

УДК 674.047

***А.В. Питухин, Ю.В. Янюк, Е.А. Питухин***

Питухин Александр Васильевич родился в 1948 г., окончил в 1972 г. Ленинградский политехнический институт, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАЕН, заведующий кафедрой технологии металлов и ремонта Петрозаводского государственного университета. Имеет более 80 печатных трудов в области оценки надежности, расчета и проектирования машин.



Янюк Юлия Вячеславовна родилась в 1967 г., окончила в 1993 г. Балтийский государственный технический университет, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры технологии металлов и ремонта Петрозаводского государственного университета. Имеет более 10 научных трудов в области математического моделирования, анализа и синтеза систем управления.



Питухин Евгений Александрович родился в 1971 г., окончил в 1994 г. Балтийский государственный технический университет, кандидат технических наук, докторант кафедры математического моделирования систем управления Петрозаводского государственного университета. Имеет более 40 научных трудов в области математического моделирования, анализа и синтеза систем управления, управления технологическими объектами в реальном времени.



**УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ  
ПОСЛЕФЛОТАЦИОННОЙ СУШКИ ЩЕПЫ**

Разработан оптимальный алгоритм управления процессом послефлотационной сушки щепы в сушильной установке барабанного типа по критерию минимума энергетических затрат.

*Ключевые слова:* сушка щепы, сушильная установка барабанного типа, математическая модель процесса сушки, энергетические затраты, оптимальное управление.

Одним из важных технологических процессов целлюлозно-бумажного производства является сушка щепы после флотации. Контроль влажности щепы необходим для выдерживания технологии варки целлюлозы, изготовления древесностружечных плит, длительного кондиционного хранения [9]. Для сушки могут быть использованы сушильные установки барабанного типа (роторные сушилки) – наилучшие по соотношению цены и качества. По сравнению с шахтными, ромбическими и другими видами сушилок они имеют следующие преимущества: универсальность; высокое качество сушки за счет интенсивного перемешивания материала; возможность сушить высоковлажный засоренный материал; исключение спекания; простота монтажа (для запуска в работу не требуется капитальных сооруже-

ний); надежность работы (исключается образование застойных зон); приемлемая цена.

В барабанную сушилку влажную щепу подают в сушильный барабан через загрузочный бункер и желоб. Влажная щепка и горячий сушильный агент (воздух) спиральными устройствами перемещаются вдоль барабана в одном направлении. Кроме того, эти устройства обеспечивают равномерный обдув частиц щепы сушильным агентом. По достижении противоположного конца барабана высушенную до нужной влажности щепу выгружают. Влажный сушильный агент с мелкими частицами древесины пропускают через циклон для их отделения.

Повышение эффективности управления технологическим процессом сушки щепы – важная проблема современного производства. Оптимизация управления может быть проведена по различным критериям [4]. Выбор того или иного критерия зависит от конкретных условий производственного процесса. Основные факторы оптимизации – энерго- и ресурсосбережение. Эффективный алгоритм управления процессом сушки должен, с одной стороны, обладать высоким быстродействием, с другой – быть оптимальным с точки зрения снижения энергетических затрат и потребления ресурсов [5].

Основными задачами при усовершенствовании систем управления барабанными сушильными установками (БСУ) являются [5, 10]: достижение требуемого значения выходного содержания влаги в материале щепы (несмотря на возмущения входных величин); оптимальное использование энергии при сушке; недопущение пересушивания, при котором увеличиваются энергетические затраты и могут возникнуть повреждения в материале; стабилизация процесса сушки в номинальном режиме.

Общая модель сушки в БСУ обычно состоит из некоторого набора дифференциальных уравнений в частных производных [1, 8, 10], описывающих передачу массы и тепла между газообразной и твердой фазами. Такая модель является динамической и достаточно сложной для решения, поэтому ее обычно упрощают (линеаризуют вокруг рабочей точки) или решают численно [7, 10]. 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 [2].

При изучении процессов сушки была выявлена одна общая особенность, характерная для сушки различных материалов в различных установках. Для любого процесса при построении кривой скорости сушки [8] наблюдается достаточно протяженный во времени участок, в котором скорость сушки постоянна и не зависит от времени. Этот стационарный процесс и представляет собственно сушку, т. е. выпаривание влаги из материала. Он зависит от внешних условий и не связан с внутренней передачей влаги.

