

УДК: 630*32

UDC: 630*32

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ СИСТЕМЫ
ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ МОБИЛЬНЫХ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЛИНИЙ ПО
ПРОИЗВОДСТВУ СУХОЙ ТОПЛИВНОЙ
ЩЕПЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЧАСТИ
ПРОИЗВОДИМОГО БИОГЕННОГО
ТОПЛИВА**

**MODELLING OF THE ENERGY SUPPLY
SYSTEM OF MOBILE TECHNOLOGICAL
LINES FOR THE PRODUCTION OF DRY FUEL
WOOD CHIPS WITH THE PARTIAL USAGE OF
THE PRODUCIBLE BIOGENIC FUEL**

Анисимов Павел Николаевич
аспирант

Anisimov Pavel Nikolaevich
postgraduate student

Онучин Евгений Михайлович
к.т.н., доцент
*Поволжский государственный технологический
университет, Йошкар-Ола, Россия*

Onychin Evgeny Mihailovich
Cand.Tech.Sci., assistant professor
*Volga State University of Technology, Ioshkar-Ola,
Russia*

Представлена схема энергетического баланса системы автономного энергообеспечения мобильной технологической линии по производству сухой топливной щепы на базе силовой установки с двигателем Стирлинга, использующей часть производимого биогенного топлива; разработана математическая модель функционирования системы энергообеспечения данной мобильной технологической линии

The scheme of the energetic balance of the autonomous energy supply system of mobile technological lines that produces dry fire wood chips on the basis of the engine installation with the Stirling engine, using a part producible biogenic fuel, is produced; the mathematical model of the functioning of the present energy supply system of mobile technological line is elaborated

Ключевые слова: СИСТЕМА АВТОНОМНОГО ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ, МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, МОБИЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ЛИНИИ, ТОПЛИВНАЯ ЩЕПА, ЛЕСНЫЕ МАШИНЫ

Keywords: AUTONOMOUS ENERGY SUPPLY SYSTEM, MATHEMATICAL MODEL, MOBILE TECHNOLOGICAL LINES, FIRE WOOD CHIPS, FOREST EQUIPMENT

Введение

Целью данного исследования является определение параметров функционирования технической системы автономного энергообеспечения мобильной технологической линии по производству сухой топливной щепы на базе силовой установки с двигателем Стирлинга, использующей часть производимого биогенного топлива. Для достижения данной цели поставлены и решены следующие задачи: определение схемы энергетического баланса системы энергообеспечения мобильной технологической линии, разработка математической модели функционирования системы энергообеспечения мобильной технологической линии.

Состояние исследований и актуальность работы

В настоящее время в лесном комплексе используется энергетическое и силовое оборудование, работающее на традиционных ископаемых видах углеводородного топлива (дизельное топливо, бензин, природный газ). Это относится, в том числе и к машинно-технологическому оборудованию по производству древесного биотоплива, в то время как, целесообразно было бы использовать часть производимого топлива на собственные нужды. Следует отметить, что количество необходимой энергии для получения биотоплива не превышает 3% от его теплотворной способности. Для сравнения, уголь и газ требуют до 6 % [1]. Особенно острым является вопрос энергообеспечения на основе древесного топлива для территориально удаленных лесных комплексов. Поэтому актуальность проблем разработки мобильных технологических линий с автономным энергообеспечением на базе биогенного топлива не вызывает сомнений.

Широко известны и используются в настоящее время зарубежные и отечественные мобильные технологические линии по заготовке топливной древесины в виде сырой щепы на лесосеке, энергетическим модулем которых является бензиновый или дизельный двигатели внутреннего сгорания, работающие на традиционном бензиновом или дизельном топливе. Имеются отечественные разработки по переводу дизельных двигателей на генераторный газ, такие установки сложны и материалоемки, так как требуют тонкой очистки топливного газа. Таким образом, автономное энергоснабжение мобильных технологических линий по производству топливной щепы на основе двигателей внешнего сгорания имеет следующие преимущества: экологичность, использование биогенного топлива, возможность осуществления каталитического сгорания биогенного топлива, возможность использования бросовой теплоты горячих дымовых газов для подсушки щепы [2].

