УДК 66. 047. 7

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО ТЕРМОВАКУУМНОГО МЕТОДА ПОЛУЧЕНИЯ ТОПЛИВНЫХ БРИКЕТОВ ИЗ ОТХОДОВ ДЕРЕВООБРАБАТЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Кутовой В.А., Луценко А.С.

Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», Харьков, Украина

АННОТАЦИЯ

Проведена научно-техническая разработка энергосберегающей технологии термовакуумной сушки влажных опилок и получение из них твердого топлива. Продолжительность сушки влажных опилок измеряется секундами, благодаря максимальной поверхности испарения, быстрому нагреванию, пониженному давлению окружающего пространства. Процесс сушки непрерывный. Температура нагревания высушенного материала поддерживается с точностью ± 1 градус. Это предотвращает перегрев опилок при сушке. Расходы электроэнергии не более 0,15 кВт на один кг полученного сырья. Температура высушенных опилок не превышает 40^0С градусов.

ВВЕДЕНИЕ

Изготовление твердого топлива из отходов деревообрабатывающей промышленности позволяет экономить газ, нефть, уголь. Уменьшение зависимости от импорта топлива - повышает надежность снабжения электроэнергией и теплом потребителей в необходимом количестве, уменьшает себестоимость использованной энергии, повышает рентабельность производства. Возникают благоприятные условия для экономического роста регионов. Переработка древесных отходов в брикеты разрешает проблему, которая образуются при работе пилорам, лесопилок. Региональные потребности в энергетике покрываются за счет местных источников энергии. Для населения создаются новые рабочие места как на энергетических объектах, так и на предприятиях по производству энергоустановок нового типа. Создание высокоэффективного, мобильного оборудования для изготовления высококачественного твердого топлива из отходов промышленного производства значительно расширяет рынки сбыта продукции машиностроительных предприятий и увеличивает промышленный потенциал государства. Развитие нетрадиционной энергетики ведет к созданию в регионах новых видов экономической деятельности и развития малого и среднего бизнеса, способствует привлечению средств иностранных и отечественных инвесторов. Топливные брикеты и гранулы могут использоваться для обогрева пассажирских вагонов, в домашних печах и каминах, а также заводских котельных и ТЭЦ. В настоящее время в Украине промышленное производство твердого топлива из отходов деревообрабатывающего производства практически отсутствует.

Для сушки опилок, в основном, используют барабанные сушильные установки. Барабанные сушильные установки громоздкие, металлоемкие, потребляют много энергии. Сушка происходит при атмосферном давлении температура осушающего агента порядка 400^0С и выше, что нередко является

причиной воспламенения осушаемого сырья. Скорость сушки низкая.

Сушка «аэродинамического» типа предназначена для просушивания отходов деревообработки с влажностью до 50% и фракцией до 2мм. Сушка сырья осуществляется в аэродинамическом туннеле в горячем потоке воздуха при атмосферном давлении. Температура воздуха достигается (120^0-150^0)С. Данный тип

© Кутовой В.А., Луценко А.С.

сушильной установки металлоемкий, имеет большие габариты.

Уменьшение энергетических, временных затрат в процессе сушки имеет высокую актуальность. Для этого необходимо создавать

энергосберегающие, экологически чистые термовакуумные сушильные установки.

Эффективность процесса сушки зависит от количества подвода тепла к высушиваемому материалу, интенсивности перемещения влаги в материале и скорости отвода последней от поверхности тела. [1].

Проблема источника энергии - ключевая проблема установок различного типа в условиях надвигающегося энергетического кризиса. Энергосбережение является одной из наиболее актуальных проблем в мире. Решение этой проблемы лежит в основе использования альтернативных источников энергии, разработке энергосберегающих технологий, экологической защиты окружающей среды. [2]. Задача энергосберегающей технологии состоит в том, чтобы использовать энергию с максимальной эффективностью. Существенным мероприятием в отношении энергосбережения является то, чтобы ограничить масштаб сброса теплоты в окружающую среду и защитить биосферу от теплового загрязнения.

