

DOI 10.23859/1994-0637-2017-2-77-4
УДК 674.08:662.818

© Любов В.К., Попов А.Н.,
Попова Е.И., Ярков Д.А., 2017

Любов Виктор Константинович

Доктор технических наук, профессор,
Северный (Арктический) федеральный
университет им. М.В. Ломоносова
(Архангельск, Россия)
E-mail: vk.lubov@mail.ru

Lyubov Viktor Konstantinovich

Dr.Sci.Tech., Professor, Northern (Arctic)
Federal University named after M.V. Lomonosov
(Arkhangelsk, Russia)
E-mail: vk.lubov@mail.ru

Попов Анатолий Николаевич

Ассистент, Северный (Арктический)
федеральный университет
им. М.В. Ломоносова (Архангельск, Россия)
E-mail: wav1@inbox.ru

Popov Anatoly Nikolayevich

Assistant, Northern (Arctic) Federal University
named after M.V. Lomonosov
(Arkhangelsk, Russia)
E-mail: wav1@inbox.ru

Попова Евгения Игоревна

Ассистент, Северный (Арктический)
федеральный университет
им. М.В. Ломоносова (Архангельск, Россия)
E-mail: ev.popova@narfu.ru

Popova Evgeniya Igorevna

Assistant, Northern (Arctic) Federal
University named after M.V. Lomonosov
(Arkhangelsk, Russia)
E-mail: ev.popova@narfu.ru

Ярков Денис Александрович

Студент, Северный (Арктический)
федеральный университет
им. М.В. Ломоносова (Архангельск, Россия)
E-mail: yarkov.d.a.@edu.narfu.ru

Yarkov Denis Aleksandrovich

3th year student of Northern (Arctic) Federal
University named after M.V. Lomonosov
(Arkhangelsk, Russia)
E-mail: yarkov.d.a.@edu.narfu.ru

**ЭНЕРГООБСЛЕДОВАНИЕ
ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА
ДРЕВЕСНЫХ ГРАНУЛ**

**SURVEY OF PROCESS FOR THE
PRODUCTION OF GRANULATED
FUEL WOOD**

Аннотация. В данной статье представле-
ны результаты комплексного энергетическо-
го обследования промышленной линии гра-
нулирования побочных продуктов лесопиль-
ного производства. Исследована эффектив-
ность работы линии сушки с теплогенератор-
ом, использующим древесное топливо, и их
воздействие на окружающую среду. Изучено
изменение теплотехнических характеристик
и фракционного состава древесного материа-
ла в процессе гранулирования. Предложены
рекомендации по энергосбережению.

Abstract. The article presents the results of
a comprehensive energy survey of industrial
granulating line of by-products of sawmill plant.
The operational efficiency of drier with heat
generator operating on fuel wood and its envi-
ronmental impact are investigated in this work.
Changes of thermotechnical characteristics and
composition wood raw material during granulat-
ing are studied. Recommendations for energy
saving are offered.

Ключевые слова. Древесные гранулы,
топочная камера, теплогенератор, эмиссия
оксидов азота и оксида углерода, пресс-
гранулятор, мельница, потери тепла, бара-
банная сушилка.

Key words. Wood granules, furnace cham-
ber, heat generator, emissions of nitrogen and
carbon oxides, pellet mill, grinding mill, heat
loss, drum drier.

Введение

В индустриально развитых странах для уменьшения воздействия «парниковых» газов на климат планеты активно поощряется замена ископаемых топлив биотопливом. Однако побочные продукты заготовки, обработки и переработки древесины ввиду их высокой влажности, низкой энергетической плотности и крайне неоднородного гранулометрического состава относятся к трудносжигаемым топливам. Перспективным направлением облагораживания отходов переработки биомассы является их гранулирование. Наша страна располагает огромным сырьевым потенциалом для производства прессованного биотоплива, и последние годы данное направление набирает высокие темпы развития. Гранулирование древесной биомассы позволяет получить высококачественное экологически чистое топливо однородного гранулометрического состава, обеспечивающее возможность замещения невозобновляемых топлив и значительного снижения экологического воздействия энергетики на окружающую среду [1].

