

УДК 674.8

UDC 674.8

05.00.00 Технические науки

Technical sciences

**ОБЩИЕ ПОДХОДЫ К
МАТЕМАТИЧЕСКОМУ
МОДЕЛИРОВАНИЮ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА
ПРОИЗВОДСТВА ПЕЛЛЕТ ИЗ
ДРЕВЕСНОГО СЫРЬЯ С ВЫСОКОЙ
СТЕПЕНЬЮ ПОРАЖЕНИЯ ГНИЛЬЮ**

**COMMON APPROACHES TO
MATHEMATICAL MODELING OF THE
PROCESS OF PRODUCTION OF PELLETS
FROM WOOD RAW MATERIAL WITH A
HIGH DEGREE OF ROT**

Сидорова Елена Николаевна
аспирант
SidorovaEN@volgatech.net

Sidorova Elena Nikolaevna
postgraduate student
SidorovaEN@volgatech.com

Онучин Евгений Михайлович
к. т. н., доцент
SPIN-код=5242-8873
AuthorID=400607
OnuchinEM@volgatech.net

Onuchin Evgeny Mikhailovich
Cand. Tech. Sci., associate professor
SPIN-code=5242-8873
AuthorID=400607
OnuchinEM@volgatech.net

Медяков Андрей Андреевич
к. т. н., доцент
SPIN-код=5189-6826
AuthorID=707819

Medyakov Andrej Andreevich
Cand. Tech. Sci., associate professor
SPIN-code=5189-6826
AuthorID=707819

Поволжский государственный технологический университет, Йошкар-Ола, Россия

Volga state university of technology, Ioshkar-Ola Russia

Представлены математические модели технологических режимов дробления, сушки и прессования при производстве пеллет из древесного сырья с высокой степенью поражения гнилью

The article presents the mathematical models of technological modes of crushing, drying and pressing in the production of pellets from wood raw material with a high degree of rot

Ключевые слова: МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, ПРЕССОВАНИЕ, ДРЕВЕСНОЕ СЫРЬЕ

Keywords: MATHEMATICAL MODEL, PRESSING, WOOD RAW MATERI

Введение

Целью данного исследования является обзор общих подходов к математическому моделированию технологического процесса производства пеллет из сырья с высокой степенью поражения гнилью. Для достижения данной цели рассмотрены разные математические модели процесса производства топливных гранул.

Состояние исследований и актуальность работы

Леса в России занимают 62,1 % всей территории, что составляет 7187 тысяч квадратных километров. Однако при столь высоком уровне

сырьевых запасов производство и экспорт пеллет находится лишь на стадии развития [1]. Прежде всего, это связано с уменьшением объемов деловой древесины, болезнями леса, в том числе поражением гнилью. Использование в качестве сырья для производства топливных пеллет древесины с высокой степенью поражения гнилью предполагает наличие добавок в виде технического лигнина. Его добавление позволит снизить температуру прессования гранул до 50-70 градусов по Цельсию и сократить количество потребляемой электрической энергии, что приведет к уменьшению стоимости конечного продукта [2].

Поэтому актуальность вопроса производства пеллет из древесного сырья с высокой степенью гнили не вызывает сомнения.

Моделирование функционирования системы производства топливных пеллет из древесного сырья

Производственная линия гранулирования достаточно сложна и включает в себя несколько этапов:

– Подача и складирование сырья;

Включает в себя сепарационную установку и транспортную систему.

– Крупное дробление;

Крупные куски древесины подаются в барабанную рубильную машину, которая измельчает их до размера 25x25x2 мм, позволяя в дальнейшем более качественно и быстро высушить сырье.

– Сушка;

Сырье подается из бункера-накопителя барабанной рубильной машины в сушилку (барабанную или ленточную). Процесс сушки является самым энергоемким.

– Мелкое дробление;

Древесное сырье подается в дробилки барабанного или молоткового типа для измельчения до размера не более 5 мм.

