

ЮЛИЯ ВЯЧЕСЛАВОВНА ЯНЮК

кандидат технических наук, доцент кафедры технологии металлов и ремонта лесоинженерного факультета ПетрГУ
yan@petrsu.ru

**ВЫБОР И НАСТРОЙКА ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ
СУШКИ ИЗМЕЛЬЧЕННОЙ ДРЕВЕСИНЫ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ
ДРЕВЕСНО-СТРУЖЕЧНЫХ ПЛИТ**

Статья посвящена вопросам математического моделирования технологического процесса сушки стружки при производстве древесно-стружечных плит, поиска наиболее оптимального алгоритма управления данным процессом по критерию снижения энергетических затрат и ресурсосбережения, а также выбору и настройке управляющих параметров.

Ключевые слова: сушильная установка барабанного типа, влажность стружки, управляющие параметры, задача оптимизации

В условиях современного промышленного производства можно выделить две основные задачи, требующие постоянного внимания: внедрение в технологический процесс нового оборудования и совершенствование работы существующего. Если первая задача требует прежде всего материальных затрат и не всегда является первоочередной для хорошо налаженного производства, то вторая остается неизменно актуальной, особенно если речь идет о поиске эффективных режимов работы оборудования с точки зрения снижения энергетических затрат и экономии ресурсов. При использовании наиболее оптимальных алгоритмов управления различными установками, входящими в технологический процесс производства промышленной продукции, прежде всего, снижается ее себестоимость, а следовательно, повышается конкурентоспособность произведенной продукции на рынке.

Одной из отраслей деревообрабатывающей промышленности является производство древесно-стружечной плиты (ДСтП). Достижение

проектной производительности в этой отрасли возможно только при полной отладке автоматики оборудования и переходе на работу в автоматическом режиме, обеспечивающем правильный технологический процесс производства ДСтП.

С развитием данного производства также развивается и сушка измельченной древесины (стружки) – основного компонента ДСтП. Влажность стружки оказывает решающее влияние на технологический процесс. Поддержание влажности в заданных пределах является главной задачей сушильных установок.

Для целей сушки могут быть использованы сушильные установки барабанного типа (роторные сушилки), являющиеся наилучшими по соотношению цена/качество. Преимущества их по сравнению с шахтными, ромбическими и другими видами сушилок: универсальность; высокое качество сушки за счет интенсивного перемешивания материала; возможность сушить высоковлажный, засоренный материал; исключение спекания материала; простота монтажа (для за-

пуска в работу не требуется капитальных сооружений); надежность работы (исключается образование застойных зон); приемлемая цена.

На рисунке 1 показана сушильная установка, использующаяся в производстве ДСтП на ОАО «Карелия-ДСП» (Медвежьегорский район, Республика Карелия)

Интенсификация режимов работы барабанной сушильной установки (БСУ) и повышение температуры сушки привели к тому, что в качестве агента сушки все чаще используются топочные газы, которые вырабатываются топочными устройствами на жидким или газообразном топливе. Последнее связано с широким использованием систем автоматики, обеспечивающих автоматическое регулирование процесса сушки и безопасность работы оборудования.

В барабанной сушилке влажная стружка подается в сушильный барабан через загрузочный бункер и желоб. Влажная стружка и горячий сушильный агент перемещаются вдоль барабана в одном направлении. Внутри барабан имеет спиральные устройства для перемещения стружки, которые обеспечивают равномерный обдув частиц сушильным агентом. По достижении противоположного конца барабана стружка высыпается до нужной влажности и выгружается. Влажный сушильный агент с мелкими частицами древесины пропускается через циклон, где частицы отделяются.

Оптимизация управления БСУ может быть проведена по различным критериям [1]. Выбор того или иного критерия зависит от конкретных условий проведения производственного процесса. Одним из основных факторов для оптимизации является энерго- и ресурсосбережение. Эффективный алгоритм управления технологическим процессом сушки должен обладать, с одной стороны, высоким быстродействием, а с другой – быть оптимальным с точки зрения снижения энергетических затрат и потребления ресурсов [2].

Основными задачами при усовершенствовании систем управления барабанными сушильными установками являются [2,3]: достижение требуемого значения выходного содержания влаги в материале, несмотря на возмущения входных величин; оптимальное использование энергии при сушке; исключение пересушивания, при котором увеличиваются энергетические затраты и могут возникнуть повреждения в материале; стабилизация процесса сушки вnominalном режиме.

