidity and temperature, numerical values of the temperatures of smoldering, ignition and self-ignition of technological wood chips, sawdust, screenings from wood chips and bark has been obtained. The results of experimental studies are used to simulate heat and mass transfer processes in the objects of storage of crushed wood and to improve the technology of safe storage of technological chips.

**Keywords:** chopped wood, wood chips, dispersed system, thermal conductivity and heat capacity of the dispersion medium of wood materials, smoldering temperature, autoignition temperature

В технологиях переработки древесины образуется сопутствующий продукт в виде измельченной древесины (щепы, опилки, стружки, и коры). При её неправильном хранении в массиве кучи щепы возникают неуправляемые биотермо-процессы приводящие к самовозгоранию, в результате чего ежегодно безвозвратно теряется значительный объем и существенно снижаются качественные характеристики материала. Необходимо из массива кучи измельченной древесины принудительно отводить избыточную тепловую энергию во внешнюю окружающую среду теплоотводящими устройствами с обязательным контролем и управлением процессом хранения. Разработка и практическая реализация эффективных мер по сохранности кондиционных характеристик технологической щепы в процессе

хранения её открытым способом требует комплексного учета всех факторов, которые оказывают влияние на процессы, протекающие в среде массива кучи щепы.

Массив кучи насыпных древесных материалов представляет собой сложную дисперсную систему и рассматривается нами как многофазная, многокомпонентная дисперсионная среда. Твердыми компонентами является фракция щепы, примеси и загрязнения. К газовым компонентам относятся элементы воздуха, содержащегося в массиве щепы между фракциями. Воздух вместе с частицами щепы является наиболее важным компонентом среды, поскольку их объемная и массовая доля значительна. Влага помимо пара в составе воздуха может присутствовать в виде свободной воды во фракции

щепы в связанном состоянии или в виде жидкой фазы на поверхности частиц щепы. Количество влаги в перечисленных состояниях оказывает ключевое влияние на процессы аккумуляции тепла в среде массива и отвода тепловой энергии из эпицентра нагрева через массив кучи во внешнюю окружающую среду.

На процессы выделения тепла (разогрев щепы в эпицентре) и отвода тепловой энергии существенно влияет насыпная плотность многокомпонентного материала, которая существенно неоднородна по объему кучи. Плотность многокомпонентной древесной смеси наряду с теплоемкостью и теплопроводностью, определяют значение коэффициента температуропроводности массива – основного параметра, характеризующего интенсивность теплообмена в среде смеси.

В научной литературе широко освещен вопрос о тепловых свойствах массивной древесины различных пород [2-7, 10]. Свойства измельченной древесины в дисперсной системе насыпной кучи изучены недостаточно [8, 9, 11].

Пространство между частицами измельченной древесины заполнено воздухом, обладающим отличными от нее теплотехническими свойствами. В массиве кучи между частицами древесины и воздухом происходит непрерывный тепло-массообмен. Значения коэффициентов теплопроводности и теплоемкости дисперсионной среды древесных материалов в массиве насыпной кучи существенно отличаются от значений, полученных для массивной древесины [2].

### Материалы и методы

В качестве исследуемого объекта приняты измельченные древесные материалы в дисперсной системе (технологическая щепка, опилки, отсев от щепы, кора) двух хвойных пород: сосны и ели, находящиеся в среде массива кучи.

Ортоборные порции фракции измельченной древесины предварительно высушили до постоянной массы и просеяли через стандартный набор сит. Полученные образцы фракции использованы для дальнейшего исследования. Для щепы размером 20, 10 и 5 мм; для опилок и отсева размером 3, 2 и 1 мм. В соответствии с методикой определения коэффициента теплопроводности

фракции выдерживали в сушильном шкафу Binder при температуре агента 40 °С, при достижении которой происходит активизация микробиологических процессов в дисперсной системе измельченной древесины, интенсифицируется саморазогрев массива кучи, и относительной влажности агента 100 %. Контроль итоговой влажности образцов фракции осуществляли анализатором влажности MS-70 термогравиметрическим методом.

