

УДК 674.047

## Повышение эффективности сушки измельченной древесины при производстве пеллет на ООО «Экотопливо»

А.А. Орлов<sup>а</sup>, Ю.А. Корчук<sup>б</sup>

Сибирский государственный технологический университет, пр. Мира 82, Красноярск, Россия

<sup>а</sup>orlov.tepl@mail.ru, <sup>б</sup>korchuk75@mail.ru

Статья поступила 2.09.2013, принята 21.11.2013

*Проведено экспертное обследование линии производства топливных древесных гранул (пеллет) мощностью 2000 кг/ч. Средняя фактическая производительность линии за 5 месяцев с момента ввода в эксплуатацию составила 200 кг/ч. Выявлены конструктивные недостатки основного оборудования линии: теплогенератора, сушильного барабана и пресс-гранулятора. Теоретическая мощность теплогенератора составила 475 кВт. Теплогенератор признан неработоспособным, опасным для персонала и подлежащим замене на современный, с автоматической подачей топлива. Определен фракционный состав древесных частиц после сушки. Проведены замеры скорости агента сушки в барабане. Средняя производительность установленного в линии сушильного барабана составила 366 кг/ч. Установка работала нестабильно по причине регулярных возгораний. Предложено внести в конструкцию сушильной установки изменения – на выходе из барабана установить конвейер для удаления крупных древесных частиц. После технического перевооружения расчетным путем установлено, что производительность участка сушки пеллетной линии возрастет до 1000 кг/ч. Работа участка сушки линии будет более эффективной, стабильной и пожаробезопасной.*

**Ключевые слова:** пеллеты, топливные гранулы, измельчение сырья, сушка древесных частиц, гранулирование.

## Increase in drying efficiency of crushed wood for pellet production by Ekotoplivo company

A.A. Orlov<sup>а</sup>, Yu. A. Korchuk<sup>б</sup>

Siberian State Technological University, 82 Mira Av., Krasnoyarsk, Russia

<sup>а</sup>orlov.tepl@mail.ru, <sup>б</sup>korchuk75@mail.ru

Received 2.09.2013, accepted 21.11.2013

*Expert monitoring of the production line having the capacity of 2000 kg/h to manufacture fuel wood granules (pellets) has been conducted. The average actual productivity of the line during 5 months has been 200 kg/h since placed in service. The design defects of the line primary equipment – the heat-generator, drying drum and press granulator – have been revealed. The theoretical power of the heat-generator has been 475 kW. The heat-generator has been recognized inoperative, hazardous to the personnel's health and subject to replacement by the modern one equipped with automatic fuel supply. The fractional composition of wood particles after drying has been defined. The measurements of the drying agent velocity in the drying drum have been conducted. The average productivity of the drying drum installed in the line has been 366 kg/h. The plant operation was unstable due to systematic fire outbreaks. It has been proposed to make changes in the drying plant design – to install a conveyor for removing large-sized wood particles at the drying drum exit. After technical upgrading, it has been experimentally established that the productivity of the drying section of the pellet line will increase up to 1000 kg/h. The drying section operation will be more effective, stable and fire- safe.*

**Keywords:** pellets, fuel granules, raw materials crushing, wood particles drying, granulation.

**Введение.** Пеллеты (топливные гранулы) – модифицированное древесное топливо, которое производят путем прессования сухой размолотой древесины. Диаметр пеллет по стандартам различных стран составляет от 6 до 25 мм. Размеры частиц сырья – до 3,0 мм. Зольность древесных гранул – от 0,4 %, а корьевых – до 6 % от массы абсолютно сухого сырья [1].

Пеллеты сжигаются как в промышленных котлоагрегатах с топками прямого горения, так и в бытовых водогрейных котлах. Преимуществом пеллет, по сравнению с другими видами топлива из древесных отходов, является то, что влага из древесины удаляется не в котлоагрегате в процессе сжигания, а на отдельном производст-

ве, которое обеспечивает однородность партий топлива по размерам, влажности и теплоте сгорания.

Основными технологическими операциями при производстве топливных гранул являются: измельчение сырья; сушка древесных частиц; гранулирование; охлаждение и упаковка.