Основная часть

В ЗАО «Лесозавод 25» на протяжении многих лет успешно ведутся работы по комплексному повышению эффективности энергетического использования побочных продуктов лесопильного производства. В 2015 г. на Цигломенском участке ЗАО «Лесозавод 25» был реализован очередной этап программы комплексного использования древесного сырья, закончен монтаж и запущен в работу цех по производству древесных гранул из побочных продуктов лесопильного производства. В цехе смонтированы три линии по производству гранул диаметром 8 мм, на двух из них («А» и «Б») сушильный агент вырабатывается с помощью теплогенерирующих установок, работающих на древесном топливе и оборудованных шнековыми системами подачи топлива на неподвижные колосниковые решетки. Для сушки древесного сырья на линии «Г» используется сушильная установка ленточного типа.

При проведении энергетического обследования основного оборудования цеха по производству древесных гранул в работе находились две линии («Б» и «Г»), при этом суммарная производительность цеха по гранулам изменялась в диапазоне 4,3...5,0 т/ч. Здание цеха (размером в плане 71×35 м) имеет склад топлива и склад сырья для производства гранул. Оба склада оборудованы «живым» дном. Со склада топлива некондиционная щепа с помощью транспортеров и элеваторов поступает на шнековые питатели теплогенераторов.

Исходное сырье с помощью транспортеров направляется в сито барабанного типа, где проходит сортировку с отделением крупных фракций и с помощью системы транспортеров подается в два промежуточных бункера, из которых поступает в индивидуальные дозирочные бункера. Из бункеров древесное сырье шнеками подается в смесительные камеры, расположенные перед барабанными сушилками линий «А» и «Б». На линии «Г» сырье поступает во входной патрубок сушильной установки ленточного типа.

Топливо с помощью шнекового питателя снизу выталкивается на неподвижную колосниковую решетку теплогенератора, под которую в три зоны центробежным вентилятором подается первичный воздух. Стены топочной камеры теплогенератора выполнены из огнеупорной шамотной обмуровки. Для обеспечения требуемой полноты выгорания горючих компонентов топлива и уменьшения выноса летучей золы она оборудована камерой догорания.

Воздух на вторичное дутье забирается из помещения цеха с помощью отверстий (Ø150 мм), расположенных на наружной поверхности обшивки теплогенератора, проходит по кольцевому каналу, охлаждая обмуровку топки, и поступает в объем

камеры сгорания у фронтальной стены. Вторичный воздух обеспечивает дожигание горючих компонентов топлива и позволяет уменьшить образование оксидов азота. Его поступление в теплогенератор обеспечивается за счет разрежения, создаваемого в газовом и сушильном трактах дымососом.

Камера сгорания топки частично отделена от камеры догорания стенкой, выполненной из огнеупорного материала. В конечной части камеры сгорания к ней присоединена индивидуальная дымовая труба, используемая при растопке теплогенератора и в аварийных ситуациях. При выходе теплогенератора на нормальный режим работы она отключается от газового тракта с помощью заслонки с гидравлическим приводом. После камеры догорания дымовые газы поступают в смесительную камеру, где разбавляются воздухом, забираемым из помещения цеха с помощью отверстий, расположенных на наружной поверхности обшивки камеры. Проходя по кольцевому каналу смесительной камеры, воздух подогревается, охлаждая ее обмуровку, и поступает в дымовые газы, снижая их температуру до безопасных значений. В конце смесительной камеры в нижней части имеется вертикальная стенка, обеспечивающая турбулизацию потока для улучшения перемешивания дымовых газов с воздухом.

Подготовленный сушильный агент подхватывает влажное сырье и транспортирует его в одноходовую сушилку барабанного типа длиной 12,5 м. Для уменьшения потерь тепла в окружающую среду сушилка покрыта слоем теплоизоляции и снаружи – металлической обшивкой. Температура сушильного агента фиксируется штатной термопарой. В зоне подачи древесного сырья в сушильный агент установлены форсунки системы пожаротушения.

При проведении энергетического обследования температура сушильного агента на входе в барабанную сушилку составляла 250...400 °С, а его расход 19740...21470 $\text{м}^3/\text{ч}$.

Цех по производству древесных гранул оснащен автоматической системой управления процессами технологической схемы, большая часть электропривода имеет частотное регулирование производительности.

После сушильной установки высушенное сырье проходит сепарационную камеру, где отделяются наиболее крупные частицы, и далее двухфазный поток транспортируется в циклонный пылеуловитель, где высушенный материал отделяется от отработанного сушильного агента, который с помощью дымососа направляется в индивидуальную дымовую трубу.