Коэффициент теплопроводности образцов измельченных древесных материалов в дисперсной системе определяли в бьюксах на приборе МИТ-1 зондовым методом (ГОСТ 30256-94). Теплоемкость образцов измельченных древесных материалов в дисперсной системе определяли сканирующим калориметром DSC Q2000 методом дифференциального термического анализа. Температуру тления, воспламенения и самовоспламенения определяли на установке ОТП по ГОСТ 12.1.044-89.

### Результаты и их обсуждение

Математическое описание зависимости коэффициента теплопроводности измельченных древесных материалов в дисперсной системе массива кучи от влажности приведены в табл. 1. На рис. 1 представлена зависимость коэффициента теплопроводности образцов измельченных древесных материалов в дисперсной системе массива кучи от влажности среды.

В табл. 2 приведены температурные показатели термической безопасности измельченной древесины в дисперсной системе массива кучи при хранении открытым способом.

В результате анализа результатов экспериментальных исследований можно отметить:

- теплопроводность насыпных древесных материалов в среде массива кучи увеличивается прямо пропорционально повышению влажности среды;

- при  $W \approx 0$  %, наименьший коэффициент теплопроводности у щепы (ель) 0,0385 Вт/м·°К, наибольший у отсева (ель) 0,0518 Вт/м·°К;

- при увеличении  $W$  до 25 % коэффициент теплопроводности измельченной древесины повышается в 1,4...2,3 раза в сравнении с абсолютно сухим состоянием: наибольшее

увеличение наблюдается у отсева (ель), наименьшее у щепы (сосна);

- наименьшие показатели теплопроводности у технологической щепы сосны.

Теплоемкость измельченной древесины зависит от ее температуры, влажности и насыпной плотности в массиве кучи [2, 6].

Результаты экспериментальных исследований динамики изменения теплофизических характеристик измельченной древесины в дисперсной системе при кучевом хранении позволяют отметить что, с увеличением температуры до 70...90 °С, её теплоемкость нелинейно возрастает, а при дальнейшем повышении температуры уменьшается.

На рис. 2 приведены экспериментальные значения коэффициента теплоемкости  $C$ , кДж/(кг·°С) измельченных древесных материалов в дисперсной системе массива кучи от температуры  $T$ , °С. Оценивая характеристики измельченной древесины в дисперсной системе массива кучи установлено, что наибольшие значения коэффициентов теплоёмкости: у коры  $C = 4,46$  кДж/(кг·°С) при температуре 90 °С, у отсева от щепы  $C = 2,81$  кДж/(кг·°С) при температуре 76 °С, у опилок  $C = 2,25$  кДж/(кг·°С) при температуре 90 °С, у щепы  $C = 1,82$  кДж/(кг·°С) при  $T = 86$  °С.

В случае, когда темп аккумуляции тепла в центре насыпной кучи значительно превосходит скорость отвода тепла из массива в атмосферу температура в эпицентре кучи существенно возрастает и может достигнуть критических значений, при которых древесина деструктурируется, терморазлагается и самовозгорается.

Для оценки условий самовозгорания измельченных древесных материалов в среде массива кучи были экспериментально изучены температура тления, воспламенения и самовозгорания щепы, отсева от щепы, опилок и коры (табл. 2). При этом влажность образцов была приближена к влажности измельченных древесных материалов в практике хранения 40...60 %.

Наибольшая температура самовозгорания установлена у щепы сосны  $466,2 \pm 10,4$  °С наименьшая у коры сосны  $375,8 \pm 14,8$  °С. Температура тления в 1,6...2,2 раза меньше температуры самовозгорания.

В целом при проведении экспериментальных исследований относительная ошибка опытов не превышала 1,3...6,0 %, что свидетельствует о приемлемой точности полученных результатов.