Общая модель процесса сушки БСУ обычно состоит из некоторого набора дифференциальных уравнений в частных производных [3,4,5], описывающих передачу массы и тепла между газообразной и твердой фазами. Такая модель является динамической и достаточно сложной для решения, поэтому она обычно упрощается (линеаризуется вокруг рабочей точки) или решается численно [3,6]. Однако всегда встает

вопрос об адекватности упрощенной модели реальному поведению технического объекта. Эта проблема приводит к необходимости составления такой системы уравнений, которая имела бы аналитическое решение и была бы адекватна реальному процессу [7].

При изучении процессов сушки была выявлена одна общая особенность, характерная для сушки различных материалов и в различных установках. Для любого процесса при построении кривой скорости сушки [4] наблюдается достаточно длительный по времени участок, в котором скорость сушки постоянна, не зависит от времени. Этот стационарный процесс представляет собой собственно сушку, то есть выпаривание влаги из материала. Он зависит от внешних условий и не зависит от внутренних механизмов передачи влаги.



Рис. 1. Сушильная установка барабанного типа

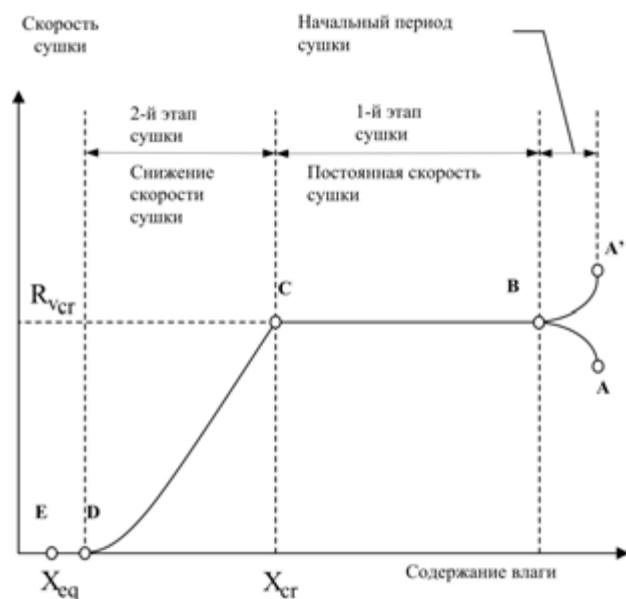


Рис. 2. Типичная кривая скорости сушки

На рисунке 2 представлена типичная кривая скорости сушки [4], на которой показано изменение значения условного коэффициента скорости сушки R_v в зависимости от уменьшения содержания влаги X в материале. В соответствии с рисунком 2 процесс сушки может быть разделен на три части: начальный период сушки, период сушки с постоянной скоростью и период снижения скорости сушки, зависящие от характеристик твердого материала. Кривая А – В иллюстрирует изменение влажности в материале во время начального периода сушки. В течение этого периода температура твердого материала и его влажной поверхности ниже, чем температура сушки, в результате скорость сушки в области А – В будет возрастать до тех пор, пока температура поверхности твердого материала не достигнет температуры, соответствующей линии В – С. Если температура влажного материала выше, чем температура сушки, начальный период будет соответствовать линии А' – В. Начальный период обычно очень короток, и поэтому чаще всего им пренебрегают. Скорость сушки за период В – С постоянна и равна прямому участку В – С кривой влажности. Содержание влаги в точке перехода от периода постоянной скорости к периоду падения скорости называется критическим содержанием влаги X_{cr} . В этой критической точке содержание влаги в материале линейно снижается, и прямая линия становится кривой, которая асимптотически приближается к равновесному содержанию влаги в материале X_{eq} .

Таким образом, принимая во внимание относительно большую продолжительность стационарного процесса скорости сушки, а также используя асимптотический подход к решению общей модели [3,4,5], предлагаем следующую математическую модель процесса сушки [8]:

$$v_m \frac{\partial X}{\partial l} = -R_{v13}; \quad (1)$$

$$v_g \frac{\partial Y}{\partial l} = R_{v24} (G_m / G_g); \quad (2)$$

$$v_m \frac{\partial (C_m T_m)}{\partial l} = \frac{a_v V_v}{G_m} (T_g - T_m) - \lambda R_{v13}; \quad (3)$$

$$v_g \frac{\partial (C_g T_g)}{\partial l} = -\frac{a_v V_v}{G_g} (T_g - T_m) - \lambda_m \frac{G_m}{G_g} R_{v24}. \quad (4)$$

Уравнения системы представляют собой соответственно:

