

УДК 66.047.3

## УВЕЛИЧЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ УСТАНОВОК СУШКИ ПЕЛЛЕТ

© 2014 Е.Н. Ахмедьянова

Челябинская агроинженерная академия

Поступила редакцию 19.03.2014

В статье рассмотрены вопросы использования гранулированных опилок (пеллет). Определены пути повышения энергоэффективности установок сушки пеллет за счет использования нестационарных режимов сушки гранулированных опилок.

Ключевые слова: *пеллеты, котлоагрегат, рециркуляция, нестационарный режим, тепловой насос*

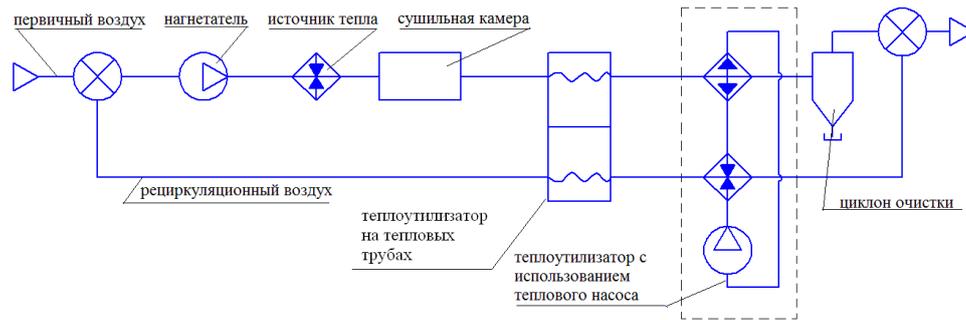
Повышение эффективности переработки сырья в лесотехнической промышленности РФ на сегодняшний день весьма актуальна. Введение новых систем получения новых пиломатериалов на базе ленточных пил с системой выявления дефектов до процесса распиловки привело к увеличению количества готовой продукции с единицы сырья. Значительных шагов в плане увеличения эффективности добились в целлюлозно-бумажной промышленности. Широкое внедрение глубинной переработки древесины, характерные для Сыктывкарского бумажного комбината, где отходы используются в качестве топлива, позволяет довести использования сырья до 96% уровня, что, к сожалению, мало пригодно для малых деревообрабатывающих предприятий. Основной проблемой является необходимость утилизации древесной щепы и пыли. Повысить эффективность таких предприятий можно, применяя установки для производства гранулированного топлива – пеллет. Широкое распространение гранулированного топлива за рубежом связано с высокой степени автоматизации горелочных устройств, работающих на данном виде топлива, а также с возможностью утилизации отходов первичной лесопереработки. Процесс производства пеллет является весьма энергозатратным. Традиционно цикл производства включает в себя следующие стадии: сортировку; измельчение; сушку, прессование и расфасовку. Основную долю энергозатрат на получение конечного продукта составляют затраты на процесс сушки. Остальные статьи затрат, связанные с измельчением, прессованием, фасовкой и упаковкой, имеют энергозатраты на порядок меньше [7, 8].

Наиболее часто используются следующие сушильные установки: камерные сушильные установки; ленточные сушильные установки;

сушильные установки вихревого типа; установки сушки в кипящем слое [9]. Несмотря на то, что применяемое оборудование разнообразно по физическому принципу действия, промышленные установки функционируют, как правило, с однократным прохождением сушильного агента. Это приводит к загрязнению окружающей среды продуктами сушки, содержащими не только влагу, но и летучие вещества, кроме того, это не всегда эффективно с экономической точки зрения. В мобильных установках, где производства сушильного агента (топочных газов) осуществляется за счет сжигания до 50% исходного сырья, является на наш взгляд весьма расточительным. Хорошо описанные в литературе системы с частичной или полной рециркуляцией сушильного агента используются относительно редко. В то же время для сушки гранулированного топлива требуется так называемые мягкие режимы: температура сушильного агента не выше 140<sup>0</sup>С и влажность конечного продукта 12%. Наиболее эффективными, с нашей точки зрения применительно к установкам сушки пеллет, это сушильные установки с частичной рециркуляцией и регенерации тепла с использованием тепловых труб и теплонасосных агрегатов (рис. 1).