Таблица 1

Коэффициент теплопроводности измельченной древесины в зависимости от влажности при кучевом хранении

№	Вид измельченного материала	Порода древесины	Математическое описание зависимости	$r^2$
1	щепа	сосна	$\lambda_{щ.с} = 0,0009W_{щ.с} + 0,0515$	0,77
2	щепа	ель	$\lambda_{щ.е} = 0,0013W_{щ.е} + 0,0385$	0,76
3	опилки	сосна	$\lambda_{о.с} = 0,0022 W_{о.с} + 0,0623$	0,99
4	опилки	ель	$\lambda_{о.е} = 0,0018 W_{о.е} + 0,0511$	0,97
5	отсев от щепы	ель	$\lambda_{от.е} = 0,0026W_{от.е} + 0,0518$	0,99
6	кора измельченная	ель	$\lambda_{к.е} = 0,0019 W_{к.е} + 0,0458$	0,90

*Источник: собственные вычисления (разработки)*

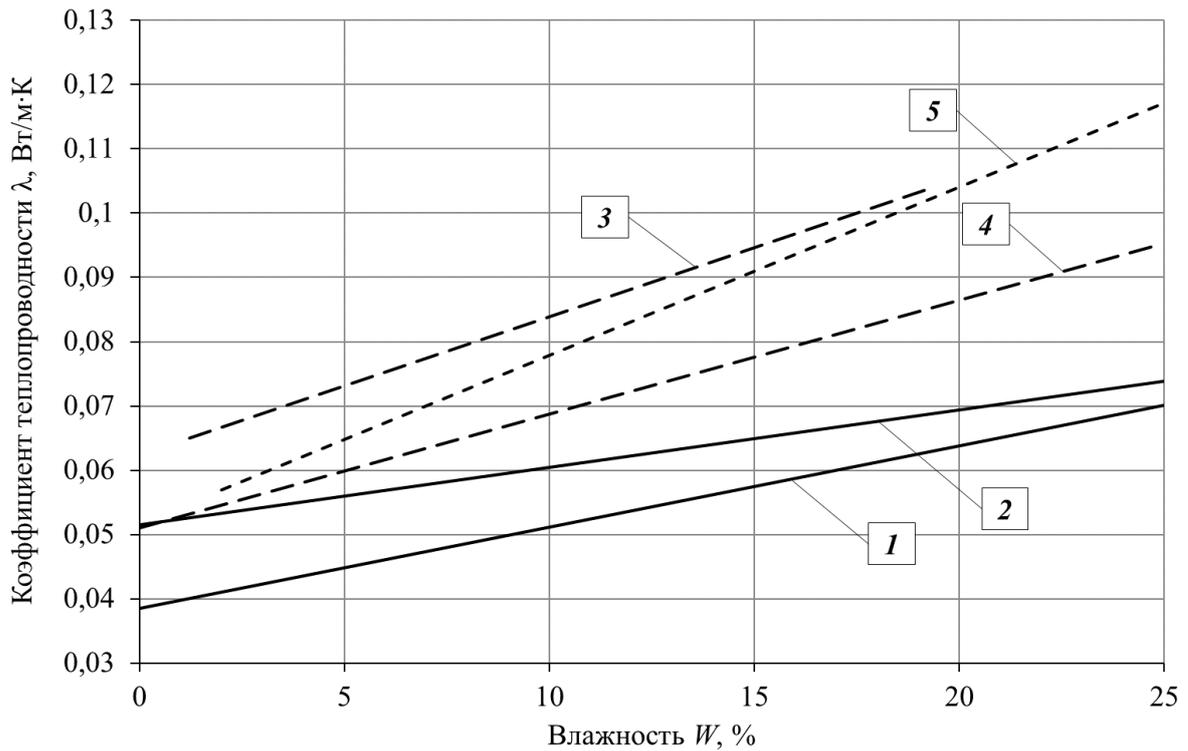


Рис. 1. Теплопроводность измельченных древесных материалов в зависимости от влажности при кучевом хранении: 1 – щепы (сосна); 2 – щепы (ель); 3 – опилки (сосна); 4 – опилки (ель); 5 – отсев от щепы (ель).  
 Источник: собственные вычисления (разработки)