К основным факторам, содействующим энергосбережению, относится:

- увеличение производительности установок и оборудования;
- снижение энергозатрат на единицу высушенной продукции;
- улучшение качества выпускаемой продукции, и как следствие этого, рост объема ее реализации;
- экономия энергоресурсов, которая приводит к снижению материальных затрат и себестоимости вырабатываемой продукции;
- понижение платежа за загрязнение окружающей среды.

ТЕРМОВАКУМНАЯ СУШИЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Проведена научно-техническая разработка энергосберегающей технологии термовакуумной сушки влажных опилок. Сушка влажных опилок проводилась в термовакуумной установке, рис.1.

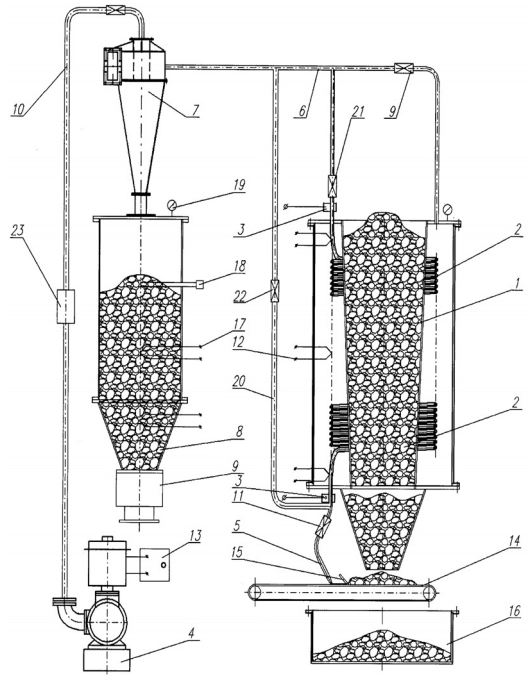

Рис.1 Схема термовакуумной сушильной установки.

Данная установка является экологически чистой, энергосберегающей, высокопроизводительной, имеет малые габариты, проста в изготовлении, обслуживании, может транспортироваться с одного места на другое. Установка состоит из бункера-питателя 1. Корпус бункера-питателя выполнен в виде сосуда со сквозным отверстием в его центральной части, проходное отверстие которого уменьшается в направлении сверху вниз и образует емкость - в форме перевернутого усеченного конуса. В межстенном термоизолированном пространстве бункера питателя размещен вертикально резистивный нагреватель 2. Нагревательный элемент полый, имеет форму змеевика, изготовленный из материала, который имеет высокое электрическое сопротивление и выполняет одновременно две функции, как вакуумный объем, и как нагреватель. Нагревательный элемент подсоединяется к электрическому источнику питания через клеммы 3. Разрежение внутри нагревательного элемента создается с помощью вакуумного водокольцевого насоса 4. Входной конец нагревателя 2 подсоединен к питателю 5. Второй конец нагревателя соединен через вакуумный трубопровод 6 с циклоном 7. Циклон расположен сверху на приемнике высушенного сырья 8. Приемник высушенной продукции выполнен в виде отдельного вакуум-плотного корпуса, в нижней части ко-

торого находится шлюзовой затвор 9. Вакуумный водокольцевой насос, через трубопровод 10 соединен с циклоном 7. Входной конец нагревателя оснащен дополнительным средством регулирования всасываемого воздуха 11. Это позволяет регулировать концентрацию высушиваемого материала в турбулентном потоке. Контроль температуры нагревательного элемента осуществляется термопарами 12, которые присоединены к прибору РТ-40, Устройство РТ-40 размещено в пульте управления 13 и регулирует температуру нагревательного элемента. При достижении заданной температуры нагревательным элементом, прибор РТ-40 дает команду на отключения источника питания нагревательного элемента. При понижении температуры нагревательного элемента на 1 градус (от заданной температуры) прибор РТ-40 дает команду на включение источника питания нагревательного элемента.