- Водоподготовка;

Для получения качественных пеллет влажность сырья должна быть $10 \pm 2\%$. Если после сушки уровень влажности меньше данного значения, то необходимо увлажнить сырье в смесителях с установкой дозирования воды или пара.

- Прессование (пеллетирование);

Для прессования применяются два вида пресс-грануляторов: с цилиндрической матрицей и плоской матрицей.

- Охлаждение;

В процессе прессования гранулы нагреваются до температуры 70-90°C после чего их охлаждают в шкафу охлаждения и просеивания.

- Упаковка.

Готовые пеллеты упаковываются в свободном виде – насыпью, в мешках биг-бэг (от 500 до 1200 кг) или в мелкой расфасовке (10...20 кг).

На рисунке 1 показана линия гранулирования.

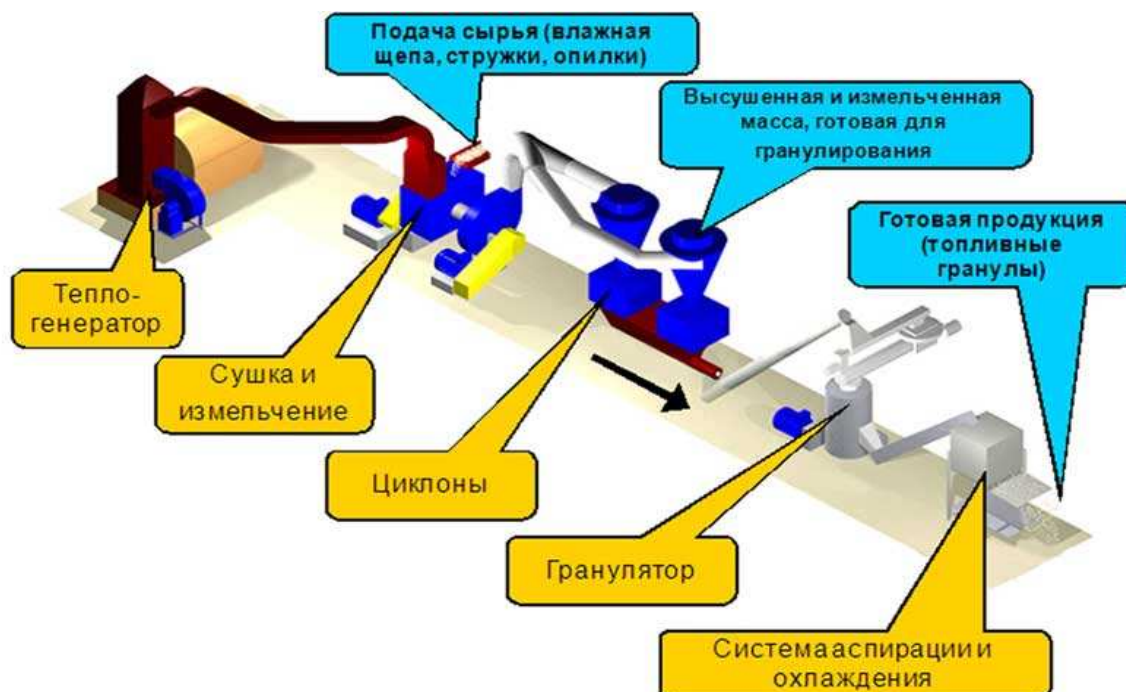


Рисунок 1 – Линия гранулирования

Описание математической модели

Процесс дробления древесины рассматриваем на основе математической модели работы дробилки Клушанцева Б.В. [3].

Эмпирическая формула для расчета мощности электродвигателя дробилок [4]:

$$N = 0,13E_i K_m Q_m (\sqrt{i} - 1) / \sqrt{d_n}, \text{ кВт} \quad (1)$$

где E_i – энергетический показатель, зависящий от физико-механических свойств измельчаемого материала; K_m – коэффициент масштабного фактора (определяется в зависимости от d_n); d_n – средневзвешенный размер кусков исходного материала, м; Q_m – производительность, кг/с.