Моделирование функционирования системы энергообеспечения мобильной технологической линии по производству сухой топливной щепы

Одними из производственных объектов лесного комплекса являются стационарные и мобильные производственные линии, в том числе адаптивно-модульного типа [3, 4], которые включают в себя весьма теплоемкий технологический процесс – сушку древесины. Сушка является необходимым процессом для получения практически любого вида качественной продукции из древесины, будь то пиломатериалы или топливная щепа. Далее рассматривается моделирование системы автономного энергообеспечения мобильных технологических линий по производству сухой топливной щепы с использованием части производимого биогенного топлива.

Структура энергетического баланса системы автономного энергообеспечения мобильной технологической линии от когенерационной установки на основе двигателя Стирлинга определяется структурой теплового баланса двигателей Стирлинга (см. рисунок 1). Приводимые процентные соотношения являются усредненными и справедливы для установок с используемыми в настоящее время двигателями Стирлинга мощностью от 1 до 120 кВт.

Если принять за 100 % подведенное к двигателю Стирлинга количество теплоты, то безвозвратные потери теплоты в подогревателе — 3 %, механические потери — 5 %, потери с отработавшими газами — 14 %, потери с охлаждающей водой — 46 % и примерно 32 % подведенной теплоты превращается в полезную работу двигателя [5].

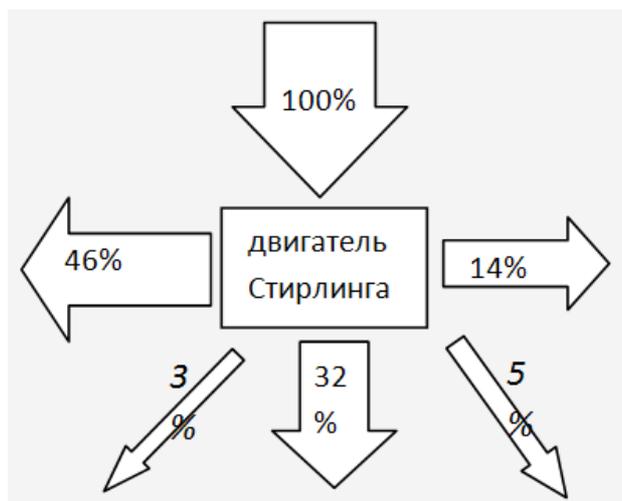


Рисунок 1 – Тепловой баланс двигателя Стирлинга

Структура энергетического баланса рассматриваемой системы приведена на рисунке 2.

Приходная часть энергобаланса:

- Тепловой эквивалент биогенного топлива (части производимой сухой топливной щепы), подаваемого в газогенератор для последующей газификации. Принимаем это количество энергии в системе за единицу (100 %), далее потребление различными агрегатами и устройствами, а также потери количественно будем оценивать в процентном соотношении от этой величины.

Расходная часть энергобаланса:

- Энергия, переданная на вал рубительной машины, максимальная мощность – 21,248 %;

- Мощность на валу насоса гидростанции – 1,28 %;

- Привод шасси – максимальная мощность, при отсутствии нагрузки на рубительной машине и отключенном насосе гидростанции - 22,528 %;