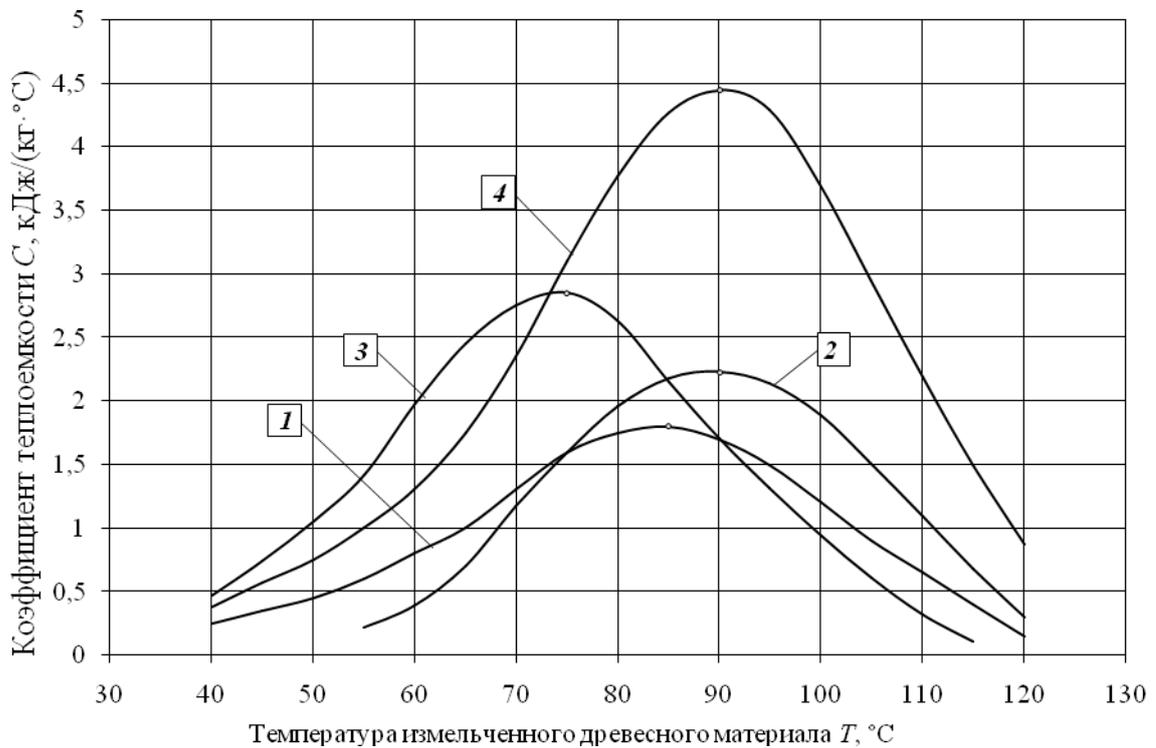


Рис. 2. Теплоемкость измельченных древесных материалов в зависимости от температуры при кучевом хранении: 1 – щепы (ель); 2 – опилки (ель); 3 – отсев от щепы (ель); 4 – кора (ель).  
 Источник: собственные вычисления (разработки)

Показатели термической безопасности измельченной древесины при кучевом хранении

Материал	Порода	Температура	Среднее значение температуры $T$ , °С	Относительная ошибка, %
щепа	сосна	воспламенения	$230,0 \pm 6,9$	3,0
		тления	$215,0 \pm 6,9$	3,2
		самовозгорания	$466,2 \pm 10,4$	2,2
	ель	воспламенения	$227,6 \pm 8,8$	3,9
		тления	$229,0 \pm 13,1$	5,7
		самовозгорания	$405,6 \pm 5,1$	1,3
отсев	сосна	воспламенения	$276,2 \pm 5,0$	1,8
		тления	$240,7 \pm 14,5$	6,0
		самовозгорания	$388,6 \pm 10,7$	2,7
	ель	воспламенения	$218,4 \pm 11,2$	5,1
		тления	$195,6 \pm 9,5$	4,9
		самовозгорания	$399,2 \pm 7,6$	1,9
опилки	сосна	воспламенения	$205,9 \pm 4,4$	2,1
		тления	$247,3 \pm 13,1$	5,3
		самовозгорания	$416,0 \pm 12,4$	3,0
	ель	воспламенения	$224,4 \pm 8,6$	3,8
		тления	$225,3 \pm 10,0$	4,4
		самовозгорания	$454,6 \pm 11,5$	2,5
кора	сосна	воспламенения	$213,6 \pm 2,1$	1,0
		тления	$225,4 \pm 10,7$	4,7
		самовозгорания	$375,8 \pm 14,8$	3,9
	ель	воспламенения	$223,7 \pm 1,7$	0,8
		тления	$231,4 \pm 5,2$	2,3
		самовозгорания	$421,0 \pm 3,3$	0,8