Влажное сырье из бункера-питателя 1 высыпается на ленту транспортера 14. Ракля 15 формирует на движущейся ленте, ровный слой влажного сырья, которое через питатель 5 всасывается вместе с воздухом в трубчатый нагревательный элемент 2 и, при необходимости, дополнительно, разрыхляется воздухом через устройство всасываемого воздуха 11. Избыток влажного сырья, которое не помещается на транспортере, падает в емкость 16. При движении внутри нагревательного элемента высушиваемый материал за короткий промежуток времени нагревается до заданной температуры и под воздействием температуры и низкого давления выделяет влагу в окружающее пространство. После прохождения через нагреватель высушенный материал по вакуумному трубопроводу 6 поступает в циклон 7. В циклоне происходит разделение пара и высушенных твердых частиц дисперсного материала. Пар вместе с примесями других летучих веществ через трубопровод 10 уходит в водокольцевой вакуумный насос 4, а высушенный материал проступает в приемник высушенного сырья 8. По мере заполнения приемника высушенным продуктом включается шлюзовой затвор 9 для периодической или непрерывной выгрузки высушенного продукта.

Контроль температуры высушенного материала в приемнике 8 осуществляется с помощью датчиков температуры 17, а уровень высушенного материала в данном приемнике осуществляется за счет датчика уровня 18. По мере заполнения приемника 8 высушенным материалом датчик уровня дает сигнал на включение шлюзового затвора. Контроль давления в вакуумной системе установки осуществляется вакуумметром 19.

Для очистки воздуха, поступающего в водокольцевой насос от мелкодисперсной пыли, между циклоном и водокольцевым насосом устанавливается фильтр 23. Такая конструкция обеспечивает высокопроизводительную непрерывную вакуумную сушку опилок с высокоэффективным нагревом сырья, движущегося внутри нагревательного элемента. [3]. Использование данной установки позволяет повысить производительность, сократить удельные затраты энергии на единицу высушенной продукции.

ТЕРМОВАКУУМНАЯ МЕТОДИКА СУШКИ ОПИЛОК

Суммарный тепловой поток, который необходим для сушки опилок, составляет:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 \quad (1)$$

где Q – суммарное количество тепловой энергии;

$Q_{1,2,3.4}$– количество тепловой энергии, затраченной на нагревание сухих опилок, влаги, превращение влаги в пар, нагревание деталей и узлов сушильной установки, Дж; Q_5 - количество тепловой энергии, которая уходит в окружающее пространство. Таким образом, электрическая мощность нагревателя за определенный промежуток времени должна обеспечить нагревание сухого сырья, влаги, деталей и узлов сушильной установки, превратить влагу в пар и скомпенсировать ту часть тепла, которая уходит в окружающее пространство.

$$P = \frac{1}{t}\{c_1 m_1 (T_2 - T_1) + c_2 m_2 (T_2 - T_1) + L m_2 + c_3 m_3 (T_2 - T_1) + Q_5\} \quad (2)$$

где – t время сушки, с; m_1, m_2, m_3 – масса: сухого сырья, влаги, узлов сушильной установки, кг; c_1, c_2, c_3 – удельная теплоемкость: сухого сырья, влаги, узлов сушильной установки, Дж/кгК; L - удельная теплота парообразования, Дж/кг; T_1, T_2– начальная и конечная температура нагревания, К.

Из выражения 2 следует, для того чтобы уменьшить энергопотребление сушильной установки, необходимо нагревательный элемент теплоизолировать, чтобы как можно

меньше тепловой энергии излучалось в окружающее пространство, т.е. – $Q_5 \to 0$. Чем меньше тепловой энергии уйдет в окружающую среду, тем ниже будет потреблять энергии нагревательный элемент. Установку необходимо изготавливать из материала с низкой теплоемкостью, а также уменьшать массу сушильной камеры, а детали сушильной установки изготавливать из материалов с низкой теплоемкостью. Чем меньше тепловой энергии уйдет на нагревание узлов термовакуумной установки, тем меньше будет общее энергопотребление.

Активное сопротивление нагревательного элемента выбирается таким образом, чтобы обеспечить преобразование электрической энергии в тепловую, необходимую для сушки влажного материала.

$$I_H^2 \frac{4l\rho}{\pi\left(d_1^2 - d_2^2\right)} = \frac{Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5}{t} \qquad (3)$$

где I_H - ток нагревательного элемента, А; l - длина нагревательного элемента, м; ρ - удельное электрическое сопротивление материала, из которого изготовлены нагревательной элемент, Ом·м; d_1 d_2- наружный и внутренний диаметр нагревательного элемента, м.

