



МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

УДК 66.047.25

М.Н. Гамрекели

Уральский государственный лесотехнический университет

Гамрекели Михаил Николаевич родился в 1940 г, окончил в 1963 г. Уральский государственный лесотехнический университет, доктор технических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры охраны труда Уральского государственного лесотехнического университета. Имеет более 150 научных работ в области исследований тепломассообмена в дисперсных средах, энергосбережения в процессах и аппаратах химической технологии, переработки промышленных отходов.
E-mail: gamrekely@mail.ru



ЭФФЕКТИВНОСТЬ СУШКИ ДРЕВЕСНОЙ СТРУЖКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ НА ВТОРОЙ СТАДИИ ВОЗДУХА, ОСУШЕННОГО ОХЛАЖДЕНИЕМ

Организация двухстадийного процесса сушки древесной стружки на основе существующих высокотемпературных барабанных сушилок с использованием осушенного охлаждением сушильного воздуха на второй стадии позволяет значительно увеличить производительность за счет снижения конечной температуры и утилизации тепла отработанного сушильного агента первой стадии сушки, снизить удельные затраты тепла, устранить пожароопасность процесса.

Ключевые слова: стружка, двухстадийная сушка, осушенный воздух.

Технология производства древесностружечных плит предусматривает доведение влажности используемой стружки до стандартных значений 2...5 % [5]. Для этой цели сырье сушат преимущественно в барабанных сушилках, используя в качестве сушильного агента сильно разбавленные свежим воздухом дымовые газы с температурой на входе от 275...300 до 550...600 °С и на выходе 125...150 °С [3].

Стремление уменьшить затраты тепла и пожароопасность процесса за счет понижения конечной температуры приводит к получению продукта с повышенной нестандартной влажностью.

Цель наших исследований – повышение эффективности использования тепла и снижение пожароопасности за счет проведения процесса в две стадии.

Обоснование двухстадийной сушки древесных материалов

Для решения проблемы предложено проводить процесс сушки в две стадии. При этом в результате увеличения подачи влажного продукта происходит снижение температуры в конце первой стадии. На вторую стадию стружка поступает еще с повышенной влажностью, ее подсушка осуществляется благодаря возникновению высокого потенциала влагопереноса между стружкой и потоком свежего сушильного воздуха.

Рассмотрим, как изменяется потенциал сушки на второй стадии процесса после первой высокотемпературной стадии сушки, реализуемой в промышленном сушильном барабане Н411-56. Воздух, используемый в качестве сушильного агента на второй стадии, предварительно осушают за счет конденсации при охлаждении и отделения содержащейся в нем влаги [1].

Так, при охлаждении воздуха до $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ его влагосодержание снижается до $d_1 = 6\text{ г/кг}$ абсолютно сухого воздуха (а.с.в.), а при охлаждении до отрицательных температур (не выше $-14\dots-15\text{ }^{\circ}\text{C}$) при относительной влажности 50 % содержание влаги в воздухе не превышает $d_{н.в} = 1\text{ г/кг}$ а.с.в. Такое же влагосодержание имеет поступающий извне морозный воздух, который можно использовать в качестве сушильного агента в зимний период.

Зададимся условием, что в процессе тепломассообмена поступающий сушильный свежий воздух при контакте с горячим материалом в конце второй стадии сушки будет иметь температуру $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Тогда для получения стружки с равновесной влажностью $W_{р.м} = 4\text{ \%}$ в соответствии с диаграммой равновесной влажности древесины [2] воздух в конце второй стадии должен иметь относительную влажность $\varphi_v = 18\text{ \%}$ при абсолютном содержании влаги 26 г/кг а.с.в. по $I - d$ -диаграмме влажного воздуха.

Таким образом, потенциал влагоемкости воздуха Δd_v , который можно использовать для подсушки материала на второй стадии в расчете на 1 кг а.с.в., в зависимости от степени осушки воздуха увеличивается до $20\dots25\text{ г/кг}$ а.с.в. и может быть рассчитан по формуле

$$\Delta d_v = (d_{к.в} - d_{н.в}), \quad (1)$$

где $d_{н.в}$ и $d_{к.в}$ – начальное и конечное влагосодержание воздуха, подвергаемого осушке.

При температуре сушильного воздуха в конце второй стадии сушки $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ относительная влажность воздуха составит 23 %, а его влагоемкость увеличиться до $33\dots38\text{ г/кг}$ а.с.в.