*Источник: собственные вычисления (разработки)*

### Заключение

1. Полученные результаты исследований позволяют прогнозировать динамику процесса самонагрева в массиве кучи измельченной древесины при хранении и своевременно принимать меры по предотвращению потерь полезной массы измельченной древесины,

ухудшению её качественных характеристик и снижению риска возгорания древесного материала;

2. Показатель теплопроводности в среде массива кучи измельченной древесины в 2,2...3,6 раза, а теплоемкость в 1,5...2,0 раза меньше соответствующих характеристик цельной древесины;

3. Показатель температуры самовозгорания технологической щепы ели в среде массива 405,6 °С значительно меньше показателя температуры самовозгорания технологической щепы сосны в среде массива 466,2 °С. Наименьший показатель температуры самовозгорания у коры сосны 375,8 °С;

4. Для стабилизации температурно-влажностного режима измельченной древесины в

среде массива кучи при хранении необходимо отводить избыточную тепловую энергию в окружающую среду. Для этого предстоит разработать энергоэффективные, экологически безопасные, конструктивные решения теплоотводящих устройств.

### Библиографический список

1. Мелехов В. И. Экспериментальное исследование распределения температуры и влажности щепы при открытом способе хранения / В. И. Мелехов, Д. А. Братилов, А. Н. Деснев // Известия ТулГУ. – 2015. – № 5(2). – С. 98–102.

2. Уголев, Б. Н. Древесиноведение и лесное товароведение : учебник / Б. Н. Уголев. – Москва : Академия, 2004. – 272 с.

3. Кайнов, П. А. Выявление закономерностей термодинамики древесины / П. А. Кайнов, П. М. Мазуркин, Ш. Р. Мухаметзянов // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – Т. 16. – № 2. – С. 61–63.

4. Исследования теплоизолирующей способности древесной коры / З. Пастори, И. Р. Мохачине, Г. А. Горбачева, В. Г. Санаев // Лесотехнический журнал. – 2017. – Т. 7. – № 1 (25). – С. 157–161.

5. Шепель, Г. А. О коэффициенте теплопроводности древесины / Г. А. Шепель, В. Ф. Надеин, Н. Б. Баланцева // Известия вузов. Лесной журнал. – 2007. – № 2. – С. 133–135.

6. Математическая модель тепломассообменных процессов, протекающих при переработке древесных отходов / Р. Г. Сафин, Д. А. Ахметова, А. В. Сафина, Р. Р. Зиатдинов, А. Р. Хабибуллина // Вестник Казанского технологического университета. – 2015. – Т. 18. – № 3. – С. 161–163.

7. Гришин, А. М. Общая физико-математическая модель зажигания и горения древесины / А. М. Гришин // Вестник Томского государственного университета. – 2010. – № 2 (10). – С. 60–70.

8. Тимербаев, Н. Ф. Моделирование тепломассопереноса в древесных материалах и продуктах переработки / Н. Ф. Тимербаев // Вестник Казанского технологического университета. – 2011. № 2. – С. 89–93.

9. Комяков, А. Н. О теплопроводности дисперсных материалов типа замороженной древесной щепы / А. Н. Комяков, А. А. Лукьянов // Лесной вестник. – 2010. – № 4. – С. 132–136.

10. Ragland, K. W. Properties of Wood for Combustion Analysis» / K. W. Ragland, D. J. Aerts, A. J. Baker // Bioresource Technology. – 1991. – Vol. 37. – P. 161–168.

11. Skogsberg, K. Wood chips as thermal insulation of snow / K. Skogsberg, A. Lundberg // Cold Regions Science and Technology. – 2005. – Vol. 43. – P. 207–218.