Использование тепловых труб позволяет передать тепло от отводимого сушильного агента, имеющего температуру 120-135<sup>0</sup>С, части циркулирующего газа. Этот вид теплообменника необходим для обеспечения возможности функционирования фреоновых тепловых насосов, имеющих максимальную температуру нагреваемой среды не выше 120<sup>0</sup>С, что связано с особенностью теплоносителя. Таким образом, теплообменник на тепловых трубах должен понизить температуру сушильного агента до 90-100<sup>0</sup>С, что делает эффективность тепловых насосов.

*Ахмедьянова Елена Наильевна, аспирантка. E-mail: Karinlen@mail.ru*



**Рис. 1.** Комбинированная схема сушильной установки с частичной рециркуляцией

Следующим важным фактором в повышении энергоэффективности сушильных установок является уменьшение времени процесса сушки. В процессе сушки влажных материалов нужно учитывать не только форму связи влаги с материалом, но и режим сушки. В настоящее время распространены три связи – химическая, физико-химическая и физико-механическая [1, 2, 5].

В процессе сушки влага будет перемещаться от внутренних слоев к поверхности опилок, а в дальнейшем испаряться в атмосферу. При анализе процессов сушки пользуются понятиями интенсивности  $I$  и скорости сушки  $N$ . По формуле Дальтона можно определить интенсивность испарения жидкости со свободной поверхности при стационарном режиме [2, 6, 10]:

$$I = \frac{W}{F \cdot \tau} = \beta_p (p_n - p_c) \quad \text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}) \quad (1)$$

где  $W$  – количество испаренной жидкости, кг;  $F$  – поверхность испарения,  $\text{м}^2$ ;  $\tau$  – время, с;  $\beta_p$  – коэффициент массотдачи, отнесенной к разности парциальных давлений,  $\text{кг}$  влаги/ $(\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{Па})$ ;  $p_n$  – парциальное давление диффундирующего вещества над жидкой (твердой поверхностью), Па;  $p_c$  – парциальное давление диффундирующего вещества вдали от поверхности раздела фаз, Па.

Для приближенных расчетов можно использовать формулу:

$$I = 5,7 \cdot \omega^{0,8} (p_n - p_c), \quad \text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}) \quad (2)$$

где  $\omega$  – скорость воздуха, м/с;

Для расчета испаренной жидкости используем следующую формулу

$$I = \beta_c (p_n - p_c), \quad \text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}) \quad (3)$$

где  $\beta_c$  – коэффициент массоотдачи, отнесенный к разности концентрации диффундирующего вещества, м/с;  $p_n$  и  $p_c$  – концентрации диффундирующего вещества на жидкой (твердой) поверхности раздела фаз и вдали от поверхности раздела фаз,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

В свою очередь коэффициент массотдачи  $\beta_c$  и  $\beta_p$  связаны соотношением

$$\beta_c = \frac{\beta_p}{R \cdot T} \quad (4)$$

Между количеством испаренной жидкости и количеством затраченного тепла имеется следующая зависимость:

$$q = I \cdot r = \alpha (t_c - t_n), \quad \text{Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot ^\circ\text{C}) \quad (5)$$

где  $r$  – удельная теплота испарения, Дж/кг;  $\alpha$  – коэффициент теплообмена, Дж/ $(\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $t_c$ ,  $t_n$  – температуры окружающей среды и поверхности испарения,  $^\circ\text{C}$ .

Процессы сушки можно условно разделить на характерные периоды: период прогрева, период постоянной скорости испарения (для него характерна наибольшая скорость испарения влаги), период падающей скорости сушки. В период постоянной скорости сушки температура материала постоянна  $dt/d\tau=0$ , скорость диффузии влаги к поверхности равна скорости испарения, тепло, необходимое для испарения влаги, отбирается от окружающего сушильного агента путем теплообмена конвекцией и в ряде случаев излучением. Интенсивность испарения  $I$  в этом случае прямо пропорциональна плотности потока тепла на поверхности тела.

$$I_m = \frac{q}{r} = \frac{N}{100} * R_v \frac{\rho}{r} = \left( \frac{d\omega}{d\tau} \right) \frac{R_v \rho}{100 r} \quad (6)$$

где  $N = (dw/dr)$  – скорость сушки в периоде постоянной скорости,  $R_v = V/F$  – отношение объема тела к его поверхности, м;  $\rho$  – плотность абсолютно сухого материала,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Закон термовлагопроводности, согласно которому влага в материале перемещается по направлению теплового потока, а газ в противоположную сторону, был открыт А. В. Лыковым [6]. Так, при сушке влага в материале может перемещаться к его поверхности под действием разности ее концентрации, под влиянием термо-