Производительность пеллетной линии зависит от характеристик исходного сырья (порода, фракция, срок хранения и т. п.) и технических параметров основного оборудования. Считается, что головным оборудованием, определяющим плановую производительность линии, является пресс-гранулятор. Однако прессуется только высушенное сырье, следовательно, производи-

тельность линии также зависит от участка суши. На участке суши основным оборудованием являются теплогенератор и сушильный агрегат.

К теплогенератору предъявляются следующие требования: стабильность процесса горения для надежного поддержания температуры топочных газов, которые являются агентом суши древесины; плановый срок службы, что обеспечивается безопасными уровнями температур в топке; механизация и автоматизация процесса сжигания топлива.

Сушилки для измельченной древесины должны обеспечивать равномерную конечную влажность сырья. Малые размеры и развитая наружная поверхность частиц измельченной древесины облегчают процесс суши, который может осуществляться при высокой температуре и скорости агента суши без опасения, что в частицах могут развиваться внутренние сушильные напряжения.

В производстве топливных гранул применяются барабанные сушильные агрегаты, которые относятся к группе конвективных сушилок с пневмомеханическим перемещением материала. Агрегаты подобного типа применяются и в других отраслях промышленности для суши сыпучих материалов (песок, цемент и т. п.).

Производительность сушильного агрегата зависит от ряда факторов, к основным из которых относят: количество передаваемой материалу теплоты  $Q$ , кДж/(м<sup>3</sup>·ч·°C) от агента суши; объем барабана  $V_b$ , м<sup>3</sup>; температура агента суши на входе в барабан; число оборотов барабана и коэффициент заполнения древесными частицами барабана.

**Экспериментальная часть.** Нами проведено экспертное обследование технического состояния линии производства топливных древесных гранул (пеллет) с заявленной производительностью 2000 кг/ч на ООО «ЭкоТопливо» (Республика Хакасия, г. Абаза). Линия изготовлена в Китае и включает следующее оборудование: теплогенератор, дробилку, сушильный барабан, циклон, пресс-гранулятор, упаковочную машину и шкафы управления. Сырье – как древесные отходы от распиловки хвойных пород, поступающие непосредственно с ближайших лесопильных участков, так и многолетние, хранящиеся на полигоне ООО «ЭкоТопливо».

Средняя фактическая производительность данной линии за период эксплуатации в течение 5 месяцев составила 200 кг/ч, что в 10 раз меньше плановой. Основными проблемными участками признаны сушильный барабан с теплогенератором и пресс-гранулятор.

Так, установленный в линии теплогенератор предназначен для сжигания крупнокусковых древесных отходов (колосниковая решетка с размерами 1650×900 мм, высота топочного пространства 900 мм, корпус двухслойный металлический, без футеровки. Наружный корпус имеет отверстия для дополнительного притока воздуха диаметром 90 мм в количестве 5 шт. с каждой стороны относительно загрузки топлива. Газоход выхода топочных газов круглый, диаметром 300 мм (рис. 2)).

Объем топочного пространства данного теплогенератора составил 1,3 м<sup>3</sup>. По литературным данным [2] тепловое напряжение топочного пространства для

твердотопливных топочных устройств, работающих на крупнокусковых древесных отходах (дровах), составляет  $q_v = 400$  кВт/м<sup>3</sup>.



Рис. 1. Теплогенератор

Тогда расчетная тепловая мощность теплогенератора составит:

$$P_v = V_T \cdot q_v = 1,3 \cdot 400 = 520 \text{ кВт}. \quad (1)$$

Однако площадь колосника теплогенератора всего 1,5 м<sup>2</sup>. По данным [3] рекомендуемые параметры для твердотопливных топочных устройств, работающих на дровах, включают поперечную нагрузку на площадь колосника (максимальное количество топлива, которое сжигается за 1 ч)  $q_r = 100$  кг/(м<sup>2</sup>·ч). Следовательно, тепловая мощность по площади колосника без учета КПД теплогенератора равна:

$$P_R = \frac{q_r \cdot R_T \cdot Q_n^p}{1000} = \frac{100 \cdot 1,5 \cdot 2440}{1000} = 366 \text{ кВт}, \quad (2)$$

где  $Q_n^p$  – низшая теплота сгорания дров, ккал/кг. По данным Московского лесотехнического института (МЛТИ) для дров  $Q_n^p = 2440$  ккал/кг [7, табл. 6.1].