Таким образом, на основании допущения о неизменности скорости сушки во времени и применения асимптотического подхода к решению общей модели предлагается следующая математическая модель процесса сушки [6]:

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

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

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

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

где  $v_m$  – скорость материала в осевом направлении, м/с;  
 $X$  – влажность материала, кг  $H_2O$ /кг материала;  
 $l$  – независимая переменная интегрирования по длине барабана, м;  
 $R_{v13}, R_{v24}$  – скорость сушки, 1/с;  
 $v_g$  – скорость сушащего газа в осевом направлении, м/с;  
 $Y$  – влажность сушащего газа, кг  $H_2O$ /кг материала;  
 $G_m$  – линейная плотность материала, кг/м;  
 $G_g$  – линейная плотность газа, кг/м;  
 $C_m$  – удельная теплоемкость материала, Дж/(кг·К);  
 $T_m$  – температура материала, К;  
 $a_v$  – удельный коэффициент передачи теплоты, кДж/(м<sup>3</sup>·К·с);  
 $V_v$  – удельный объем барабана, м<sup>3</sup>/м;  
 $T_g$  – температура сушащего газа, К;  
 $\lambda, \lambda_m$  – теплота испарения, Дж/кг;  
 $C_g$  – удельная теплоемкость газа, Дж/(кг·К).

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.

Предполагалось с помощью [1] уточнить значения коэффициентов  $R_{v13}, R_{v24}, \lambda$  и  $\lambda_m$  в правых частях уравнений (1)–(4). Так называемый условный коэффициент сушки, или скорость сушки  $R_v$ , для уравнений (1) и (3)

определяют как  $R_{v13} = -\frac{(X-1)}{g_m} r v_m$  (где  $g_m$  – массовый расход материала, кг/с;  $r$  – интенсивность массообмена, %; для уравнений (2) и (4)  $R_{v24} = \frac{Y-1}{g_g} r v_g$  (где  $g_g$  – массовый расход сушащего воздуха). Кроме того, урав-

нение (3) содержит теплоту 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), а уравнение (4) –  $\lambda_m = \left( \frac{C_g T_g}{Y-1} - \frac{c_v T_g}{Y-1} - T_g \frac{\partial C_g}{\partial Y} \right)$ .

Для повышения эффективности и снижения энергетических затрат, т. е. для оптимизации управления, данные параметры не должны быть константами, что предлагалось ранее [7, 8, 10] в качестве основных допущений в целях упрощения системы. Как можно более точно настроить БСУ на конкретный режим работы позволяют именно те значения  $R_v$ ,  $\lambda$ ,  $\lambda_m$ , которые получены из приведенных выше зависимостей.

Конструктивные параметры системы (1)–(4) объединяются в множество  $\Omega$  [4]:  $\{v_g, v_m, C_g, C_m, G_g, G_m, a_v, V_v, \lambda, \lambda_m\} \in \Omega$ .

Правые части всех уравнений содержат так называемый линейный условный коэффициент скорости сушки, который может быть представлен в виде  $R_v = k_1 X(l) + k_2 T_m(l) + k_3 T_g(l) + k_4$  (коэффициенты  $k_1, k_2, k_3, k_4$  являются настроечными и обеспечивают точную настройку системы (1)–(4) под свойства сушимого материала, конструкцию установки и внешние условия сушки на основании соответствия результатов моделирования экспериментальным данным).

Как уже отмечалось, 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 него исключаются коэффициенты  $k_1, k_2, k_3, k_4$ , а математическая модель процесса сушки оптимальным образом настраивается под конкретную БСУ и сушимый материал.

После идентификации модели (1)–(4) решают задачу оптимизации процесса сушки по критерию снижения энергетических затрат. Целевая функция представляет собой удельные энергетические затраты на передачу теплоты от газа 1 кг материала внутри барабана, Дж/кг [4]:

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

где  $l_0$  – независимая переменная, соответствующая входу в барабан.

Управляющие параметры выбирают 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, снижая тем самым затраты, можно лишь до определенного предела. Критерием в данном случае служит влажность материала на выходе из барабана:

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

где  $L$  – длина барабана, м;

$X_{cr}$  – критическая влажность материала на выходе из барабана, кг  $H_2O$ /кг материала.