В ходе энергетического обследования проведено три опыта, при этом в топку теплогенератора линии «Б» подавалось древесное топливо, в составе которого преобладала щепа (90 %), доля опилок составляла 10 %. Сжигаемое древесное топливо имело высокую степень неоднородности гранулометрического состава (средний коэффициент полидисперсности $n = 1,151$, а коэффициент, характеризующий крупность состава, $b = 5,07 \cdot 10^{-6}$). Массовая доля, приходящаяся на куски биотоплива размером > 25 мм, составляла более 51 %.

Из данных таблицы следует, что исходное еловое сырье для производства гранул имело умеренную влажность (см. табл.), его пробы отбирались до барабанного сита. Гранулометрический состав древесного сырья (рис. 1) имел высокую степень неоднородности ($n = 0,698$; $b = 3,618 \cdot 10^{-3}$). Однако необходимо учитывать, что сито барабанного типа повышает степень однородности гранулометрического состава исходного сырья и его тонкость. Теплотехнические характеристики древесного сырья до и после барабанной сушилки, а также топлива приведены в таблице.

Таблица

Наименование величины	Обозначение, размерность	Опыт №1	Опыт №2	Опыт №3
Производительность теплогенератора	Q , МВт	2,293	2,597	2,806
Влажность топлива	W_t^r , %	29,29	29,29	29,29
Зольность топлива	A^r , %	0,22	0,22	0,22
Низшая теплота сгорания топлива	Q_{is} , МДж/кг	12,55	12,55	12,55
Температура первичного и вторичного воздуха	t_b , °C	18	18	18
Потери тепла: с химнедожогом	q_3 , %	4,20	3,72	3,22
с мехнедожогом	q_4 , %	0,44	0,44	0,44
в окружающую среду	q_5 , %	0,28	0,25	0,23
Полный расход биотоплива	B , т/ч	0,657	0,744	0,805
Эмиссия NO_x	NO_x , мг/МДж	119	116	110
Эмиссия CO	CO, мг/МДж	690	664	597
КПД брутто топки теплогенератора	$\eta_{бр}$, %	95,07	95,58	96,10
Температура газов перед сушилкой	$\vartheta_{свш}$, °C	250	316	377
Избыток воздуха в сушильном агенте	$\alpha_{свш}$	8,45	7,78	7,48
Количество сушильного агента на 1 кг сырья	q_1 , кг/кг	2,848	1,922	1,436
Температура газов за сушилкой	ϑ_{yx} , °C	55	58	62
Избыток воздуха в газах перед дымо-сосом	α_{yx}	8,75	8,08	7,78
Расход сушильного агента за сушилкой с учетом испаренной влаги	G , нм ³ /ч	21793	22970	24049
Суммарные потери теплоты от наружного охлаждения линии «Б»	q_5 , %	1,95	1,69	1,56
Влажность сырья до и после сушилки	W_t^r , %	51,35/ 10,72	51,35/ 10,72	51,35/ 10,72
Зольность сырья до и после сушилки	A^d , %	0,34/ 0,36	0,34/ 0,36	0,34/ 0,36
Выход летучих до и после сушилки	V^{daf} , %	85,46/ 85,22	85,46/ 85,22	85,46/ 85,22
Низшая теплота сгорания сырья до и после сушилки	Q_{is} , МДж/кг	7,86/ 16,53	7,86/ 16,53	7,86/ 16,53
Температура газов после пылеуловителя	$\vartheta_{пу}$, °C	50	53	57
Удельный расход условного топлива на 1 т гранул	v , кг у.т/т	290,0	279,5	278,0
Влажность древесных гранул	W_t^r , %	5,71		
Зольность гранул на сухую массу	A^d , %	0,37		
Выход летучих веществ на горючую массу	V^{daf} , %	84,76		
Кажущаяся плотность	ρ_k , г/см ³	1,199		
Насыпная плотность	$\rho_{нас}$, г/см ³	0,68		
Механическая прочность	DU, %	98,46		
Низшая теплота сгорания гранул	Q_{is} , МДж/кг	17,61		