У теплогенератора изменена геометрическая форма и частично разрушен колосник в результате воздействия высокой температуры при непродолжительной эксплуатации (рис. 1).

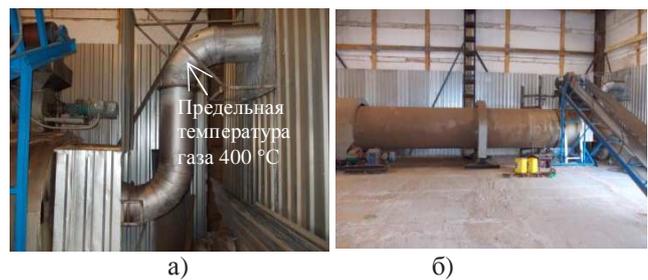


Рис. 2. Газоход а) и сушильный барабан б)

Теплогенератор и сушильный барабан соединены газоходом. Диаметр газохода 0,3 м, суммарная длина 1,5 м, имеются два поворота под углом 90°. Газоход выполнен из стали, не футерованный. Камера смешения топочных газов с воздухом отсутствует.

Сушильный барабан имеет диаметр 1,2 м и суммарную длину 10 м. Длина вращающейся части равна 9 м. Загрузочная и разгрузочная части барабана соединены с вращающейся частью неметаллическим уплотнением. На загрузочной части установлен шлюзовой затвор для подачи измельченной древесины. В разгрузочной части

снизу установлен шлюзовой затвор, сверху – патрубок диаметром 0,3 м, на торце – инспекционный люк. Внутри барабана имеются лопатки (рис. 3). Сушильный барабан (рис. 3) установлен горизонтально, скорость вращения регулируется от 2,4 – 20 мин<sup>-1</sup>.



Рис. 3. Внутренняя конструкция барабана

На рис. 4 приведены типы внутренних насадок барабанных сушилок [9]. Тип 1 используется для сушки крупнокусковых и склонных к налипанию материалов; тип 2 – для малосыпучих крупнокусковых материалов с высокой плотностью; тип 3 – перевалочная система с закрытыми ячейками для материалов с очень мелкими частицами, дающими большое пыление.



Рис. 4. Внутренние насадки барабанных сушилок

Установленный в данной линии барабан по форме и конструкции лопаток можно отнести к типу 1, который наименее пригоден для сушки измельченных древесных частиц. Это обстоятельство отрицательно сказывается на равномерности конечной влажности сырья перед гранулированием.

Газоход соединяет сушильный барабан и пылевой вентилятор (рис. 5). Он имеет входное сечение 260×260 мм. В этом сечении замерена скорость воздушного потока в пяти точках, которая составила 16, 29, 25, 23, 24 м/с соответственно. Далее входное квадратное отверстие переходит в круглое диаметром 300 мм. Длина газохода круглого сечения составляет 2000 мм.



Рис. 5. Газоход соединительный

Для поверочного расчета производительности сушильного барабана были отобраны пробы сырья на начальную и конечную влажность, а также на фракционный состав. Исследования проводились в специализированных лабораториях кафедр теплотехники, технологии конструкционных материалов и древесиноведения СибГТУ.

**Основные результаты и выводы.** Начальная влажность измельченной древесины на входе в сушильный барабан составила 66 %, конечная – 12 %. В табл. 1 приведен фракционный состав сырья на выходе из барабана.

Фракционный состав отобранных проб близок по характеристикам к измельченной древесине, применяемой в процессе производства древесно-стружечных плит (ДСтП). Следовательно, для расчета производительности сушильного барабана, установленного в пеллетной линии, можно применять методики для сушилок измельченной древесины линий производства ДСтП, которые приведены в работах [4].

Ввиду простота линии по техническим причинам оценка производительности сушильного барабана производилась расчетным путем тремя методами: по рабочему объему барабана, по расходу газов и по подводимой тепловой мощности от теплогенератора.