(1) – уравнение материального баланса сушимого вещества; (2) – уравнение материального баланса сушащего воздуха; (3) – уравнение теплового баланса сушимого вещества; (4) – уравнение теплового баланса сушащего воздуха. Используются следующие обозначения: l – независимая переменная интегрирования по длине барабана, m ; X – влажность материала, kg

$(H_2O)/kg$ (материала); Y – влажность сушащего газа, $kg (H_2O)/kg$ (материала); T_g – температура сушащего газа, K ; T_m – температура материала, K ; v_m – скорость материала в осевом направлении, m/c ; v_g – скорость сушащего газа в осевом направлении, m/c ; C_m – удельная теплоемкость материала, $Дж/кг\cdot K$; C_g – удельная теплоемкость газа, $Дж/кг\cdot K$; G_m – линейная плотность материала, kg/m ; G_g – линейная плотность газа, kg/m ; V_v – удельный объем барабана, m^3/m ; a_v – удельный коэффициент передачи тепла, $Дж/m^3 K\cdot c$; λ, λ_m – теплота испарения, $Дж/кг$; R_{v13}, R_{v24} – скорость сушки, $1/c$.

Предполагается уточнить значения коэффициентов $R_{v13}, R_{v24}, \lambda$ и λ_m в правых частях уравнений (1–4), используя [5]. Так называемый условный коэффициент сушки, или скорость сушки R_v , определяется как

$$R_{v13} = -\frac{(X - 1)}{g_m} r v_m$$

(для уравнений 1 и 3), где g_m – массовый расход материала, kg/c ; r – интенсивность массобмена, %;

$$R_{v24} = \frac{Y - 1}{g_g} r v_g,$$

где g_g – массовый расход сушащего воздуха (для уравнений 2 и 4). Кроме того, в уравнении (3) содержится величина теплоты испарения

$$\lambda = -\frac{c_v T_m}{X - 1} - T_m \frac{\partial C_m}{\partial X_m} + \frac{C_m T_m}{X - 1},$$

где c_v – теплоемкость выделяющегося газа, $Дж/кг\cdot K$ и в уравнении (4) величина

$$\lambda_m = \left(\frac{C_g T_g}{Y - 1} - \frac{c_v T_g}{Y - 1} - T_g \frac{\partial C_g}{\partial Y} \right).$$

Для повышения эффективности управления, снижения энергетических затрат, то есть оптимизации управления, данные параметры не должны быть константами, что предлагалось ранее [3,4,6] в качестве основных допущений в целях упрощения системы. Как можно более точно настроить БСУ на конкретный режим работы позволяют именно те значения R_v, λ, λ_m , которые получены из приведенных выше зависимостей.

Конструктивные параметры системы (1–4) объединяются в множество Ω [1]:

$$\{v_g, v_m, C_g, C_m, G_g, G_m, a_v, V_v, \lambda, \lambda_m\} \in \Omega.$$

В правых частях всех уравнений содержится так называемый линейный условный коэффициент скорости сушки, который может быть представлен в виде $R_v = k_1 X(l) + k_2 T_m(l) + k_3 T_g(l) + k_4$, где коэффициенты k_1, k_2, k_3, k_4 являются настроочными. Они обеспечивают точную настройку системы (1–4) под свойства сушимого материала, конструкцию установки и внешние условия

сушки на основании соответствия результатов моделирования экспериментальным данным.

Для обеспечения лучшей адекватности модели реальным процессам сушки в БСУ данные параметры должны быть не константами, а функциями от некоторых входных воздействий системы. При подстановке найденных функциональных зависимостей в полученное аналитическое решение системы из решения исключаются коэффициенты k_1 ,

$$C_f = C_g \frac{v_g G_g}{v_m G_m} [T_g(l_0) - T_g(l, \Omega, X(l_0), T_g(l_0), T_m(l_0))], \quad (5)$$

где l_0 – значение независимой переменной, соответствующее входу в барабан.