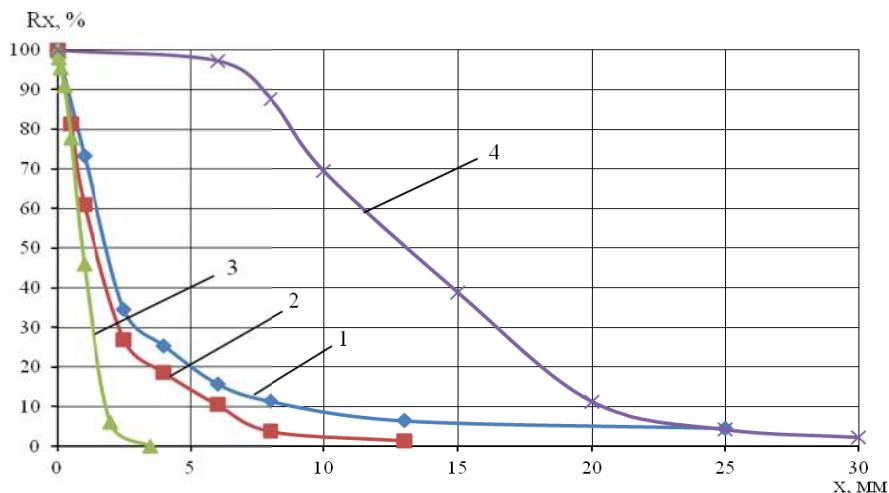


Рис. 1. Изменение фракционного состава древесного материала в процессе гранулирования: 1 – исходное сырье до барабанного сита; 2 – сырье после сушилки; 3 – древесная мука после мельницы; 4 – древесные гранулы

Температура газов перед сушильной установкой не превышала $400\text{ }^{\circ}\text{C}$. Расход сушильного агента до смесительной камеры теплогенератора составлял $7840\text{--}8485\text{ м}^3/\text{ч}$. Имеющий место уровень температур газов перед сушильной установкой прямоточного типа, позволяет обеспечить ее пожаробезопасность [1].

Процесс сушки древесного сырья может сопровождаться выходом летучих веществ из наиболее мелких фракций, что может приводить к потере части горючих веществ и создавать угрозу воспламенения высушиваемого материала. В исследованных режимах работы сушильной установки потери горючих веществ имели минимальные значения. Работа сушильных установок с температурой газов не более $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ позволяет обеспечить пожаробезопасные режимы, однако снижает экономические показатели процесса сушки.

Энергетическое обследование показало, что существующая конструкция системы ввода вторичного воздуха не позволяет обеспечить его эффективное перемешивание с дымовыми газами. Поэтому работа теплогенератора характеризовалась высокими избытками воздуха в камере сгорания ($\alpha_t = 2,8\text{--}3,2$) и образованием большого количества угарного газа ($K_{\text{CO}} = 1480\text{--}1717\text{ мг/м}^3$ при $K_{\text{O}_2} = 6\text{ }\%$). Потери тепла с химическим недожогом топлива в исследованном диапазоне нагрузок имели большие значения, что в значительной степени связано с конструктивными особенностями теплогенератора. При определении КПД брутто топки учитывались потери тепла от химического и механического недожога, с физической теплотой шлака и провала, а также часть суммарной потери тепла в окружающую среду (q_5^*), приходящаяся на топочную камеру теплогенератора ($\eta_{\text{топки}} = 100 - q_3 - q_4 - q_6 - q_5^*$).

Суммарное сопротивление теплогенератора с элементами сушильного тракта изменялось в диапазоне $2,05\text{--}2,18\text{ кПа}$. Сопротивление отдельных элементов (опыт №3) составляло: 400 – теплогенератора с камерой смешения; 420 – сушилки; 1360 Па – пылеотделителя.

Анализ условий тепловой работы теплогенератора и сушильной установки показал, что потери тепла с уходящими газами, если использовать при их определении подход, принятый для котельных установок, составляют $8,16\text{--}9,30\text{ }\%$ (с учетом эн-

тальпии водяных паров, выделившихся при сушке сырья). Величина данной потери повышается с увеличением производительности установки. В качестве балансового сечения использовалось сечение газохода после циклонного пылеотделителя, где коэффициент избытка воздуха составлял 7,78–8,75.

Результаты энергетического обследования линии гранулирования

Потери тепла с механической неполнотой сгорания и с физической теплотой шлака для теплогенератора имели низкий уровень, что объясняется маленькой зольностью древесного топлива в период проведения обследования и не высоким содержанием горючих веществ в летучей золе ($C_{\text{г.ун}}^{\text{г}} = 11,9 \%$).