Таблица 1

Характеристика исследуемых древесных частиц после сушильного барабана

Показатели	Фракция								
	–	$\frac{10}{7}$	$\frac{7}{5}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{2}{1}$	$\frac{1}{0,5}$	$\frac{0,5}{0,25}$	$\frac{0,25}{\text{дно}}$
	Кодированный номер фракции								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Фракционный состав, %	–	0,40	1,27	43,1	5,12	33,28	11,05	2,21	0,60
Средние размеры, мм:	–	16,9	13,8	7,50	5,00	3,00	1,00	0,10	0,05
длина	–	3,06	2,40	1,50	1,10	0,90	0,30	0,01	0,01
ширина	–	1,08	0,62	0,40	0,30	0,20	0,10	0,01	0,01
толщина	–								
Средние размеры исследуемой партии древесных частиц, мм				$l_{cp}$			$b_{cp}$		$S_{cp}$
				4,99			1,11		0,28

Рабочий объем сушильного барабана равен 10,2 м<sup>3</sup>. По данным проф. М.Ю. Лурье [5] напряжение барабана по испаренной влаге составляет 30-40 кг/(м<sup>3</sup>\*ч). Следовательно, максимальная производительность данного сушильного барабана равна 400 кг/ч испаренной влаги.

Замеренный расход газов на выходе из барабана составил 1,58 кг/с. Принимаем влажность отработанного сушильного агента 80 %, тогда по I-d-диаграмме [6] находим 90 г влаги на 1 кг сухого воздуха. Следовательно, за 1 секунду удаляется 140 г влаги, а за 1 ч – 500 кг. Если влажность отработанного сушильного агента составит 60 %, то получаем 50 г влаги на 1 кг воздуха, тогда за 1 секунду удаляется 80 г влаги, а за 1 ч – 285 кг.

По данным [2] для предотвращения активного окисления предельные температуры топочных газов перед подачей в сушильный барабан должны составлять не более 400 °С. Тогда количество теплоты,  $кВт$ , вносимое сушильным агентом (топочным газом) на входе в барабан, можно рассчитать по формуле:

$$Q_{ex}^0 = c_{pm} \cdot M(T_{ex} - T_0), \quad (3)$$

где  $c_{pm}$  – средняя массовая изобарная теплоемкость газа,  $кДж/(кг \cdot K)$  [7];  $M$  – массовый расход газа,  $кг/с$ ;  $T_{ex}$ ,  $T_0$  – температура соответственно газа на входе в сушилку и окружающей среды,  $^{\circ}K$ .

Фактические температурные уровни топочных газов за время эксплуатации линии не превышали величины 300 °С, а при более высоких температурах сырье в барабане воспламенялось. Следовательно, по (3) подводимая тепловая мощность агента сушки на входе в сушилку составит 475 кВт. Эту мощность можно считать пиковой (кратковременной). В случае применения продолжительной расчетной тепловой мощности для теплогенератора фактическая производительность барабана составит 366 кг/ч по испаренной влаге.

Конструктивно установленная в линии барабанная сушилка относится к пневмомеханическим, которые представляют собой полый вращающийся барабан с внутренними насадками. Скорость сушильного агента меньше скорости витания частиц, поэтому древесные частицы находятся в полувзвешенном состоянии, и их перемещение происходит как механическим путем, за счет вращения наклонного барабана, так и пневматически, за счет напора, создаваемого потоком газа.

Сушилки барабанного типа подразделяются на барабанные и барабанные комбинированные. Они отличаются устройством загрузки-выгрузки и соединением подвижной и неподвижной частей. У барабанных сушилок выгрузка механическая, у барабанных комбинированных – пневматическая и механическая [8].

В данном случае барабанная сушилка по выходу подключена как барабанная комбинированная сушилка (рис. 6), однако отсутствует механическая выгрузка крупных древесных частиц, не способных удалиться пневматически в циклон. Потому происходит большое заполнение сушилки, и невозможно удаление основной массы частиц среднего и крупного размера. Эти частицы пересыхают и загораются.



Рис. 6. Устройство выгрузки из сушильного барабана

Приведенный выше фракционный состав измельченной древесины на выходе из барабана подтверждает конструктивный недостаток системы выгрузки древесных частиц из барабана.