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 были выбраны:  $T_g(l_0)$  – входная температура сушащего воздуха, К;  $v_g$  – скорость подачи сушащего воздуха, м/с;  $v_m$  – скорость

подачи материала, м/с. На данные параметры накладываются следующие двусторонние областные ограничения:  $T_{g\text{low}} \leq T_g(l_0) \leq T_{g\text{up}}$ ;  $v_{g\text{low}} \leq v_g \leq v_{g\text{up}}$ ;  $v_{m\text{low}} \leq v_m \leq v_{m\text{up}}$ . На входную влажность, являющуюся возмущающим воздействием, также накладывается ограничение  $X_{\text{low}} \leq X(l_0) \leq X_{\text{up}}$ . Данные неравенства задают область допустимых проектных параметров  $\Omega_1$ .

Задача оптимизации ставится следующим образом:

$$C_f \left\langle T_g^*, v_g^*, v_m^* \left| X(l = L, T_g(l_0)^*, v_g^*, v_m^*) < X_{cr} \right. \right\rangle =$$

$$= \min_{\{T_g(l_0), v_g, v_m\} \in \Omega_1} C_f \left\langle T_g, v_g, v_m \left| X_{\text{out}}(l = L, T_g(l_0), v_g, v_m) < X_{cr} \right. \right\rangle.$$

Здесь  $T_g(l_0)^*$ ,  $v_g^*$ ,  $v_m^*$  – оптимальные параметры управления, сводящие функционал (5) с учетом ограничения (6) к минимуму; их находят при решении задачи минимизации методом скользящего допуска [3].

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

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

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вьюков, И.Е. Математические модели и управление технологическими процессами целлюлозно-бумажной промышленности [Текст] / И.Е. Вьюков, И.Ф. Зорин, В.П. Петров. – М.: Машиностроение, 1975. – 373 с.
2. Питухин, Е.А. Математическая модель управления качеством работы сушильной установки барабанного типа [Текст] / Е.А. Питухин // Тр. ПетрГУ; серия «Прикладная математика и информатика». – Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 1997. – Вып 6. – С. 71–76.
3. Химмельблау, Д. Прикладное нелинейное программирование [Текст] / Д. Химмельблау. – М.: Мир, 1975.
4. Янюк, Ю.В. Об оптимизации управления сушильной установкой барабанного типа [Текст] / Ю.В. Янюк, Е.А. Питухин // Новые информационные технологии в ЦБП и энергетике. – Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2002. – С. 112–114.
5. Янюк, Ю.В. Оптимальное управление сушильной установкой барабанного типа по критерию снижения энергозатрат на технологический процесс сушки сыпучих материалов [Текст] / Ю.В. Янюк, А.В. Питухин, Е.А. Питухин // Тез. докл. научно-практ. конф. «Энергоресурсосбережение и обеспечение экологической безопасности на пром. предприятиях». – Пушкин: Изд-во СПб. электротехн. компании, 2004. – С. 13–17.

6. Янюк, Ю.В. Преобразование математической модели процесса сушки для управления сушильной установкой барабанного типа [Текст] / Ю.В. Янюк, Е.А. Питухин // Тр. лесоинженерного фак-та ПетрГУ. – Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2003. – Вып. 4. – С. 191–196.

7. Balchen, J.G. Process control: Structures and Applications [Text] / J.G. Balchen, I. M. Kenneth. – Van Nostrand Reinhold company, New York, 1988. – 540 p.

8. Brambilla, A. Dynamic model of rotary dryer//2nd symposium on the use of computers in chemical engineering [Text] / A. Brambilla, G. Nardini, Z. Stabert. – Usti Nad Labem, Tsekkoslovakia, 1973. – Vol. II. – P. 218–231.

9. Pitukhin, E.A. The design of an optimal control algorithm for the DAMATIC-XD system for decreasing the use of energy in afterflotational drying of wood chips [Text] / E.A. Pitukhin, J. Yanyuk // New information technologies in pulp and paper industry and energetic. – Petrozavodsk: PetrSU, 1998. – P. 37–38.

10. Yliniemi, L. Advanced Control of a Rotary Dryer [Text] / L. Yliniemi. – Oulun Yliopisto, Oulu, 1999. – 100 p.

Петрозаводский государственный  
университет

Поступила 22.09.05

*A.V. Pitukhin, Yu.V. Yanyuk, E.A. Pitukhin*

### **Management of After-flotation Chip Drying Process**

The optimal algorithm is developed for managing the process of after-flotation chip drying in a drying unit of a drum type based on the minimal power inputs criteria.