Для определения потерь тепла в окружающую среду использовался относительный метод [2], при этом ограждающие конструкции всех элементов разбивались на отдельные участки, в каждом из которых с помощью пирометра измерялись средние температуры. Для исключения возможных погрешностей, возникающих при реализации относительного метода, была произведена тепловизионная съемка всех элементов обследуемой линии (рис. 2). Для этого использовался тепловизор «Testo 885-2», позволяющий получить в реальном времени картину распределения теплоты на поверхности объекта с точностью до 0,1 °С.

На основании результатов замеров средних температур на 300 участках с учетом данных тепловизионной съемки были рассчитаны коэффициенты теплоотдачи, а затем потери тепла в окружающую среду. Потери тепла в окружающую среду для отдельных элементов линии «Б» (опыт №3) составили: теплогенератор – 0,23; смесительная камера – 0,11; смесительная камера сушилки – 0,03; сушилка – 0,57; сепарационная камера – 0,27; газоходы – 0,15 и циклон – 0,19 %. При проведении балансовых опытов КПД брутто теплогенератора и сушильной установки (с учетом смесительных камер, сепарационной камеры, циклона и соединительных газоходов), если использовать при его определении подход, принятый для котельных установок, изменялся в диапазоне от 85,25 до 85,69 %.

Если при определении КПД брутто установки считать полезно используемой теплоту, затраченную на нагрев древесного сырья и испарение из него влаги, а подведенной теплотой, располагаемую теплоту древесного топлива, поступающего в топку теплогенератора, с учетом его расхода, то тогда КПД брутто такой установки изменялся в диапазоне 26,10–27,55 %.

С увеличением производительности сушильной линии удельный расход условного топлива на выработку 1 т гранул снижается. Повышенный уровень выбросов угарного газа связан с конструктивными особенностями теплогенератора, а также с работой линии сушки на нагрузках ниже номинальной.

Высушенное сырье из-под сепарационной камеры и циклонного пылеотделителя с помощью системы транспортеров и элеватора подается в инерционно-гравитационный сепаратор, отделяющий крупные фракции и инородные включения, после чего древесное сырье поступает в молотковую мельницу. В мельнице происходит измельчение материала. Полученная древесная мука поступает в систему пневмотранспорта, при этом концентрация твердой фазы в транспортирующем агенте составляла 0,373 кг/нм³, расход воздуха в линии пневмотранспорта был равен 11130 нм³/ч, а его скорость 17,2 м/с. После первой ступени пылеотделения поток идет в циклонный пылеотделитель второй ступени, где происходит его окончательная очистка. Далее по воздуховоду со скоростью 18,4 м/с он движется к вентилятору, с помощью которого направляется в трубу и выводится за пределы цеха.