Таким образом, установленные в линии производства пеллет на ООО «ЭкоТопливо» барабанная сушилка с теплогенератором имеют ряд конструктивных недостатков, снижающих в целом производительность линии, а именно:

а) фактическая тепловая мощность теплогенератора по разным методикам оценок составляет от 366 до 475 кВт. При этом количество удаляемой влаги из сырья в барабане составляет в среднем 285 кг/ч при плановом показателе 2100 кг/ч;

б) отсутствуют футеровка и эффективное охлаждение металлических стенок топки, что может привести к пожару и ожогам персонала;

в) количество и размеры лопастей внутри барабана недостаточны, что, несомненно, снижает теплоотдачу от газов к древесным частицам. Продолжительность сушки возрастает, а равномерность конечной влажности частиц ухудшается;

г) угол установки барабана  $\beta = 0$ . По рекомендациям [10] производительность сушилки возрастает при установке ее с отрицательным углом ( $\beta$  от  $-2$  до  $-3^{\circ}$ ).

Таким образом, в существующем состоянии барабанная сушилка с теплогенератором малопродуктивна и неработоспособна по причине регулярных возгораний.

Для стабильной работы пеллетной линии и повышения эффективности участка сушки рекомендуется провести техническое перевооружение, а именно:

1) на участке сушки демонтировать теплогенератор и установить современный, работающий на измельченном топливе. Это позволит в автоматическом режиме стабильно поддерживать температуру топочных газов (агента сушки древесины) в диапазоне 250-400 °С;

2) систему выгрузки барабана необходимо привести в соответствие с комбинированным типом сушилки. На выходе из барабана следует установить конвейер для выгрузки крупных древесных частиц.

После реализации предложенных мероприятий на основе исследований ЦНИИФ производительность модернизированной барабанной сушилки  $G$ ,  $кг/ч$ , можно рассчитать по выражениям [4]:

$$G = M\Pi(\rho\nu)D^2t_{ex}^{0,425}, \quad (4)$$

в этом уравнении:

$$M = \frac{1360\varphi^{0,39}l^{0,39}K^{0,34}\left(\frac{n^2}{1800}\right)^a D^{a_1} \sin \beta^{b_1}}{A^{0,34}d^{0,526}(\rho\nu)^{0,136}}, \quad (5)$$

$$K^{0,34} = \left[ \frac{W_k}{W_n(W_n - W_k)} \right]^{0,34}; \quad (6)$$

$$\Pi = \sqrt{\frac{t_{вых} - 30}{t_{вх} - t_{вых} + 10}}, \quad (7)$$

где  $t_{\text{вх}}$  – температура агента сушки на входе в барабан, °С;  $t_{\text{вых}}$  – температура отработавшего агента, °С;  $\rho v$  – массовая скорость сухого агента сушки по барабану, кг/(м<sup>2</sup>·с);  $D$  – диаметр барабана, м;  $\phi$  – коэффициент заполнения барабана высушиваемым материалом;  $l$  – длина барабана, м;  $W_n$  и  $W_k$  – начальная и конечная влажность стружки, %;  $n$  – частота вращения барабана, об/мин;  $\beta$  – угол наклона барабана, град.;  $d$  – средний эквивалентный диаметр частицы стружки, мм.

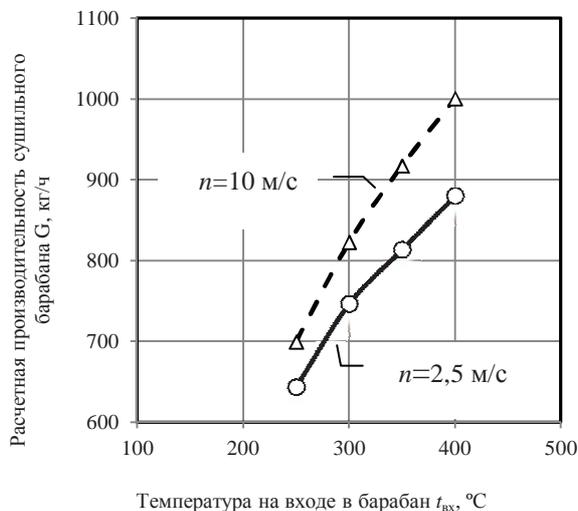
В расчетах приняты технические характеристики теплогенератора ГТД-1,2 компании «ЭКОДРЕВ» г. Тверь:

$$\frac{t_{\text{вх}} - t_{\text{вых}}}{Mt_{\text{вх}}^{0,425} \sqrt{\frac{t_{\text{вых}} - 30}{t_{\text{вх}} - t_{\text{вых}} + 10}}} = 0,713 \frac{W_n - W_k}{100} + 0,00038 c_m (t_{\text{вых}} - 30) \frac{W_n + 100}{100}, \quad (8)$$

где  $c_m$  – теплоемкость материала, кДж/(кг·°С).