Процесс сушки стружки в барабанных сушилках

Для режимов сушки стружки в сушильном барабане Н411-56 в соответствии с технической характеристикой [3] для четырех положений наклона барабана при температурах сушильного агента (топочных газов) на входе $t_{вх} = 287\dots575\text{ }^{\circ}\text{C}$ и выходе $t_{вых} = 125$ и $155\text{ }^{\circ}\text{C}$ рассчитаны показатели равновесного состояния контактирующих сред. Значения относительной влажности сушильного агента на выходе из барабана $\varphi_v < 5\text{ \%}$, что соответствует по

Таблица 1

Технические показатели установки для сушки стружки при $t_{\text{вых1}}^1 = 100 \text{ }^\circ\text{C}$

№ режима сушки	Угол наклона барабана α , град	Расход сушительного газовоздушного агента $G_{\text{га}}, 10^3 \text{ кг/ч}$	Средняя температура сушильного агента на входе $t_{\text{вх1}}, \text{ }^\circ\text{C}$	Одностадийный (базовый) процесс			Двухстадийный процесс				
				Производительность по испаренной влаге $G_{\text{вп}}, \text{ кг/ч}$	Производительность по сухому материалу $G_{\text{см1}}, \text{ кг/ч}$	Относительная влажность агента на выходе из барабана $\varphi_{\text{вп}}, \%$	Показатель увеличения термического потенциала сушилки $K_{\text{тп}}$	Производительность по сухому материалу $G_{\text{см2}}, \text{ кг/ч}$	Производительность по испаренной влаге на 1-й стадии сушилки $S_{\text{вп}}, \text{ кг/ч}$	Производительность по испаренной влаге на 2-й стадии сушилки $S_{\text{вп}}, \text{ кг/ч}$	Производительность по испаренной влаге 2-стадийной установки $S_{\text{вп2}}, \text{ кг/ч}$
1	+3	19	287	600	680	6,0	1,42	966	782	70	852
2	0	24	337	1000	1300	7,1	1,30	1690	1185	115	1300
3	-2	24	565	1800	2500	8,7	1,13	2835	1651	390	2041
4	-3	27	575	3000	4000	13,2	1,13	4524	2792	610	3402

диаграмме влажности древесины значениям равновесной влажности стружки $W_{\text{р.м}} < 1 \%$. Расчетное время пребывания стружки с учетом производительности и степени заполнения барабана сушилки составляет 1,1 ч.

Анализ показал, что при фактической конечной влажности стружки 4 % в барабанной сушилке Н411-56 коэффициент достижимости равновесной влажности древесины $k_{\text{р}}$, рассчитанный по формуле

$$k_{\text{р}} = \frac{W_{\text{к.м}}}{W_{\text{р.м}}}, \quad (2)$$

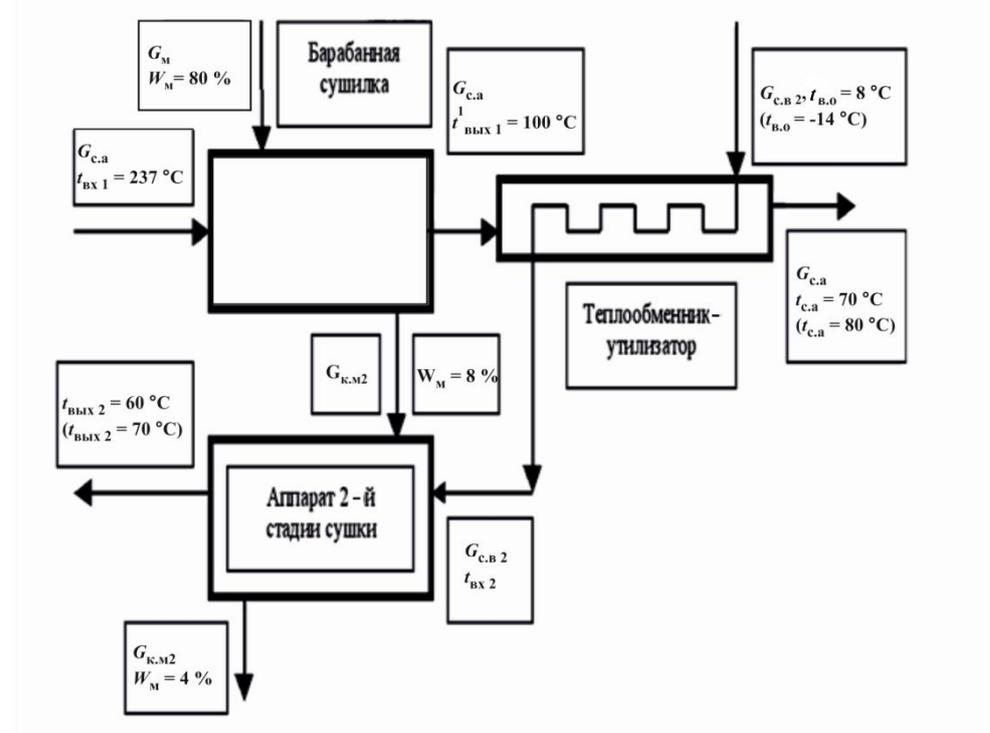
не превышает 0,25.