Работа, затрачиваемая на измельчающий процесс, учитывая положения о процессе разрушения древесины, а также энергетические затраты на формирование новых и развитие трещин, энергии, рассеиваемой в объеме частиц при их деформационном изменении и прочих факторов, выражается в виде уравнения [5]:

$$A_{\text{изм}} = A_S + A_V + A_0, \text{ Дж} \quad (2)$$

где A_S – работа упругих деформаций, Дж; A_V – работа образования новой поверхности, Дж; A_0 – энергия, затрачиваемая на износ и нагрев рабочих органов, их деформирование и т.д., Дж.

Древесина с высокой степенью поражения гнилью обладает крайне малой технической прочностью, что позволяет прикладывать меньшее усилие на ее дробление, соответственно использовать дробилки малой мощности, потребляющее меньшее количество энергии. Все это позволит сократить затраты на производство пеллет.

При разработке математической модели сушки древесины за основу взяты работы Сафина Р.Р. [6].

В работе Сафина Р.Р. поток влаги к поверхности массообмена определяется из уравнения (3):

$$j_{\text{пов}} = \rho_0 \left(a_m \frac{\partial U_{\text{мат}}}{\partial x} \Big|_{x=0} + a_m \delta \frac{\partial T_{\text{мат}}}{\partial x} \Big|_{x=0} + \frac{k_p}{\rho_{\text{ср}}} \frac{\partial P_{\text{мат}}}{\partial x} \Big|_{x=0} \right), \text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}) \quad (3)$$

где ρ_0 – плотность абсолютно сухого тела, кг/м³; a_m – коэффициент массопроводности, м²/с; $U_{\text{мат}}$ – влагосодержание материала, кг/кг; δ – относительный термоградиентный коэффициент, 1/К; $T_{\text{мат}}$ – температура материала пилы, К; k_p – коэффициент фильтрационного переноса, с; $\rho_{\text{ср}}$ – плотность среды, кг/м³; $P_{\text{мат}}$ – давление материала, Па.

Для определения среднего времени пребывания материала в барабане сушилки используем формулу [7]:

$$t_{\text{ср}} = \frac{120 \rho_m \varepsilon (u_1 - u_2)}{m_{\text{ср}}^m (2 + u_1 + u_2)}, \text{мин} \quad (5)$$

где ρ_m – насыпная плотность материала кг/м³; u_1, u_2 – начальное и конечное влагосодержание материала, %; $m_{\text{ср}}^m$ – объемная испарительная способность.

Расход тепла на испарение определяется только теплосодержанием образовавшегося конденсата и не зависит от состояния наружного и отработавшего воздуха [8]:

$$q_{\text{исп}}'' = c_v t_k, \text{Дж}/\text{кг} \quad (6)$$

где c_v – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К); t_k – температура конденсата (воды), отводимого от сушилки, К.

При использовании в качестве сырья для производства топливных пеллет древесины с высокой степенью гнили в качестве добавки для лучшего «склеивания» гранул используется технический лигнин. Лигнин, содержащийся в древесине, в первую очередь влияет на качество гранул, соответственно на цену продукта. Полностью процессы сушки и

водоподготовки исключить невозможно. Как видно из рисунка 2, чем ниже уровень влажности, тем выше теплотворная способность пеллет.