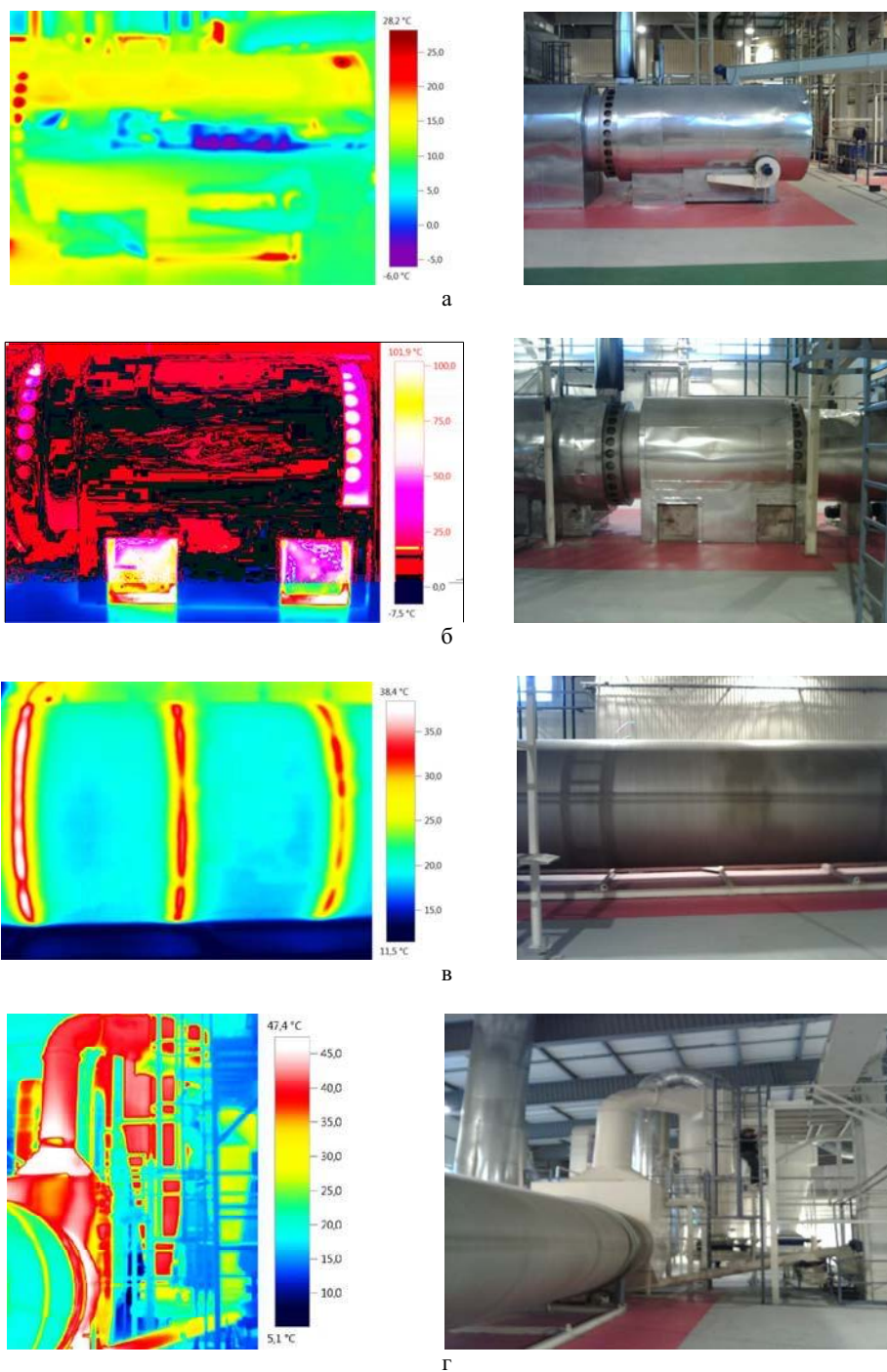


Рис. 2. Тепловизионная съемка: а – теплогенератора с устройствами забора вторичного воздуха; б – смесительной камеры; в – барабанной сушилки; г – сепарационной камеры и циклона

Отсепарированная мука с помощью транспортеров направляется к элеватору, при этом в поток дисперсного материала добавляется мелкодисперсная не сгранулированная пыль, отделенная от пеллет в охладителе. Данная пыль воздушным потоком транспортируется к двухступенчатому пылеуловителю циклонного типа. Очищенный воздух центробежным вентилятором направляется в трубу, с помощью которой выводится за пределы цеха.

Древесная мука с помощью транспортеров и элеватора подается в бункер с «живым» дном. Исследования гранулометрического состава муки показали, что она имеет полидисперсный состав ($n = 1,496$) и относятся к тонкодисперсным материалам ($b = 2,772 \cdot 10^{-5}$) (см. рис. 1).

Их бункера древесная мука с помощью системы транспортеров и элеваторов подается в приемные бункера пресс-грануляторов, далее – в смесительные камеры, после которых поступает в рабочие камеры грануляторов, где она продавливается через радиальные отверстия матрицы с помощью прижимающих роликов, что приводит к формированию гранул. Выходящие из отверстий матрицы гранулы обламываются с помощью неподвижного ножа.

На выходе из пресса гранулы имеют высокую температуру, поэтому они направляются в охладительную установку. Режим охлаждения оказывает сильное влияние на прочностные свойства гранул [3]. После охлаждения гранулы с помощью цепного конвейера подаются на сортировку, где происходит отделение кондиционных гранул от крошки, которая возвращается в технологический цикл. После сортировки готовые гранулы поступают на склад.

Исследования теплотехнических характеристик, механической прочности и гранулометрического состава еловых гранул показало, что они соответствуют всем требованиям российских и европейских стандартов.