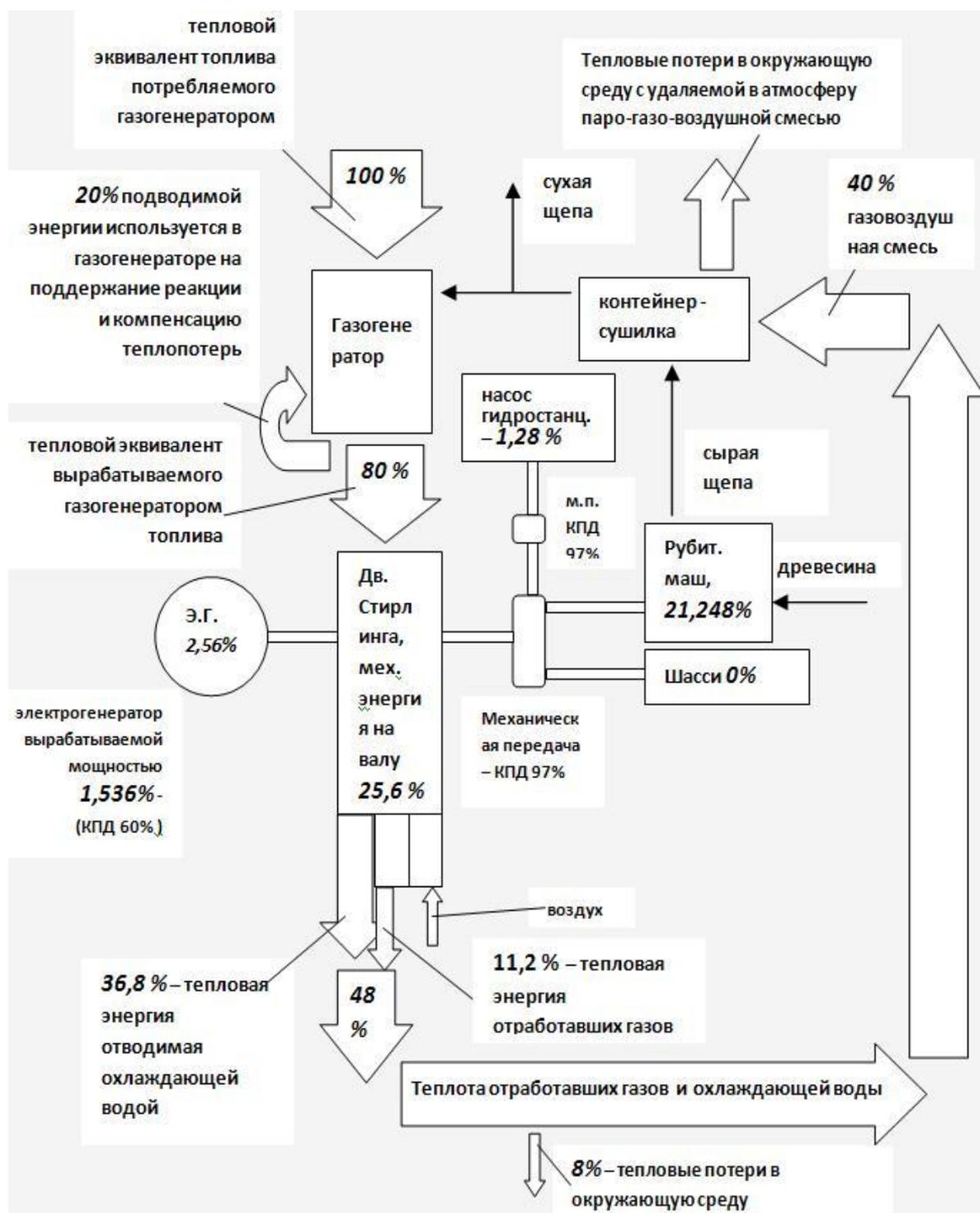


Рисунок 2 – Схема энергетического баланса системы автономного энергообеспечения мобильной технологической линии по производству сухой топливной щепы на базе когенерационной установки с двигателем Стирлинга, использующей часть производимого биогенного топлива.

Потребление энергии электрогенератором (мощность на валу) максимально – 2,56 %. Расход электроэнергии технологической линией

определяется следующими потребителями: пыльная шина захватно-рубительной машины, привод вентилятора системы охлаждения холодильника двигателя Стирлинга, дутьевой вентилятор газогенератора, электроника и автоматика, осветительное и прочее электрооборудование установки.

- Теплота отработавших газов и охлаждающей воды, отводимая от двигателя Стирлинга – 48 %.

Коэффициенты:

КПД электрогенератора – 60%;

КПД механических передач – 97%;

Коэффициент тепловые потери в теплообменниках, воздуховодах и газоходах – 0,1.