### References

1. Melekhov V.I., Bratilov D.A., Desnev A.N. (2015) Experimental study of the temperature and humidity distribution of chips in the open storage method. *Izvestiya TulGU*. №5(2). P. 98-102 (in Russian).

2. Ugolev B.N. Timber Science and forest commodity science: Textbook. Moscow: "Academy", 2004. 272 p. (in Russian).

3. Kainov P.A., Mazurkin P.M., Mukhametzyanov Sh.R. (2013) Identification of laws of thermodynamics. *Bulletin of Kazan Technological University*. No. 2, Vol. 16, pp. 61-63 (in Russian).

4. Pastori C., Mokhachine I.R., Gorbacheva G.A., Sanaev V.G. (2017) Studies of heat-insulating ability of wood bark. *Lesotekhnicheskij zhurnal* [Forestry engineering journal]. No. 1(25), Vol. 7, p. 157-161. (in Russian)
5. Shepel A., Nadein V.F., Balantseva N.B. (2007) On the coefficient of temperature from-water content of wood. *Izvestiya vuzov. Forestry journal*. No. 2, pp. 133-135 (in Russian).
6. Safin R.G., Akhmetova D.A., Safina A.V., Ziatdinov R.R., Khabibullina A.R. (2015) Mathematical model of heat and mass transfer processes occurring during the processing of wood waste. *Bulletin of Kazan Technological University*. No. 3. Vol. 18, pp. 161-163. (in Russian)
7. Grishin A. M. (2010) General physical-mathematical model of ignition and combustion of wood. *Vestnik of Tomsk State University*. № 2 (10), p. 60-70 (in Russian).
8. Timerbaev N.F. (2011) Modeling of heat and mass transfer in wood materials and products of processing. *Bulletin of Kazan Technological University*, No. 2, p. 89-93 (in Russian).
9. Komyakov A.N., Lukyanov A.A. (2010) On thermal conductivity of dispersed materials of frozen wood chips. *Forest Bulletin*. No. 4, p. 132-136 (in Russian).
10. Ragland K.W., Aerts D.J., Baker A.J. (1991) Properties of Wood for Combustion Analysis. *Bioresource Technology*. Vol. 37. Pp. 161-168.
11. Skogsberg K., Lundberg A. (2005) Wood chips as thermal insulation of snow. *Cold Regions Science and Technology*. Vol. 43. Pp. 207-218.

### Сведения об авторах

*Мелехов Владимир Иванович* – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии лесозаготовительных и деревообрабатывающих производств ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», г. Архангельск, Российская Федерация; e-mail: v.melekhov@narfu.ru.

*Деснев Александр Николаевич* – старший преподаватель кафедры гражданской защиты ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», г. Архангельск, Российская Федерация; e-mail: a\_desnev@sovintel.ru.

*Данилов Виктор Евгеньевич* – старший преподаватель кафедры композиционных материалов ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», г. Архангельск, Российская Федерация; e-mail: v.danilov@narfu.ru.

*Тюрикова Татьяна Витальевна* – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии лесозаготовительных и деревообрабатывающих производств ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», г. Архангельск, Российская Федерация; e-mail: t.turikova@narfu.ru.

### Information about authors

*Melekhov Vladimir Ivanovich* – DSc (Engineering), Professor, Professor of the Department of Technology of logging and woodworking operations, FSAEI HE "Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov", Arkhangelsk, Russian Federation; e-mail: v.melekhov@narfu.ru.

*Desnev Alexander Nikolayevich* – Senior Lecturer of the Department of civil protection, FSAEI HE "Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov", Arkhangelsk, Russian Federation; e-mail: a\_desnev@sovintel.ru.

*Danilov Victor Evgenievich* – Senior Lecturer of the Department of composite materials, FSAEI HE "Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov", Arkhangelsk, Russian Federation; e-mail: v.danilov@narfu.ru.

*Turikova Tatyana Vitalevna* – PhD (Engineering), Associate Professor of Department of Technology of logging and woodworking operations, FSAEI HE "Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov", Arkhangelsk, Russian Federation; e-mail: t.turikova@narfu.ru.