Сушка влажного материала осуществляется за счет переноса влаги из внутренних слоев материала к его поверхности, превращения её в пар и удаление этого пара с поверхности в окружающую среду. Скорость переноса влаги зависит от механизма тепло- и массопереноса в высушиваемых материалах. Предполагается, что тепловая изоляция нагревательного элемента уменьшает потери тепла в окружающую среду до нуля. Для этого необходима энергия, которая используется для подогрева материала и его влаги до температуры испарения.

$$dQ=(c_1m_1+c_2m_2)dT+[L+c_2(T_3-T_4)]dm_{вл.} \qquad (4)$$

где dT– изменение средней (по объёму тела) температуры материала, К;

T_3 -температура, до которой нагревается пар влаги, уходящий с поверхности материала, К;

T_4 - температура испарения влаги, К;

$dm_{вл}$ - масса влаги, испарённой из материала за промежуток времени *dt*.

Количество тепла, передаваемого высушиваемому материалу с площадью S за бесконечно малый промежуток времени *dt*, определяется из выражения:

$$dQ= \alpha_1 S(T_5-T_4)dt, \qquad (5)$$

где T_5 – температура среды сушильной камеры.

Сопоставляя формулу (4) с формулой (5) находим выражение для скорости сушки:

$$\frac{dm_{вл}}{dt} = \frac{\alpha_1 S(T_5 - T_4) - (c_1m_1 + c_2m_2)\dfrac{dT}{dt}}{L + c_2(T_2 - T_1)} \qquad (6)$$

В термовакуумных сушильных установках непрерывного действия процесс сушки разделяется на два периода. В тот момент, когда высушиваемый материал поступает в сушильную камеру, температура тела падает и ещё некоторое время продолжает снижаться, это связано с тем, что в это время сушка происходит не за счёт подводимого внешнего тепла, а за счёт внутренней энергии самого материала. В первый период сушки пар, выделяющийся с поверхности материала, является насыщенным, его температура равна температуре испарения влаги $T_1=T_2$, следовательно, второй член знаменателя выражения (5) обращается в нуль. Тогда для этого периода сушки выражение (5) можно переписать в виде:

$$\frac{dm_{вл}}{dt} = \frac{a_1 S(T_5 - T_4) - (c_1m_1 + c_2m_2)\dfrac{dT}{dt}}{L} \qquad (7)$$

Первый член числителя представляет собой тепло сушильной камеры, передаваемое высушиваемому материалу за единицу времени; второй член – это внутреннее тепло высушиваемого материала, которое расходуется на нагревание материала и его влаги в начальный момент времени.

Двигаясь в полости нагревательного элемента, высушиваемый материал соприкасается с нагретыми стенками, и при этом быстро нагреваются до высокой температуры за счет внешнего источника тепла (второй период сушки). Влага из центральных слоев материала движется к поверхности в жидком виде. На поверхности она испаряется и дальше движется в парообразном состоянии и уходит из сушильной камеры в водокольцевой насос.

Для получения эффективного и экономичного метода сушки необходимо обеспечить быструю подачу влажного материала внутрь нагревательного элемента. Это можно осуществить, если высушиваемый материал поступает вместе с воздухом в полость нагревательного элемента. Возникает двухфазная система:

газ - твердые частицы. Движение происходит в восходящем потоке в нагретом изолированном пространстве нагревательного элемента при пониженном давлении. Минимальную скорость газа, которая обеспечивает работоспособность данной системы, можно определить из выражения. [4].

$$\omega = \frac{5 \cdot 10^3 g \delta_2^{\,2} (\rho_t - \rho_c) \varepsilon_n^3 K_v^2}{\mu_2 (1 - \varepsilon_n)} \qquad (8)$$

где ω - минимальная скорость газа, м/с;

g – скорение силы тяжести, м/с^2;

δ – диаметр шарообразной частицы, м;

ρ_c – плотность среды, кг/м^3; ρ_t - плотность материала, кг/м^3; ε_n - порозность; K_v –фактор формы, для шара K_v =1; μ – коэффициент динамической вязкости, кг/сек·м^2, расходная весовая концентрация, 1кг материала на 1кг газа.