Описание математической модели

Расход тепла потребного для конвективной сушки щепы:

$$Q_{\text{суш}} = Q_{\text{нагр}} + Q_{\text{испар}} + Q_{\text{ном}} \cdot 1,1, \quad (1)$$

где $Q_{\text{нагр}}$ – тепло затрачиваемое на нагрев материала, $Q_{\text{испар}}$ – тепло затрачиваемое на испарение влаги, $Q_{\text{ном}}$ – потери тепла в окружающую среду через наружные стенки сушилки, 1,1 – коэффициент характеризующий неучтенные потери.

$$Q_{\text{нагр}} = G_{\text{руб}} c_{\text{щ}} (t_{\text{щ}2} - t_{\text{щ}1}), \quad (2)$$

где $G_{\text{руб}}$ – производительность рубительной машины, кг/с, $c_{\text{щ}}$ = кДж/(кг·К) – теплоемкость щепы при средней температуре и конечной влажности, $t_{\text{щ}2}$ – температура щепы на выходе из сушилки, $t_{\text{щ}1}$ – температура щепы на входе в сушилку, °С.

$$Q_{\text{испар}} = W(r_0 + c_e (t_{\text{щ}2} - t_{\text{щ}1})), \quad (3)$$

где W - количество испаряемой воды, кг/с, $r_0 = 2439$ кДж/кг - теплота испарения воды при 0 °С, $c_e = 1,97$ кДж/(кг·К) - теплоемкость водяного пара.

Количество испаряемой воды W находится как разность массовой производительности рубительной установки по сырой щепе и массовой производительности сушилки по сухой щепе:

$$W = G_{руб} - G_{суш}, \quad (4)$$

где $G_{руб}$, кг/с, - массовая производительности рубительной установки по сырой щепе, находится по формуле 5 [6]; $G_{суш}$, кг/с, - требуемая массовая производительность сушилки по сухой щепе, находится по формуле 6

$$G_{руб} = \frac{z \cdot n \cdot l_{щ} \cdot F \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot r_d}{60}, \quad (5)$$

где z – число режущих ножей; n – частота вращения барабана, об/мин; $l_{щ}$ - длина щепы, м; F – среднее поперечное сечений перерабатываемого сырья, м²; k_1 - коэффициент использования машинного времени (для малоножевых машин - 0,5-0,8); k_2 - коэффициент использования рабочего времени (0,7-0,8); r_d - плотность древесины, кг/м³.

Требуемая массовая производительности сушилки по сухой щепе определяется производительностью рубительной установки и зависит от начальной и конечной влажности щепы и вычисляется по формуле 6:

$$G_{суш} = \frac{G_{руб}}{1 + \frac{w_n - w_k}{100}}, \quad (6)$$

где w_n и w_k - начальная и конечная влажность щепы.

Потери теплоты $Q_{ном.}$ через наружные стенки сушилки определяются по формуле (7) [7]:

$$Q_{ном.} = \frac{(t_{с.а.ср.} - t_{опр})A_{см}}{R_{см}}, \quad (7)$$

где $t_{c.a.ср.}$ - средняя температура сушильного агента внутри сушилки, $t_{окр}$ - температура окружающей среды, A_{cm} - площадь наружных стенок сушилки, R_{cm} - термическое сопротивление наружных стенок сушилки.

Термическое сопротивление наружных стенок сушилки R_{cm} определяется по формуле (8) [7]:

$$R_{cm} = \left(\frac{1}{a_{вн.ст}} + \frac{d_{cm1}}{l_{cm1}} + \frac{d_{cm2}}{l_{cm2}} + \frac{1}{a_{нар.ст}} \right) \quad (8)$$

где $a_{вн.ст}$ и $a_{нар.ст}$ - коэффициенты теплоотдачи внутренней и наружной поверхностей стенок сушилки, Вт/(м²·°С), d_{cm1} и d_{cm2} - толщина слоев наружных стенок сушилки и слоя теплоизоляционной краски соответственно, l_{cm1} и l_{cm2} - коэффициенты теплопроводности слоев наружных стенок и слоя теплоизоляционной краски соответственно.