Здесь $W_{\text{к.м}}$ – фактическая влажность частиц дисперсных материалов при температуре и относительной влажности воздуха на выходе из сушильной камеры; $W_{\text{р.м}}$ – равновесная влажность взвешенных в газе частиц дисперсных материалов.

Показатели одно- и двухстадийного процессов сушки

В табл. 1 приведены показатели базовых режимов одностадийного процесса сушки стружки в сушильном барабане Н411-56 с начальной $W_{\text{м}} = 80 \%$ и конечной $W_{\text{м}} = 4 \%$ влажностью, а на рисунке – принципиальная схема 2-стадийной сушки и расчетные значения показателей предложенного процесса при сохранении всех начальных условий одностадийных режимов. Конечная температура первой стадии $t_{\text{вых1}}$ и равная ей начальная температура второй стадии снижены от пожароопасного значения $155 \text{ }^\circ\text{C}$ до нового значения $t_{\text{вых1}}^1 = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ при двух вариантах конечной температуры процесса $t_{\text{вых2}} = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ и $t_{\text{вых2}} = 70 \text{ }^\circ\text{C}$.

Производительность двухстадийной установки по материалу и испаренной влаге рассчитывали умножением соответствующих значений производительности одностадийного процесса на показатель увеличения



Принципиальная схема двухстадийной сушки дисперсных древесных материалов с использованием на второй стадии воздуха, осушенного охлаждением

термического потенциала сушки, который можно рассчитать как

$$K_{т.п} = \frac{t_{вх1} - t_{вых1}^1}{t_{вх1} - t_{вых1}}$$

Из данных табл. 1 следует, что за счет снижения конечной температуры в сушильном барабане при сохранении начальной температуры и расхода сушильного агента можно на первой стадии значительно увеличить подачу влажного материала в сушилку, что повысит производительность по испаренной влаге и высушиваемому материалу. Однако при этом его влажность после первой стадии увеличится до заданного значения (в нашем случае до $W_M = 8\%$), и возникнет необходимость подсушки материала на второй стадии до стандартной влажности.

Расчетное влагосодержание сушильного воздуха при $t_{вых1}^1 = 100\text{ °C}$ на выходе из барабана при переходе от режима сушки № 1 к режиму № 4 увеличивается от 41 до 103 г/кг а.с.в., что по $t - \varphi_v$ -диаграмме соответствует теоретическому значению равновесной влажности древесины $W_{р.м} = 1,3...2,4\%$. При этом k_p не превышает 0,375.

Температура и расход сушильного воздуха на второй стадии

Расход сушильного воздуха на второй стадии зависит от количества влаги, которую необходимо испарить $G_{и2}$, и потенциала влагоемкости сушильного воздуха на второй стадии:

$$G_{в2} = \frac{G_{и2}}{\Delta d_{в}}.$$

В общем случае производительность по испаренной влаге на второй стадии сушки определяется с учетом влажности материала в конце первой $W_{к.м1}$ и второй $W_{к.м2}$ стадий по формуле

$$G_{и2} = \frac{(W_{к.м1} - W_{к.м2})G_{сух}}{100}.$$

Для достижения на второй стадии конечной температуры сушильного воздуха, при которой влажности материала и воздуха приходят в «квазиравновесное» состояние, его нужно после осушки охлаждением или вымораживанием перед подачей в аппарат второй стадии сушки подогреть до расчетной температуры $t_{вх2}$, используя низкотемпературное тепло сушильного агента после первой стадии сушки и теплосодержание материала.