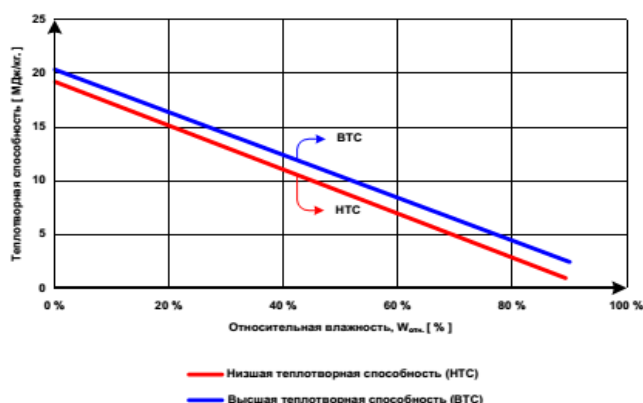


Рисунок 2 – Зависимость теплотворной способности от влажности древесины

Атмосферная сушка позволяет подсушить древесину до влажности 22%. Однако по мере развития гнили клетки древесины разрушаются, в результате чего образуются дополнительные внутренние полости, структура гнилой древесины по мере развития процесса гниения становится рыхлой, пористой, прочность древесины при этом резко снижается. Это позволяет эффективнее удалять влагу под действием притока воздуха, соответственно можно достигнуть меньшего уровня влажности и в дальнейшем потратить меньше энергии на досушку древесных опилок в сушилке. Это позволит уменьшить себестоимость производства пеллет.

Прессование (пеллетирование) древесных опилок производится при температуре 90-100⁰С. Именно при этой температуре сырьё перед прессованием и в рабочем канале матрицы лигнин, содержащийся в древесине, максимально проявляет свои «клеящие» свойства. Однако планируется использовать древесину, пораженную гнилью, например ложным осиновым трутовиком, при которой в первую очередь разрушается лигнин. Вследствие этого в качестве добавки используем технический лигнин. При этом можно снизить температуру сырья до 50-70⁰С, что позволит сократить количество потребляемой энергии.

Математическую модель пеллетирования разрабатываем на основе модели О.Д. Мюллера [9].

Температура поверхности древесной гранулы на выходе из фильеры матрицы с учетом потерь тепла через наружные поверхности пресса-гранулятора определяется по формуле (7) [1]:

$$\vartheta(R, \tau) = \vartheta_2 + \frac{2n\rho_0\omega_0 R_{cp} L R_r (1 - \cos(\alpha)) \mu_{тр} E_w (D_{гр}/d_0 - 1)(D_{гр}^2/d_0^2 - 1)}{Z \lambda \pi d_0 \rho_{гр}} \frac{1}{(1 + \nu)} \frac{1}{(1 - 2\nu + D_{гр}^2/d_0^2)} - \frac{(t_{c1} - t_{c2})}{\ln(D_{гр}/d_0)} \left[\frac{2 \pi l_{ц} \rho_{гр} Z}{n \rho_0 \omega_0 R_{cp} L R_r (1 - \cos(\alpha))} - \frac{1}{4} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\mu_n^2} \exp\left(-\frac{\mu_n^2 \pi l_{ц} \rho_{гр} Z}{n \rho_0 \omega_0 R_{cp} L R_r (1 - \cos(\alpha))}\right) \right] \quad (7)$$

где ϑ_2 – температура древесной муки после прохождения цилиндрического канала фильеры матрицы с учетом потерь тепла через наружные поверхности пресса-гранулятора, $^{\circ}\text{C}$; где n – количество прессовочных роликов; ρ_0 – плотность насыпного слоя перед прессовочным роликом, $\text{кг}/\text{м}^3$; ω_0 – угловая скорость вращения прессовочного узла, $\text{м}/\text{с}$; R_{cp} – средний радиус матрицы, м ; L – длина ролика; R_r – радиус прессовочного ролика, м ; α – угол естественного откоса, град ; Z – количество фильер матрицы пресса-гранулятора, шт ; λ – коэффициент теплопроводности материала, из которого изготовлена матрица, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{град})$; π – математическая константа, равная отношению длины окружности к длине её диаметра ($\pi = 3,14$); d_0 – диаметр упругодеформированной гранулы, равный диаметру цилиндрического канала, м ; $\rho_{гр}$ – плотность гранулы, $\text{кг}/\text{м}^3$; $\mu_{тр}$ – коэффициент трения между спрессованной древесной шихтой и материалом матрицы; E_w – модуль упругости спрессованной при давлении $P_{пр}$ древесной муки; ν –

коэффициент Пуассона; $D_{гр}$ – диаметр гранулы после выхода из цилиндрического канала, м; $D_{гр} / d_0$ – относительное расширение гранулы после выхода из фильеры матрицы, м; t_{c1} – температура материала пресса гранулятора внутренней стенки фильеры, °С; t_{c2} – температура материала пресса гранулятора наружной стенки фильеры, °С; $L_{ц}$ – длина цилиндрического канала матрицы, м.