Коэффициент теплоотдачи $a_{нар.ст}$ наружной поверхности стенок сушилки зависит от условий конвективного теплообмена и теплового излучения и определяется по формуле (9) [7]:

$$a_{нар.ст} = a_K + a_{И}, \quad (9)$$

где a_K - коэффициент теплоотдачи конвекцией, $a_{И}$ - коэффициент теплоотдачи излучением.

Значение a_K определяется по формуле Франка [8] (10):

$$a_K = 7,74v^{0,656} + 3,78 * e^{-1,91v}, \quad (10)$$

где v - скорость ветра, $e = 2,718$ - основание натурального логарифма.

Значение $a_{\hat{E}}$ определяется по формуле (11) [7]:

$$a_{И} = \frac{C_1}{t_{нар.ст} - t_{окр}} \left\{ \left[\frac{t_{нар.ст} + 273}{100} \right]^4 - \left[\frac{t_{окр} + 273}{100} \right]^4 \right\}, \quad (11)$$

где C_1 - коэффициент излучения окрашенной поверхности наружной стенки, $t_{нар.ст}$ - температура наружной поверхности стенки сушилки; $t_{окр}$ - температура наружного воздуха.

Количество вторичной тепловой энергии от двигателя Стирлинга, которую можно использовать для конвективной сушки щепы зависит от мощности на валу двигателя. Мощность на валу двигателя Стирлинга в каждый момент, находится как сумма присоединенных механических нагрузок по формуле (12):

$$N_{\text{стирл}} = N_{\text{э.г.}} \cdot \eta_{\text{э.г.}} + N_{\text{нас.}} \cdot \eta_{\text{мех.}} + N_{\text{руб.}} \cdot \eta_{\text{мех.}} + N_{\text{шасси.}} \cdot \eta_{\text{мех.}}, \quad (12)$$

где $N_{\text{э.г.}}$ – мощность электрогенератора, $N_{\text{нас.}}$ – мощность насоса гидростанции, $N_{\text{руб.}}$ – мощность на валу рубительной установки, $N_{\text{шасси.}}$ – мощность на привод самоходного шасси, $\eta_{\text{э.г.}}$ – КПД электрогенератора, $\eta_{\text{мех.}}$ – КПД механической передачи.

Мощность на валу электрогенератора принимаем условно постоянной, так как изменения электрической нагрузки в процессе работы технологической линии незначительные и сглаживаются с помощью аккумулятора. Мощность на валу насоса гидростанции также принимаем условно постоянной, поскольку в процессе работы в системе поддерживается давление, необходимое для гидравлического привода поворотного механизма, гидроманипулятора с захватным устройством и прижимных подающих валков загрузочного окна рубительной установки. Привод шасси осуществляется периодически при отключении привода рубительной установки, мощность привода равна среднему из диапазона рабочей мощности рубительной установки.

Таким образом, изменение мощности на валу двигателя Стирлинга определяется изменением нагрузки рубительной установки. Мощность на валу барабана (или диска) рубительной установки требуемая для измельчения древесины определенных параметров находится по формуле (13) [6]:

$$N_{\text{руб.}} = P_{\text{уд}} \cdot d^2 \cdot z \cdot w / 4 \cdot 2 \cdot \cos a_1 \cdot \cos a_2, \quad (13)$$

где $P_{уд}$ – удельная сила резания, d – диаметр полена, z – число ножей барабана рубительной установки, ω – угловая скорость вращения барабана, α_1 и α_2 – углы соприкосновения полена с режущей кромкой ножа.

Удельная сила резания находится по формуле (14) [6]:

$$P_{уд} = P_{уд(\alpha_1, \alpha_2)} \cdot a_r \cdot a_w \cdot a_t \cdot a_s, \quad (14)$$

где $P_{уд(\alpha_1, \alpha_2)}$ – удельная касательная сила резания, зависящая от угла встречи (α_1) и угла наклона (α_2), a_r – коэффициент, учитывающий затупление режущих ножей (при острых ножах $a_r = 1$, при затупленных $a_r = 1,25$), a_w – коэффициент учитывающий влажность измельчаемой древесины (для влажности 25-30 % $a_w = 1,1$; для влажности 50-57 % $a_w = 1,0$), a_t – коэффициент, вводимый при переработке мороженой древесины ($a_t = 1,4$), a_s – коэффициент, учитывающий породу древесины (для сосны $a_s = 1$).