Начальная температура воздуха $t_{вх2}$ зависит от его заданной конечной температуры; расхода материала $G_{м}$, его начальной и конечной температуры на входе $t_{вх2}$ и выходе $t_{вых2}$ из сушильной камеры; количества влаги $G_{и2}$, испарившейся в процессе второй стадии сушки, с учетом удельной теплоты испарения воды $q_{исп}$:

$$t_{вх2} = \frac{G_{с.в2} \bar{c}_{в} t_{вых2} + G_{м} \bar{c}_{м} (t_{вых2} - t_{вх2}) + q_{исп} G_{и2}}{G_{с.в2} \bar{c}_{в}}.$$

Расход и теплоемкость материала $\bar{c}_{м}$ и сушильного воздуха $\bar{c}_{в}$ следует принимать при средних значениях температур второй стадии сушки.

Оценка энергосбережения при двухстадийном процессе сушки

Эффективность перехода на двухстадийную сушку стружки можно оценить, сравнивая удельные затраты на испарение 1 кг влаги по режимам промышленного (базового) процесса $q_{б}$ и q_2 для соответствующих расчетных режимов двухстадийного процесса:

$$q_2 = \frac{q_{б} G_{и.б} - Q_{э.м} - Q_{э.с.а} + Q_3}{G_{и1,2}}. \quad (3)$$

Для рассматриваемых режимов сушки стружки в сушильном барабане Н411-56 удельный расход теплоты на 1 кг испаренной влаги из расчета 100 кг «условного топлива» на 1 т сухой стружки при теплоте сгорания 7000 ккал/кг составляет $q_{б} = 3850$ кДж/кг [4].

В формуле (3) учтены экономия теплоты ($Q_{э.м}$, $Q_{э.с.а}$) и дополнительные затраты (Q_3):

а) экономия теплоты в результате использования части теплосодержания материала после первой стадии на осуществление второй стадии

$$Q_{э.м} = G_M \bar{c}_M (t_{\text{вых1}} - t_{\text{вых2}}) \frac{1}{D_{\Pi}}; \quad (4)$$

б) экономия теплоты за счет утилизации вторичного тепла сушильного агента первой стадии сушки на подогрев сушильного воздуха второй стадии сушки

$$Q_{э.с.а} = G_{с.в} c_B (t_{\text{вых1}} - t_{\text{вых2}}^1) \frac{1}{D_{\Pi}}; \quad (5)$$

в) затраты теплоты на дополнительный подогрев воздуха второй стадии сушки от температуры холодного воздуха после осушки охлаждением $t_{в.охл}$ до начальной температуры второй стадии $t_{вх2}$

$$Q_3 = G_{с2} c_B (t_{вх2} - t_{в.охл}) D_{\Pi}. \quad (6)$$

Конечная температура сушильного агента $t_{\text{вых2}}^1$ после передачи тепла в теплообменнике сушильному воздуху второй стадии сушки в расчетах принята на 10 °С выше температуры на выходе из аппарата второй стадии сушки.

Используя выражения (4)–(6), преобразуем соотношение (3) к следующему виду:

$$q_{с.в} = \frac{q_B G_{и.б} - G_M \bar{c}_M (t_{\text{вых1}} - t_{\text{вых2}}) \frac{1}{D_{\Pi}} - G_{с.а} \bar{c}_B (t_{\text{вых1}} - t_{\text{вых2}}^1) \frac{1}{D_{\Pi}} + G_{в2} \bar{c}_B (t_{вх2} - t_{в0}) D_{\Pi}}{G_{и1,2}}. \quad (7)$$

Коэффициент $D_{\Pi} = 1,1$ учитывает внешние потери теплоты от поверхностей аппаратов и воздухопроводов первой и второй стадий сушки, которые приняты 10 % от полезных затрат тепла.

В табл. 2 приведены расчетные значения (при начальной температуре $t_{в.о} = 10$ °С) показателей второй стадии процесса (в скобках – при $t_{в.о} = -14$ °С). Удельные затраты теплоты рассчитаны при $k_p = 0,25$ и 1,00.

Дополнительная мощность электродвигателей при переходе на двухстадийный процесс по аналогии с технической характеристикой базовой установки [3] составит около 2 кВт на 1000 кг сушильного агента.