Выводы

1. Эффективность работы сушильной установки определяется температурой газов на ее входе, чем выше данная температура, тем меньше расход топлива и затраты электроэнергии на производство 1 т древесных гранул. Однако повышение температуры сушильного агента увеличивает пожароопасность установки. Учитывая, что в барабанных сушилках реализована прямоточная схема сушки, компромиссным решением являются режимы работы установки с температурой сушильного агента 380–400 °С, которые позволят при приемлемых удельных затратах энергоресурсов обеспечить пожаробезопасность установки.

2. Определяющее влияние на экологические показатели сушильной установки оказывает эффективность работы теплогенератора. Конструктивные особенности теплогенератора линии «Б» не позволяют обеспечить интенсивное перемешивание вторичного воздуха с продуктами сгорания, что приводит к повышенной генерации оксида углерода и значительным потерям тепла с химическим недожогом топлива ($q_3 = 4,21–3,23$ %). Данные показатели были получены при работе теплогенератора на древесном топливе высокого качества. При снижении качественных показателей топлива выбросы угарного газа увеличатся.

3. Анализ результатов экспериментального определения потерь тепла от элементов линии сушки в окружающую среду показал, что для их определения следует использовать относительный метод, дополненный тепловизионной съемкой, позволяющей исключить погрешности, возникающие вследствие измерения и усреднения температур в соответствующих участках. Применение обобщающих зависимостей для определения данных потерь, полученных для котельных установок [4], вызывает появление существенных погрешностей.

4. Запуск в работу цеха по производству древесных гранул позволил повысить эффективность комплексного использования древесного сырья в цикле лесопильно-деревообрабатывающего производства.

Литература

1. Любов В.К., Любова С.В. Повышение эффективности энергетического использования биотоплив. Архангельск, 2010. 496 с.
2. Любов В.К., Малыгин П.В., Попов А.Н., Попова Е.И. Определение потерь тепла в окружающую среду на основе комплексного исследования эффективности работы котлов // Теплоэнергетика. 2015. №8. С. 36–40.
3. Любов В.К., Мюллер О.Д., Попов А.Н., Малыгин П.В., Попова Е.И. Исследование технологического процесса производства древесного гранулированного топлива и эффективности его энергетического использования // Теплофизика и энергетика: конференция с международным участием «VIII Всероссийский семинар вузов по теплофизике и энергетике»: сборник докладов. Екатеринбург: УрФУ, 2013. С. 350–357.
4. Тепловой расчет котлов (нормативный метод). СПб., 1998. 256 с.

References

1. Liubov V.K., Liubova S.V. *Povyshenie effektivnosti energeticheskogo ispol'zovaniia biotopliv* [Increasing the efficiency of energy use of biofuels]. Arkhangel'sk, 2010. 496 p.
2. Liubov V.K., Malygin P.V., Popov A.N., Popova E.I. *Opredelenie poter' tepla v okruzhaiushchuiu sredu na osnove kompleksnogo issledovaniia effektivnosti raboty kotlov* [Determination of heat losses to the environment on the basis of a comprehensive study of the efficiency of boiler operation]. *Teploenergetika* [Heat power engineering], 2015, no. 8, pp. 36–40.
3. Liubov V.K., Miuller O.D., Popov A.N., Malygin P.V., Popova E.I. *Issledovanie tekhnologicheskogo protsessa proizvodstva drevesnogo granulirovannogo topliva i effektivnosti ego energeticheskogo ispol'zovaniia* [Research of the technological process of production of wood granulated fuel and the efficiency of its energy use]. *Teplofizika i energetika: konferentsiia s mezhdunarodnym uchastiem «VIII Vserossiiskii seminar vuzov po teplofizike i energetike»: sbornik dokladov* [Thermophysics and Energy: Conference with International Participation "VIII All-Russian Seminar of Higher Schools in Thermophysics and Energy": a collection of reports]. Ekaterinburg: UrFU, 2013, pp. 350–357.
4. *Teplovoi raschet kotlov (normativnyi metod)* [Thermal calculation of boilers (normative method)]. SPb., 1998, 256 p.

Любов В.К., Попов А.Н., Попова Е.И., Ярков Д.А. Энергообследование процесса производства древесных гранул // Вестник Череповецкого государственного университета. 2017. №2(77). С. 31–39.

For citation: Lubov V.K., Popov A.N., Popova E.I., Yarkov D.A. Survey of process for the production of granulated fuel wood. *Bulletin of the Cherepovets State University*, 2017, no. 2 (77), pp. 31–39.