Для пресса-гранулятора с цилиндрической матрицей уравнение по определению массовой производительности примет вид:

$$G = n\rho_0\omega_0R_{вн}L\left(R_r(1 - \cos(\alpha)) - \frac{p_{пр}}{E_{вр}}h_2\right), \quad (8)$$

где $R_{вн}$ – радиус внутренней поверхности цилиндрической матрицы; $p_{пр}$ – давление проталкивания, Па; h_2 – толщина начального спрессованного слоя древесной муки.

Количество энергии на гранулирование единицы массы смеси до заданного размера определяется по формуле (9):

$$c = \frac{N}{G}, \text{ Вт} \quad (9)$$

где N – мощность пресса-гранулятора, кВт; G – производительность пресса-гранулятора, определяемая по формуле (8), кг/с.

Мощность прессовочного ролика пресса-гранулятора с цилиндрической матрицей определяется по формуле (10):

$$\begin{aligned}
 N_{\text{пр}} = \omega_0 n \frac{R_{\text{ср}}}{R_r} \left\{ LR_r^2 k p_0 e^{-k} (1 - \cos(\alpha)) \left[\frac{e^{-k \frac{1-\cos(\alpha)}{\Phi}}}{k \left(\frac{1-\cos(\alpha)}{\Phi} \right)} - \frac{e^{-k}}{k} + \left(\ln k + \right. \right. \right. \\
 \ln \left(\frac{1-\cos(\alpha)}{\Phi} \right) - \frac{k}{1!} \left(\frac{1-\Phi-\cos(\alpha)}{\Phi} \right) + \frac{k^2}{2 \cdot 2!} \left[\left(\frac{1-\cos(\alpha)}{\Phi} \right)^2 - 1 \right] \dots + \\
 \left. \left. \left. \frac{(-1)^n k^n}{n \cdot n!} \left[\left(\frac{1-\cos(\alpha)}{\Phi} \right)^n - 1 \right] + \dots \right) \right] - p_{\text{пр}} LR_r^2 \left[\left(\frac{1-\cos(\alpha) - \frac{p_{\text{пр}} h_2}{E_W R_r}}{1 + \ln \left(\frac{p_{\text{пр}}}{p_0} \right)} + \frac{p_{\text{пр}} h_2}{E_W R_r} \right) + \right. \right. \\
 \left. \left. \frac{p_{\text{пр}} h_2}{2 E_W R_r} \right] \right\}
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

где k – коэффициент тепловых потерь.

Выводы

Представленные математические модели позволят оптимизировать процесс производства топливных пеллет с учетом того, что в качестве сырья используется древесина с высокой степенью гнили. Это позволит сократить количество потребляемой энергии и уменьшить себестоимость конечного продукта.