Максимальная температура агента сушки на входе в барабан ограничивалась на уровне 400 °С. Теоретическую температуру отработавшего агента сушки на выходе из барабана  $t_{\text{вых}}$  определяли из уравнения теплового баланса (8).

На рис. 7 представлена расчетная производительность сушильного агрегата после модернизации.



**Рис. 7.** Производительность сушильной установки после технического перевооружения при различной скорости вращения барабана

При реализации предложенных мероприятий производительность участка сушки пеллетной линии на ООО «ЭкоТопливо» увеличится с 285 кг/ч до 880 и 1000 кг/ч соответственно при скорости вращения барабана 2,5 и 10 м/с. При этом сократится продолжительность простоя линии за счет отсутствия регулярных возгораний высушиваемого сырья. В итоге мощность линии возрастет до 1 т/ч готовых топливных гранул.

### Литература

1. Семенов Ю.П., Левин А.Б., Малинин В.Г. Теплоснабжение предприятий лесного комплекса. М.: Изд-во МГУЛ, 2010. 185 с.
2. Головкин С.И., Коперин И.Ф., Найденков В.И. Энергетическое использование древесных отходов. М.: Лесная промышленность, 1987. 224 с.
3. Чудаков Е.А. Энциклопедический справочник машиностроения [Электронный ресурс] // Директ Медиа: сайт. URL: <http://pirat.ca/viewtopic.php> (дата обращения: 20.10.2013).
4. Стерлин Д.М. Сушка в производстве фанеры и древесностружечных плит. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Лесн. пром-сть. 1999. 383 с.
5. Лурье М.Ю. Сушильное дело. 2-е, изд. перераб. М.: Госэнергоиздат, 1938. 384 с.
6. Серговский П. С., Расев А.И. Гидротермическая обработка и консервирование древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1987. 360 с.
7. Дмитроц В.А., Левин А.Б., Семенов Ю.П. Теплотехнический справочник инженера лесного и деревообрабатывающего предприятия. М.: МГУЛ, 1999. 333 с.
8. Архангельский В.Д. Аппараты для сушки сыпучей древесины. М.: Изд-во Лесная промышленность, 1970. 328 с.
9. Богатов В.Я., Куптель Г.А., Яцковец А.И. Искусственная сушка горных пород. Минск: Изд-во БНТУ, 2004. 156 с.

### References

1. Semenov Yu.P., Levin A.B., Malinin V. G. Heat supply of the forestry enterprises. M: Izd-vo MGUL, 2010. 185 s.
2. Golovkov S. I., Koperin I.F., Naidenkov V. I. Wood waste for power-producing use. M: Lesnaya promyshlennost', 1987. 224 s.
3. Chudakov E.A. Mechanical engineering thesaurus [electronic resource]: podgot. po izd. 1944-1956. M: Direct Media Publishing. URL: <http://pirat.ca/viewtopic.php> (access date: 20.10.2013).
4. Sterlin D. M. Drying in production of plywood and chipboards. 2 izd., pererab. i dop. M: Lesnaya promyshlennost'. 1999.
5. Lur'ye M. Yu. Drying process. 2 izd., pererab. M: Gosenergoizdat, 1938. 384 s.
6. Sergovsky P. S., Rasev A.I. Hydrothermal treatment and wood conservation. M: Lesnaya promyshlennost', 1987.
7. Dmitrots V.A., Levin A.B., Semenov Yu.P. Heat and power dictionary for a forestry engineer. M: MGUL, 1999. 333 s.
8. Arkhangel'sky V.D. Devices for crumbling wood drying. M: Lesnaya promyshlennost', 1970. 328 s.
9. Bogatov V. Ya. Kuptel' G. A. Yatskovets A.I. Artificial drying of rocks. Minsk: BNTU, 204 s.