влажностности и под действием градиента избыточного давления (при температуре материала, близкой или большей 100°C, наблюдается фильтрационный перенос [2]). В общем виде уравнение переноса массы при сушке материала может быть записано следующим образом:

$$I_m = -a_m \rho_o \frac{\partial u}{\partial x} - \delta a_m \rho_o \frac{\partial t}{\partial x} - a_p \rho_o \frac{\partial p}{\partial x} \quad (7)$$

где  $I_m$  – количество жидкости, переместившееся внутри тела в единицу времени через единицу поверхности, кг/(м<sup>2</sup>·ч);  $a_m$  – коэффициент потенциалопродности (определяется экспериментально для конкретного материала), м<sup>2</sup>/ч;  $u$  – концентрация влаги, кг/кг;  $x$  – координата, м;  $\rho_o$  – плотность абсолютно сухого материала, кг/м<sup>3</sup>;  $\delta$  – термоградиентный коэффициент, 1/°C (определяется экспериментально для конкретного

материала);  $a_p$  – коэффициент фильтрационного переноса, м<sup>2</sup>/ч, Н/м<sup>2</sup> (определяется экспериментально для конкретного материала);  $\partial u/\partial x$ ,  $\partial t/\partial x$  и  $\partial p/\partial x$  – частные производные, пропорциональные градиентам влажности, температуры и давления.

Ряд исследователей [1, 4] отмечают, что при охлаждении материала изменяется величина и направление температурного градиента. Это приводит к тому, что термовлажностность будет способствовать движению влаги от центра к периферии. В этой связи интересны результаты, приведенные в работах [1, 3, 4]. С целью интенсификации сушки может оказаться целесообразно использовать режим с промежуточным нагревом и охлаждением. Схема установки реализующей осциллирующий режим приведена на рис. 2.

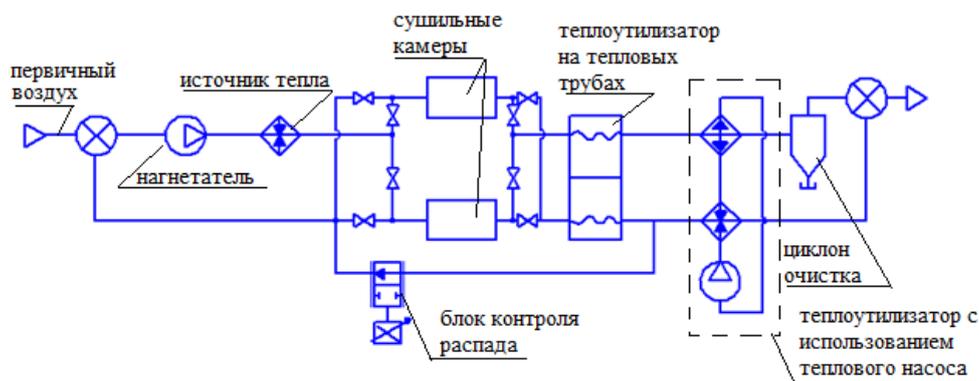


Рис. 2. Схема сушильной установки с частичной рециркуляцией, утилизацией тепла и блоком, обеспечивающим нестационарный (осциллирующий) режим

Исследование проводилось методом математического моделирования. Использовали систему уравнений:

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = \alpha_m \cdot \rho \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \alpha_m \cdot \rho \cdot \delta \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (8)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \varepsilon \cdot \frac{r}{c} \cdot \frac{\partial u}{\partial \tau} \quad (9)$$

Масса удаляемой влаги

$$m_B = -D \cdot \rho \cdot \frac{\partial u}{\partial x} - D \cdot \delta \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad (10)$$

где:  $T$  – температура,  $u$  – влагосодержание,  $x$  – текущая координата,  $\alpha$  – температуропроводность,  $a_m$  – коэффициент диффузии,  $r$  – скрытая теплота парообразования,  $\varepsilon$  – критерий испарения:  $\varepsilon=0$  при диффузии влаги и  $\varepsilon=1$  при диффузии пара,  $\tau$  – время,  $\delta$  – коэффициент термодиффузии,  $c$  – теплоёмкость.