Библиографический список

1. Онучин, Е.М. История развития и перспектива технологий и технических средств заготовки и переработки древесины энергетического назначения [Электронный ресурс] / Е.М. Онучин, П.Н. Анисимов // Режим доступа: [www.url : http://science-bsea.bgita.ru/2013/les_komp_2013/onuchin_ist.htm](http://science-bsea.bgita.ru/2013/les_komp_2013/onuchin_ist.htm). – 30.05.2016.
2. Математическая модель процесса гранулирования древесного сырья с высокой степенью поражения гнилью [Электронный ресурс] / Е.Н. Сидорова, Е.М. Онучин, А.А. Медяков, Д.М. Ласточкин, К.Д. Семенов // Научный журнал КубГАУ [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2016. – №117(03). – Режим доступа: [www.url : http://ej.kubagro.ru/2016/03/pdf/20.pdf](http://ej.kubagro.ru/2016/03/pdf/20.pdf). – 24.05.2016.
3. Клушанцев, Б.В. Дробилки. Конструкция, расчет, особенности эксплуатации [Электронный ресурс] / Б.В. Клушанцев, А.И. Косарев, Ю.А. Муйземнек. – М.: Машиностроение. 1990. – 320 с.
4. Борщёв, В.Я. Оборудование для измельчения материалов: дробилки и мельницы [Электронный ресурс] / В.Я. Борщёв. // Изд. ТГТИ. – Тамбов, 2004. – 75 с. – Режим доступа: [www.url: http://www.tstu.ru/book/elib/pdf/2004/borchev.pdf](http://www.tstu.ru/book/elib/pdf/2004/borchev.pdf). – 30.05.2016.
5. Соколов, А.Я. Технологическое оборудование предприятий по хранению и переработке зерна [Электронный ресурс] / А.Я. Соколов. – М.: Колос, 1967. – 495 с. – Режим доступа: [www.url: http://www.twirpx.com/file/1125562](http://www.twirpx.com/file/1125562). – 30.05.2016.

6. Сафин, Р.Р. Математическая модель процесса конвективной сушки пиломатериалов в разряженной среде [Электронный ресурс] / Р.Р. Сафин, Р.Р. Хасаншин, Р.Г. Сафин // Лесной журнал. – 2006. – №4. – С. 64-71. – Режим доступа: [www.url : http://lesnoizhurnal.agtu.ru/upload/iblock/4e3/4e3c29e092cf6989ba745ebbc36a1455.pdf](http://lesnoizhurnal.agtu.ru/upload/iblock/4e3/4e3c29e092cf6989ba745ebbc36a1455.pdf). – 23.05.2016.
7. Першин, В.Ф. Переработка сыпучих материалов в машинах барабанного типа [Электронный ресурс] / В.Ф. Першин, В.Г. Однолько, С.В. Першина // – М.: Машиностроение, 2009. – 220 с. – Режим доступа: [www.url: file:///C:/Documents%20and%20 Settings/User/Мои%20документы/ pershin -a.pdf](http://file:///C:/Documents%20and%20Settings/User/Мои%20документы/pershin-a.pdf). – 23.05.2016.
8. Расев, А.И. Утилизация тепловой энергии в сушильных камерах [Электронный ресурс] / А.И. Расев, С.В. Кучер // Труды Международной научно-практической конференции СЭТТ. – М.: Тамбов, 2008. – Т. 2. – С. 200-206. – Режим доступа: [www.url: http://www.derewo.ru/derewo_jornal_pdf/2011/sushka.pdf](http://www.derewo.ru/derewo_jornal_pdf/2011/sushka.pdf). – 30.05.2016.
9. Мюллер, О.Д. Совершенствование технологии производства древесных гранул [Электронный ресурс] / О.Д. Мюллер // Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. - Архангельск. – 2015. – Режим доступа: [www.url : http://narfu.ru/upload/iblock7bf/dissertatsiya_myuller.pdf](http://narfu.ru/upload/iblock7bf/dissertatsiya_myuller.pdf). – 24.05.2016.