Порозность ε_n однородного слоя прямо пропорциональна скорости движения газа $\omega_г$ и обратно пропорциональна скорости витания частиц $v_ч$.

$$\varepsilon_n = \frac{\omega_г}{v_ч} \qquad (9)$$

Взаимодействие между твердыми частицами и газом проявляется в виде аэродинамической силы, действующей на частицы в направлении скорости движения. Величина этой силы при установившемся режиме равна потере напора, затрачиваемого на преодоление сопротивления движения твердых частиц в газовом потоке. Величина и направление силы лобового сопротивления определяются относительной скоростью дисперсных частиц внутри цилиндрического нагревательного элемента. Поэтому для формирования двухфазной системы газ - твердые частицы необходимо обеспечить скорость и направленное движение обеих сред одновременно от места входа до места выхода из аппарата. Образуется система со взвешенным слоем твердых частиц, в которой частицы подвижны и разделены между собой газовой прослойкой. Контакты между частицами кратковременны и возникают в результате взаимных столкновений между собой во время хаотического движения.

При нарушении этих условий система становится неустойчивой и переходит в другую форму, либо полностью вырождается. Например, в восходящем потоке при повышении концентрации материала выше определенного значения наступает завал системы. Явление завала объясняется тем, что с повышением концентрации материала расстояние между частицами сокращается настолько, что они попадают в аэродинамический след передних частиц. Лобовое сопротивление таких частиц резко снижается, их скорость витания соответственно увеличивается, и частицы начинают выпадать вдоль аэродинамического следа. Если скорость газового потока окажется недостаточной для поддержания частиц во взвешенном состоянии, то они начнут выпадать из потока, образуя завал. Поэтому необходимо увеличивать скорость газа. При низкой скорости будут выноситься более мелкие частицы, у которых скорость витания меньше скорости газа. При скорости газа, превышающей скорость витания, все частицы, находящиеся внутрии нагревательного элемента, будут из него вынесены. Если вводить новые частицы, то они двигаются внутри нагревателя по мере их поступления, и образуется непрерывный направленный поток частиц снизу вверх. При этом двухфазная система перейдет в стабильное состояние.

В термовакуумной установке восходящий поток в нагревательном элементе создается вакуумным насосом. Производительность вакуумного насоса должна обеспечить непрерывный восходящий поток. Для этого необходимо выбирать производительность вакуумного насоса из условий, указанных в выражении 8.

Суммарный поток тепла, который получает высушиваемый материал, за время t зависит от площади и объема частицы, потока тепла, удельной теплоемкости, коэффициента теплопередачи, плотности среды, температуры нагревания, [5].

$$Q = \int_0^{\tau} S q dt = c\rho V (T_2 - T_1)[1 - \exp(-\frac{\alpha t}{c\rho_c R_v})] \qquad (10)$$

где S – площадь частицы, м^2; q – мгновенный поток тепла, Вт; V – объем частицы, м^3:

α - коэффициент теплопередачи, Вт/м^{2}К;

R_v – относительный объем частицы, равный отношению ее объема V к ее поверхности S.

Из выражения (10) следует, чтобы ускорить процесс удаления влаги из высушиваемого материала необходимо уменьшить его размер и увеличить скорость изменения давления на поверхности материала и внутри его. В данном случае это можно осуществить путем мгновенного нагревания частицы до высокой температуры и резкого изменения давления

окружающей среды, так как интенсивность парообразования зависит от количества подведенного тепла за единицу времени и давления окружающей среды.

Воздух, который поступил в полость нагревательного элемента вместе с высушиваемым материалом, также быстро нагревается, циркулирует между нагретыми поверхностями высушиваемого материала и отбирает от него влагу.