Наиболее экономичны режимы при $t_{\text{вых2}} = 70$ °С и $k_p = 1,00$. Производительность увеличивается на 14...25 % при удельном снижении затрат теплоты на 12...48 %, несмотря на сравнительно небольшие дополнительные затраты теплоты на повышение температуры холодного воздуха перед его подачей в аппарат второй стадии сушки.

Наряду с совмещением процессов охлаждения, сушки и усреднения структурной влажности дисперсных древесных материалов, снижением пожароопасности при переходе на двухстадийную схему сушки получен очевидный экономический эффект.

Таблица 2

№ режима сушки	Производительность по испаренной влаге на 2-й стадии сушки $G_{из}$, кг/ч	Значение показателей при различных температурах t_{max2} , °С, потенциале влагосодержания сушеного воздуха 2-й стадии $\Delta d_{св}$, г/кг а.с.в., и K_p											
		60				70				70			
		9 (14) при $K_p = 0,25$		20 (25) при $K_p = 1,00$		33 (38) при $K_p = 1,00$		Начальная температура сушеного воздуха 2-й стадии t_{max2} , °С		Удельные затраты теплоты на испарение влаги $q_{св}$, кДж/кг		Удельные затраты теплоты на испарение влаги $q_{св}$, кДж/кг	
		Расход сушильного воздуха $G_{св}$, кг/ч	Начальная температура сушеного воздуха 2-й стадии t_{max2} , °С	Удельные затраты теплоты на испарение влаги $q_{св}$, кДж/кг	Расход сушильного воздуха $G_{св}$, кг/ч	Начальная температура сушеного воздуха 2-й стадии t_{max2} , °С	Удельные затраты теплоты на испарение влаги $q_{св}$, кДж/кг	Расход сушильного воздуха $G_{св}$, кг/ч	Начальная температура сушеного воздуха 2-й стадии t_{max2} , °С	Удельные затраты теплоты на испарение влаги $q_{св}$, кДж/кг	Расход сушильного воздуха $G_{св}$, кг/ч	Начальная температура сушеного воздуха 2-й стадии t_{max2} , °С	Удельные затраты теплоты на испарение влаги $q_{св}$, кДж/кг
1	70	7 778 (5 000)	70 (76)	2 641 (2 634)	3 500 (2 800)	82 (88)	2 574 (2 779)	2 121 (1 842)	79 (90)	2 596 (2 609)	2 121 (1 842)	79 (90)	2 596 (2 609)
2	115	12 778 (8 214)	69 (75)	2 930 (2 924)	5 750 (4 600)	77 (81)	2 855 (2 866)	3 485 (3 026)	82 (89)	2 874 (2 887)	3 485 (3 026)	82 (89)	2 874 (2 887)
3	390	43 333 (2 785)	75 (83)	3 647 (3 617)	19 500 (15 600)	93 (101)	3 085 (3 156)	11 818 (1 026)	86 (95)	3 019 (3 052)	11 818 (1 026)	86 (95)	3 019 (3 052)
4	610	67 778 (4 357)	75 (83)	3 644 (3 630)	30 500 (24 400)	93 (101)	3 498 (3 520)	18 485 (1 605)	86 (95)	3 434 (3 474)	18 485 (1 605)	86 (95)	3 434 (3 474)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гамрекели М.Н.* Параметрические условия энергосбережения при распылительной сушке // Пищевая технология. 2006. № 1. С. 74–79. (Изв. высш. учеб. заведений).
2. *Серговский П.С.* Гидротермическая обработка и консервирование древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1968. 448 с.
3. Справочник по производству древесностружечных плит / И.А. Отлев [и др.]. М.: Лесн. пром-сть, 1990. 384 с.
4. Теплотехника / Б.И. Бахмачевский [и др.]. М.: Metallurgizdat, 1963. 608 с.
5. *Шварцман Г.М., Щедро Д.А.* Производство древесностружечных плит. М.: Лесн. пром-сть, 1987. 320 с.

Поступила 27.04.10

M.N. Gamrekely
Ural State Forestry University

Efficiency of Two-Stage Drying of Wood Chips Using Cool-Dried Air

Organization of a two-stage process of wood chips drying on the basis of existing high-temperature drum-type dryers using cool-dried air at the second stage can significantly improve performance by reducing the final temperature and waste-heat recovery of the spent drying agent of the first drying stage, as well as to reduce the unit cost of heat and eliminate fire hazards of the process.

Key words: chips, two-stage drying, dried air.