References

1. Onuchin, E.M. Istorija razvitija i perspektiva tehnologij i tehniceskikh sredstv zagotovki i pererabotki drevesiny jenergeticheskogo naznachenija [Jelektronnyj resurs] / E.M. Onuchin, P.N. Anisimov // Rezhim dostupa: [www.url : http://science-bsea.bgita.ru/2013/les_komp_2013/onuchin_ist.htm](http://science-bsea.bgita.ru/2013/les_komp_2013/onuchin_ist.htm). – 30.05.2016.
2. Matematicheskaja model' processa granulirovanija drevesnogo syr'ja s vysokoj stepen'ju porazhenija gnil'ju [Jelektronnyj resurs] / E.N. Sidorova, E.M. Onuchin, A.A. Medjakov, D.M. Lastochkin, K.D. Semenov // Nauchnyj zhurnal KubGAU [Jelektronnyj resurs]. – Krasnodar: KubGAU, 2016. – №117(03). – Rezhim dostupa: [www.url : http://ej.kubagro.ru/2016/03/pdf/20.pdf](http://ej.kubagro.ru/2016/03/pdf/20.pdf). – 24.05.2016.
3. Klushancev, B.V. Drobilki. Konstrukcija, raschet, osobennosti jekspluatacii [Jelektronnyj resurs] / B.V. Klushancev, A.I. Kosarev, Ju.A. Mujzemnek. – М.: Mashinostroenie. 1990. – 320 s. Rezhim dostupa: [www.url: http://www.twirpx.com/file/153120](http://www.twirpx.com/file/153120). – 30.05.2016.
4. Borshhjov, V.Ja. Oborudovanie dlja izmel'chenija materialov: drobilki i mel'nicy [Jelektronnyj resurs] / V.Ja. Borshhjov. // Izd. TGTI. – Tambov, 2004. – 75 s. – Rezhim dostupa: [www.url: http://www.tstu.ru/book/elib/pdf/2004/borchev.pdf](http://www.tstu.ru/book/elib/pdf/2004/borchev.pdf). – 30.05.2016.
5. Sokolov, A.Ja. Tehnologicheskoe oborudovanie predpriyatij po hraneniju i pererabotke zerna [Jelektronnyj resurs] / A.Ja. Sokolov. – М.: Kolos, 1967. – 495 s. – Rezhim dostupa: [www.url: http://www.twirpx.com/file/1125562](http://www.twirpx.com/file/1125562). – 30.05.2016.
6. Safin, R.R. Matematicheskaja model' processa konvektivnoj sushki pilomaterialov v razrjazhennoj srede [Jelektronnyj resurs] / R.R. Safin, R.R. Hasanshin, R.G. Safin // Lesnoj zhurnal. – 2006. – №4. – S. 64-71. – Rezhim dostupa: [www.url : http://lesnoizhurnal.agtu.ru/upload/iblock/4e3/4e3c29e092cf6989ba745ebbc36a1455.pdf](http://lesnoizhurnal.agtu.ru/upload/iblock/4e3/4e3c29e092cf6989ba745ebbc36a1455.pdf). – 23.05.2016.
7. Pershin, V.F. Pererabotka sypuchih materialov v mashinah barabannogo tipa [Jelektronnyj resurs] / V.F. Pershin, V.G. Odnol'ko, S.V. Pershina // – М.: Mashinostroenie, 2009. – 220 s. – Rezhim dostupa: [www.url: file:///C:/Documents%20and%20 Settings/User/Moi%20dokumenty/ pershin -a.pdf](http://file:///C:/Documents%20and%20Settings/User/Moi%20dokumenty/pershin-a.pdf). – 23.05.2016.

8. Rasev, A.I. Utilizacija teplovoj jenergii v sushil'nyh kamerah [Jelektronnyj resurs] / A.I. Rasev, S.V. Kucher // Trudy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii SJeTT. – M.: Tambov, 2008. – T. 2. – S. 200-206. – Rezhim dostupa: [www.url: http://www.derewo.ru/derewo_jornal_pdf/2011/sushka.pdf](http://www.derewo.ru/derewo_jornal_pdf/2011/sushka.pdf). – 30.05.2016.

9. Mjuller, O.D. Sovershenstvovanie tehnologii proizvodstva drevesnyh granul [Jelektronnyj resurs] / O.D. Mjuller // Dissertacija na soiskanie uchenoj stepeni doktora tehniceskikh nauk. - Arhangel'sk. – 2015. – Rezhim dostupa: [www.url : http://narfu.ru/upload/iblock7bf/dissertatsiya_myuller.rdf](http://narfu.ru/upload/iblock7bf/dissertatsiya_myuller.rdf). – 24.05.2016.