Численное решение системы уравнений (8)-(9) позволяет определять скорость удаления влаги и распределение влаги по сечению тела (рис. 3). Результаты математического моделирования показали, что при периодической подаче сушильного агента с неизменной температурой возможна интенсификация процесса. Наличие перегиба в кривой влажности на поверхности тела показывает наличие локально оптимума. Таким образом, нестационарные режимы сушки могут увеличить интенсивность процесса, а в некоторых случаях и улучшить качество получаемого продукта. Определение оптимальных периодов сушки выходит за рамки данной статьи и является темой дальнейшего исследования.

Учитывая среднюю цену при реализации пеллет на январь 2013 г. в 5 тыс. руб. за тонну, при этом на технологический процесс уходит порядка 500-600 кг древесных отходов в качестве топлива. Снижение прямых энергозатрат является весьма актуальной проблемой. Для оптимизации энергозатрат предложено использование

комбинированного утилизатора тепла, включающего в отличие от ранее известных комбинацию тепловых труб и теплового насоса с одновременной реализацией пульсирующего режима сушки. По нашим оценкам использование предложенной методики позволит снизить энергозатраты на 30-35%, что эквивалентно к выходу дополнительной продукции в размере не менее 200-250 кг пеллет. Разработанный автором процесс осциллирующий сушки с частичной рециркуляции тепла позволяет уменьшить до минимума выброс летучих продуктов удаления влаги, что исключительно положительно складывается на параметрах производства.

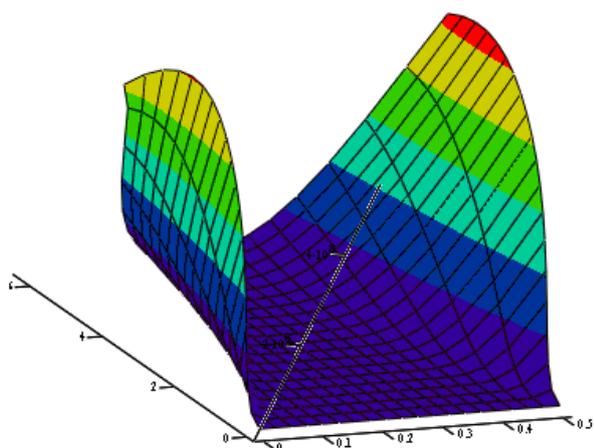


Рис. 3. Распределение влагосодержания по сечению и времени

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Гамаюнов, Н.И. Закономерности внутреннего переноса влаги и структурообразования при сушке различных материалов // *Н.И. Гамаюнов, Л.И. Ильченко* // Хим. пром. 1979. № 6. С. 344-348.
2. Гельперин, Н.И. Основы техники псевдооживления / *Н.И. Гельперин, В.Г. Айништейн, В.Б. Кваша*. – М., Химия, 1967. 664 с.
3. Гинзбург, А.С. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов. – М., Пищевая промышленность, 1973. 528 с.
4. Гинзбург, А.С. Некоторые современные проблемы теории и технологии сушки // *Хим. пром. 1979. № 6. С. 328-330.*
5. Гинзбург, А.С. Сушка пищевых продуктов в кипящем слое / *А.С. Гинзбург, В.А. Резчиков*. – М.: Пищевая промышленность, 1966. 196 с.
6. Лыков, А.В. Тепло-массобмен в процессах сушки. – М.: Госэнергоиздат, 1956. 464 с.
7. Кречетов, И.В. Сушка древесины. – М.: Лесная промышленность, 1987. 440 с.
8. Кречетов, И.В. Сушка древесины. – М.: Бриз, 1992. 449 с.
9. Куталадзе, С.С. Основы теории теплообмена. – Л.: Машгиз, 1968. 456 с.
10. Слободкин, А.С. Приближенный метод расчета кинетики прогрева влажного материала в кипящем слое при осциллирующем режиме // *ИФК. 1964. №3. С. 93*

## INCREASE THE ENERGY EFFICIENCY OF PELLETS DRYING UNITS

© 2014 E.N. Akhmedyanova

Chelyabinsk Agroengineering Academy

In article questions of using the granulated sawdust (pellets) are considered. Ways of increase the energy efficiency of pellets drying units due to use of non-stationary modes of drying of granulated sawdust are defined.

Key words: *pellets, boiler unit, recirculation, non-stationary mode, thermal pump*