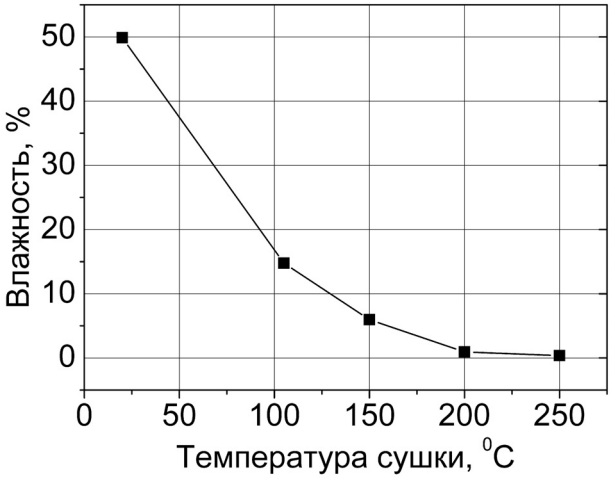

Рис.2 Влажность высушенных опилок в зависимости от температуры нагревателя термовакуумной установки.

На рис.2 приведена влажность высушенных опилок из сосны в термовакуумной установке в зависимости от температуры нагревательного элемента. Начальная влажность опилок 50%. Опилки в нагревательном элементе двигаются со скоростью 9,8 м/с. Время сушки опилок не превышает 15 секунд. Среднее давление в нагревательном элементе 20кПА.

Продолжительность сушки измеряется секундами благодаря максимальной поверхности испарения, быстрому нагреванию, пониженному давлению окружающей среды. Процесс сушки непрерывный. Температура нагревания высушенного материала поддерживается с точностью ± 1 градус. Это предотвращает перегрев опилок при сушке. Расходы электроэнергии не более 0,15 кВт на один кг полученного сырья.

Высушенный материал из бункера через шлюзовой затвор подается на пресс. Брикеты прессуют без химических закрепителей. Прочность обеспечивается за счет клейких свойств лигнина – вещества, входящего в состав высушиваемого сырья.

Полученный топливный материал из опилок может найти свое применение, как в домашних условиях, так и на промышленных предприятиях.

Габариты данной установки небольшие и поэтому есть возможность расположить ее на автомобильной платформе. Предполагается, что разработанная термовакуумная технология и установка будет внедряться в хозяйствах и промышленных предприятиях не только в Украине, но и в других государствах ближнего и дальнего зарубежья.

ВЫВОДЫ

Рассмотрен новый подход к сушке отходов деревообрабатывающей промышленности с использованием термовакуумной сушильной установки. На основании анализа проведенных научно-физических исследований можно сделать вывод, что интенсификация процесса сушки влажных сред в термовакуумной установке может быть достигнута следующими путями:

а) увеличением разности давлений насыщенного пара у поверхности испарения высушиваемого материала и парциального давления пара в окружающей среде;

б) уменьшением размера высушиваемой частицы;

в) увеличением площади испарения влажного материала;

г) увеличением скорости нагревания высушиваемого материала до заданной температуры.

Выбор температуры и давления дает возможность оптимизировать технологический процесс сушки за счет регуляции воздействия на физико-химические свойства высушиваемого материала.

Полученные данные дают возможность создавать энергосберегающие, высокоэффективные, термовакуумные установки различного целевого назначения для равномерной сушки гетерогенных сред. Одновременное нагревание и снижение давления в окружающем пространстве ускоряет процесс удаления влаги из высушиваемого материала, понижает температуру его нагревания, улучшает качество полученной продукции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лыков А.В. Теория тепло и массопереноса / А.В. Лыков, Ю.А. Михайлов. - М: «Госэнергоиздат». - 1963. - С. 47-52.
2. Шульман Р.Ф. Энергосберегающая энциклопедия биотопливных технологий и альтернативных источников энергии / Р.Ф. Шульман. - Киев: «Украинский биоэнергетический фонд». - 2006. - 560с.
3. Патент на винахід, Україна, 81138, МПК F26B9/06. Пристрій для термовакуумного сушіння. / В.О. Кутовий. - №а200507488; Заявл. 27.07.2005; Опубл. 10.12.07; Бюл. №20 - 5с.
4. Лева М. Псевдоожижение / М.. Лева. – М: «Гостоптехиздат». - 1961.- С.34.
5. Лыков А.В. Тепломассообмен: [Справочник] / А.В. Лыков.- М.: Энергия. - 1972, - 309с.