Количество вторичной тепловой энергии от двигателя Стирлинга вычисляется как сумма тепловой энергии системы охлаждения двигателя и тепловой энергии уходящих дымовых газов. Объем располагаемой тепловой энергии на сушку определяется спецификой теплового баланса двигателя Стирлинга (рис. 1).

Таким образом, мощность вторичных тепловыделений двигателя Стирлинга составляют 48% от теплового эквивалента топлива, подводимого к системе энергообеспечения или 187,5% от мощности на валу стирлинга. Количество располагаемой тепловой энергии, которую можно направить от стирлинга вместе с сушильным агентом в сушилку производимой щепы находится по формуле (15):

$$Q_{расч} = N_{стирл} \cdot k_c \cdot k_{ном}, \quad (15)$$

где $N_{стирл}$ – мощность на валу двигателя Стирлинга в каждый момент времени, определяемая по формуле (12); k_c – коэффициент определяющий объем тепловых выбросов от двигателя Стирлинга, зависит от конструкции

и эффективности двигателя (принимается для данной модели $k_c = 1,875$), k_{nom} - коэффициент, учитывающий потери в теплообменниках, газоходах и воздухоходах (принимается для данной модели $k_{nom} = 0,1$).

Используемые константы:

$r_0 = 2439$ кДж/кг - теплота испарения воды при 0 °С,

$c_g = 1,97$ кДж/(кг·К) - теплоемкость водяного пара,

$I_{cm1} = 67$ Вт/м°С - коэффициент теплопроводности металлической стенки корпуса сушилки-контейнера,

$I_{cm2} = 0,0012$ Вт/м°С - коэффициент теплопроводности слоя теплоизоляционного покрытия.

Выводы

Таким образом, разработанная математическая модель позволяет оценить влияние на количество тепла потребного для конвективной сушки щепы таких параметров, как начальная и конечная влажность щепы, а также внешних факторов системы, таких как температура окружающего воздуха, скорость ветра; позволяет определять количество располагаемой вторичной тепловой энергии от двигателя Стирлинга, которую можно направить на сушку щепы в зависимости от задаваемых параметров, объем тепловых потерь в зависимости от конструктивных параметров сушилки.

Задаваемые параметры:

Температура окружающей среды, скорость ветра, начальная влажность сырой щепы, температура сушильного агента, геометрические размеры производимой щепы, толщина (диаметр) измельчаемой древесины.

Определяемые параметры установки:

Располагаемая мощность системы теплоснабжения сушилки, производительность мобильной технологической линии, количество тепла потребляемого сушилкой, количество не используемых тепловых потерь.

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы» (государственный контракт № 16.552.11.7089 от 12 июля 2012 г.) с использованием оборудования ЦКП «ЭБЭЭ» ФГБОУ ВПО «ПГТУ».

