

УДК 66.047.57

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 жидком 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 высыхает 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 в номинальном 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

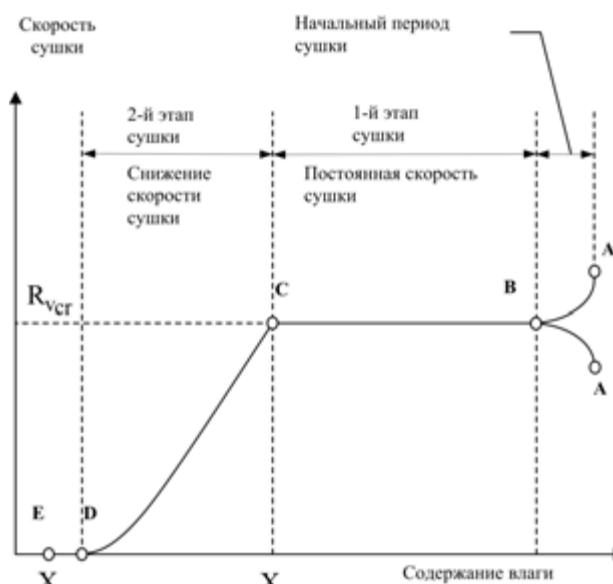


Рис. 2. Типичная кривая скорости сушки

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, м; X – влажность материала, кг

(H_2O)/кг (материала); Y – влажность сушащего газа, кг (H_2O)/кг (материала); T_g – температура сушащего газа, К; T_m – температура материала, К; v_m – скорость материала в осевом направлении, м/с; v_g – скорость сушащего газа в осевом направлении, м/с; C_m – удельная теплоемкость материала, Дж/кг·К; C_g – удельная теплоемкость газа, Дж/кг·К; G_m – линейная плотность материала, кг/м; G_g – линейная плотность газа, кг/м; V_v – удельный объем барабана, м³/м; a_v – удельный коэффициент передачи тепла, Дж/м²·К·с; λ , λ_m – теплота испарения, Дж/кг; R_{v13} , R_{v24} – скорость сушки, 1/с.

Предполагается уточнить значения коэффициентов R_{v13} , R_{v24} , λ 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, кг/с; r – интенсивность массообмена, %;

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

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·К 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 настройчными. 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 варьировать 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, $м/с$; v_m – скорость подачи материала, $м/с$. 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

1. Янчук Ю. В., Питухин Е. А. Об оптимизации управления сушильной установкой барабанного типа // Новые информационные технологии в ЦБП и энергетике. Петрозаводск, 2002. С. 112–114.
2. Янчук 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.
3. Yliniemi L. Advanced Control of a Rotary Dryer. Oulu. Oulun Yliopisto 1999. 100 p.
4. 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.
5. Вьюков И. Е., Зорин И. Ф., Петров В. П. Математические модели и управление технологическими процессами целлюлозно-бумажной промышленности. М.: Машиностроение, 1975. 373 с.
6. Balchen Jens G., Kenneth I. Mummel. Process control: Structures and Applications / Van Nostrand Reinhold company, New York, 1988. 540 p.
7. Питухин Е. А. Математическая модель управления качеством работы сушильной установки барабанного типа // Труды ПетрГУ. Серия «Прикладная математика и информатика». Петрозаводск, 1997. Вып. 6. С. 71–76.
8. Янчук Ю. В., Питухин Е. А. Преобразование математической модели процесса сушки для управления сушильной установкой барабанного типа // Труды лесинженерного факультета ПетрГУ. Петрозаводск, 2003. Вып. 4. С. 191–196.
9. Химельблау Д. Прикладное нелинейное программирование. М.: Мир, 1975.