Управляющие параметры выбираются, исходя из следующих соображений. Для того чтобы иметь на выходе определенное значение содержания влаги, в материале достаточно варировать температуру и поток (расход) сушащего воздуха. Уменьшать температуру и расход газа, уменьшая тем самым затраты, можно лишь до определенного предела. Критерием в данном случае служит влажность материала на выходе барабана:

$$X(l = L, T_g(l_0), X(l_0), v_g, v_m) \leq X_{cr}, \quad (6)$$

где L – длина барабана, m , X_{cr} – критическая влажность материала на выходе барабана, $kg(H_2O)/kg(\text{материала})$.

$$C_f \langle T_g^*, v_g^*, v_m^* | X(l = L, T_g(l_0)^*, v_g^*, v_m^*) < X_{cr} \rangle = \min_{\{T_g(l_0), v_g, v_m\} \in \Omega_1} C_f \langle T_g, v_g, v_m | X_{out}(l = L, T_g(l_0), v_g, v_m) < X_{cr} \rangle,$$

где $T_g(l_0)^*$, v_g^* , v_m^* – оптимальные параметры управления, сводящие функционал (5) с учетом функционального ограничения (6) к минимуму. Эти параметры находятся при решении задачи минимизации методом скользящего допуска [9].

Эффективность управления при использовании оптимальных управляющих параметров, найденных по данному алгоритму, оценивается при сравнении с несколькими стандартными режимами работы БСУ. В процессе сравнения изменяются только управляющие параметры при прочих равных условиях. При этом снижение

k_2 , k_3 , k_4 и математическая модель процесса сушки оптимальным образом настраивается под конкретную БСУ и сушимый материал.

После идентификации модели (1-4) решается задача оптимизации процесса сушки по критерию снижения энергетических затрат. Целевая функция представляет собой удельные энергетические затраты на передачу тепла от газа одному килограмму материала внутри барабана, $Дж/кг$ [1]:

Кроме того, при снижении скорости подачи материала увеличивается время задержки материала в барабане, что также приводит к более низкому содержанию влаги в материале на выходе. Таким образом, в качестве управляющих параметров выбираются: $T_g(l_0)$ – входная температура сушащего воздуха, K ; v_g – скорость подачи сушащего воздуха, m/s ; v_m – скорость подачи материала, m/s . На данные параметры накладываются следующие двусторонние областные ограничения: $T_g low \leq T_g(l_0) \leq T_g up$, $v_g low \leq v_g \leq v_g up$, $v_m low \leq v_m \leq v_m up$. На входную влажность, являющуюся возмущающим воздействием, также накладывается ограничение $X low \leq X(l_0) \leq X up$. Данные неравенства задают область допустимых проектных параметров Ω_1 .

Задача оптимизации ставится следующим образом:

удельных энергетических затрат на передачу тепла в некоторых случаях достигает 20–25%.

Таким образом, повышение эффективности работы БСУ при сушке стружки достигается прежде всего за счет уменьшения энергетических затрат на технологический процесс сушки, ресурсосбережения, а также достаточно высокого быстродействия алгоритма управления за счет использования в системе управления уточненной математической модели, настроенной на конкретный режим работы установки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Янук Ю. В., Питухин Е. А. Об оптимизации управления сушильной установкой барабанного типа // Новые информационные технологии в ЦБП и энергетике. Петропавловск, 2002. С. 112–114.
- Янук Ю. В., Питухин А. В., Питухин Е. А. Оптимальное управление сушильной установкой барабанного типа по критерию снижения энергозатрат на технологический процесс сушки сыпучих материалов // Энергоресурсосбережение и обеспечение экологической безопасности на пром. предприятиях. Тезисы докл. научно-практической конф. Пушкин, 2004. С. 13–17.
- Yliniemi L. Advanced Control of a Rotary Dryer. Oulu. Oulun Yliopisto 1999. 100 p.
- Brambilla A., Nardini G., Stabert Z. Dynamic model of rotary dryer // 2nd symposium on the use of computers in chemical engineering. Usti Nad Labem, Tsekkoslovakia. 1973. Vol. II. P. 218–231.
- Вьюков И. Е., Зорин И. Ф., Петров В. П. Математические модели и управление технологическими процессами целлюлозно-бумажной промышленности. М.: Машиностроение, 1975. 373 с.
- Balchen Jens G., Kenneth I. Mumme. Process control: Structures and Applications / Van Nostrand Reinhold company, New York, 1988. 540 p.
- Питухин Е. А. Математическая модель управления качеством работы сушильной установки барабанного типа // Труды ПетрГУ. Серия «Прикладная математика и информатика». Петропавловск, 1997. Вып. 6. С. 71–76.
- Янук Ю. В., Питухин Е. А. Преобразование математической модели процесса сушки для управления сушильной установкой барабанного типа // Труды лесоинженерного факультета ПетрГУ. Петропавловск, 2003. Вып. 4. С. 191–196.
- Химельбаум Д. Прикладное нелинейное программирование. М.: Мир, 1975.