Библиографический список

1. Интернет – журнал «Лесопромышленник» [Электронный ресурс]. - Режим доступа: [www.url : http://www.lesopromyshlennik.ru/bioenergia/bio_4.html](http://www.lesopromyshlennik.ru/bioenergia/bio_4.html). – 01.11.2012.
2. Анисимов П.Н. Онучин Е. М. Способы повышения эффективности производства топливной щепы в условиях лесосеки с помощью мобильных технологических линий с автономным энергообеспечением на базе древесного топлива [Электронный ресурс] / П. Н. Анисимов, Е. М. Онучин // Научный журнал «Аспект». - 2013. - Режим доступа: [www.url : http://asconf.com/index.php?lang=rus](http://asconf.com/index.php?lang=rus). – 01.05.2013.
3. Онучин, Е. М. Адаптивно-модульные технические средства для лесного комплекса [Текст] / Е. М. Онучин, В. А. Грязин // Вестник Марийского государственного технического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование [Текст]. – 2011. – № 3. – С. 45–49.
4. Сидыганов, Ю. Н. Модульные машины для рубок ухода и лесовосстановления: монография [Текст] / Ю. Н. Сидыганов, Е. М. Онучин, Д. М. Ласточкин. – Йошкар-Ола: Марийский государственный технический университет, 2008. – 336 с.
5. Уокер, Г. Двигатели Стирлинга [Текст] : пер. с англ. Б В. Сутугина и Н В.Сутугина. — М.: Машиностроение, 1985.—408 с.: ил.
6. Шелгунов, Ю.В. Машины и оборудование лесозаготовок, лесосплава и лесного хозяйства [Текст] : учеб для вузов. – М.: Лесн. пром-сть, 1982. - 520 с.
7. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент [Текст] / под. общей ред. В. А. Григорьева, В. М. Зорина. - М. : Энергоатомиздат, 1988. - 560 с.: ил.
8. Леденев, В. И., Матвеева И. В. Физико-технические основы эксплуатации наружных кирпичных стен гражданских зданий [Текст] / В.И. Леденев, И.В. Матвеева —Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2005 —160 с.

References

1. Internet – zhurnal «Lesopromyshlennik» [Elektronnyj resurs]. - Rezhim dostupa: [www.url : http://www.lesopromyshlennik.ru/bioenergia/bio_4.html](http://www.lesopromyshlennik.ru/bioenergia/bio_4.html). – 01.11.2012.
2. Anisimov P.N. Onuchin E. M. Sposoby povysheniya jeffektivnosti proizvodstva toplivnoj shhepy v uslovijah leseki s pomoshh'ju mobil'nyh tehnologicheskikh linij s <http://ej.kubagro.ru/2013/05/pdf/82.pdf>

avtonomnym jenergoobespecheniem na baze drevesnogo topliva [Elektronnyj resurs] / P. N. Anisimov, E. M. Onuchin // Nauchnyj zhurnal «Aspekt». - 2013. - Rezhim dostupa: [www.url : http://asconf.com/index.php?lang=rus](http://asconf.com/index.php?lang=rus). - 01.05.2013.

3. Onuchin, E. M. Adaptivno-modul'nye tehnicheckie sredstva dlja lesnogo kompleksa [Tekst] / E. M. Onuchin, V. A. Grjazin // Vestnik Marijskogo gosudarstvennogo tehnicheckogo universiteta. Serija: Les. Jekologija. Prirodopol'zovanie [Tekst]. - 2011. - № 3. - S. 45-49.

4. Sidyganov, Ju. N. Modul'nye mashiny dlja rubok uhoda i lesvosstanovlenija: monografija [Tekst] / Ju. N. Sidyganov, E. M. Onuchin, D. M. Lastochkin. - Joshkar-Ola: Marijskij gosudarstvennyj tehnicheckij universitet, 2008. - 336 s.

5. Uoker, G. Dvigateli Stirlinga [Tekst] : per. s angl. B V. Sutugina i N V. Sutugina. — M.: Mashinostroenie, 1985.—408 s.: il.

6. Shelgunov, Ju.V. Mashiny i oborudovanie lesozagotovok, lesosplava i lesnogo hozjajstva [Tekst] : uceb dlja vuzov. - M.: Lesn. prom-st', 1982. - 520 s.

7. Teoreticheskie osnovy teplotehniki. Teplotehnicheckij jeksperiment [Tekst] / pod. obshhej red. V. A. Grigor'eva, V. M. Zorina. - M. : Jenergoatomizdat, 1988. - 560 s.: il.

8. Ledenev, V. I., Matveeva I. V. Fiziko-tehnicheckie osnovy jekspluatacii naruzhnyh kirpichnyh sten grazhdanskih zdanij [Tekst] / V.I. Ledenev, I.V. Matveeva —Tambov: Izd-vo TGTU, 2005 —160 s.