

ХОЛОД КАК ФАКТОР ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ ПРИ ДВУХСТАДИЙНОЙ СУШКЕ ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ

М.Н. Гамрекели

*Уральский государственный лесотехнический университет, г. Екатеринбург, Россия
gamrekely@mail.ru*

При производстве сухих дисперсных продуктов, например, разнообразных продуктов распылительной сушки (молочные продукты, пищевые добавки, моющие порошки, биоматериалы) или при сушке древесной стружки, используемой для получения древесностружечных плит, а также при сушке других дисперсных капиллярно-пористых материалов, велики потери низкотемпературного тепла с отработанным сушильным газом.

С целью повышения производительности установки и снижения удельных затрат тепла применяется двухстадийная сушка [1], при которой на первой стадии происходит процесс преимущественно при постоянной скорости сушки. Полученный продукт затем подвергается подсушке до стандартной влажности, например, в виброаппарате, в котором может быть реализован период падающей скорости сушки, благодаря достаточно большому времени пребывания, на один–два порядка превышающему время пребывания в распылительной сушильной камере.

Удельные потери тепла на один кг испаренной влаги благодаря существенному увеличению производительности установки значительно уменьшаются при переходе на двухстадийный процесс сушки с использованием на второй стадии горячего сушильного газа, поступающего от дополнительного источника тепла. Однако, общие потери тепла при этом растут в связи с тем, что к потерям низкотемпературного тепла сушильного агента первой стадии добавляются дополнительные затраты тепла второй стадии сушки.

В основе применения процессов двухстадийной сушки капиллярно-пористых материалов лежит целесообразность аппаратно-технологического разделения процесса на два периода, с резко различающейся кинетикой сушки.

Для первого периода, в котором сушка протекает при постоянной скорости в результате испарения свободной влаги, может быть выбрана очень высокая начальная температура сушильного газа без опасения перегрева материала, который не досушен и обладает повышенной влажностью.

Во втором периоде удаления влаги, физически связанной со структурой материала, возможен его перегрев в результате высокотемпературного внешнего воздействия. Поэтому температура процесса должна быть существенно понижена.

Для компенсации снижения температурного потенциала сушки важнейшим условием эффективной сушки в этом периоде является максимальное увеличение потенциала переноса влаги. Это возможно при использовании сушильного воздуха с минимальным начальным содержанием влаги для этой стадии сушки при значительном увеличении времени пребывания.

1. Потенциал влагоемкости воздуха, осушенного охлаждением

Решить проблему повышения эффективности использования низкотемпературного тепла отработанного сушильного агента первой стадии сушки при одновременном существенном повышении производительности двухстадийного процесса может применение на второй стадии в качестве сушильного агента воздуха, предварительно осушенного в результате конденсации при охлаждении и сепарации содержащейся в нем влаги. Затем этот

воздух подогревается до некоторой расчетной температуры за счет утилизации низкотемпературного тепла отработанного сушильного агента первой стадии.

Так, при предварительном охлаждении до $+5^{\circ}\text{C}$ сушильного воздуха, предназначенного в качестве сушильного агента для второй стадии сушки, его влагосодержание снижается до $d_1 = 6 \text{ г/кг а.с.в.}$, а при глубоком охлаждении до минусовых температур $-14\dots-15^{\circ}\text{C}$ даже при относительной влажности до 100% содержание влаги в воздухе не превышает $d_{н.е.} = 1 \text{ г/кг а.с.в.}$

Такое влагосодержание также может иметь поступающий извне атмосферный морозный воздух, который можно использовать в холодный период на значительной части территории России в качестве сушильного агента второй стадии сушки.

При нагревании предварительно осушенного охлаждением воздуха перед подачей на вторую стадию сушки его потенциальная влагоемкость и соответственно градиент сушки будут увеличиваться с ростом температуры.

Значение температуры подогрева воздуха перед подачей на вторую стадию сушки будет зависеть от затрат тепла на испарение влаги из продукта при его подсушке до стандартной влажности. Частично подогрев будет происходить за счет использования теплосодержания горячего продукта при снижении его температуры до конечной температуры второй стадии сушки.

Основная же часть тепла для подогрева сушильного воздуха второй стадии может быть использована за счет утилизации низкотемпературного тепла отработанного сушильного агента первой стадии

Для исключения конденсации влаги при выгрузке продукта из аппарата второй стадии сушки при температуре хранения продукта, обычно близкой к комнатной температуре, массовый расход сушильного воздуха второй стадии сушки должен быть достаточным для поддержания относительной влажности воздуха, соответствующей заданной конечной влажности продукта.

При двухстадийной сушке конечную влажность продукта на выходе можно рассматривать как некоторую «квазистационарную» влажность, соответствующую температуре сушильного воздуха и его относительной влажности на выходе и времени пребывания продукта на второй стадии сушки.

Учитывая возможность обеспечить значительное время пребывания продукта в контакте с сушильным воздухом на второй стадии, можно принять допущение, что конечная влажность продукта будет равновесной.

Так при подсушке молочных продуктов на второй стадии после распылительной сушки, например в виброаппарате, время пребывания в сравнении со временем пребывания в распылительной сушилке может быть увеличено на один-два порядка (до нескольких минут). Расчетное время пребывания древесной стружки на второй стадии сушки с учетом производительности и степени заполнения барабанной сушилки может быть увеличено до 1,1ч.

2. Основные положения методики расчета второй стадии сушки с применением воздуха, предварительно осушенного охлаждением и подогретого за счет утилизации низкотемпературного тепла отработанного газа первой стадии сушки

Для расчетов второй стадии сушки можно использовать заранее определенную эмпирически для каждого вида продукта, подвергаемого сушке, зависимость равновесного состояния влажности продукта от температуры и влажности сушильного воздуха.

При организации двухстадийной сушки молочных продуктов параметры процесса второй стадии при заданной конечной влажности продукта 3,5–4,7% можно определить из уравнения равновесного состояния сухих молочных продуктов в сушильном воздухе [2]

$$\lg B_p = 0,01445 \varphi_{вл} + \lg (1,423 + 0,0543t_{\theta}) \quad (1)$$

Потенциал влагоёмкости $\Delta d_{вл}$ используемого на второй стадии сушки воздуха после его глубокой осушки на 1 кг абсолютно сухого воздуха с учетом начального влагосодержания $d_{н.в}$ может быть рассчитан по формуле

$$\Delta d_{вл} = (d_{к.в} - d_{н.в}),$$

где $d_{н.в}$ и $d_{к.в}$ – начальное и конечное влагосодержание воздуха, подвергаемого осушке, г/кг а.с.в.

Так, если осушенный охлаждением воздух за счет предварительного подогрева и в результате контакта с горячим продуктом, поступающим из аппарата первой стадии сушки, нагреется в конце второй стадии сушки до 30–35⁰С, то его влагоёмкость даже при достижении сравнительно небольшой относительной влажности воздуха 30% увеличится до 9–11 г/кг а.с.в. Одновременно увеличится градиент переноса влаги от частиц высушиваемого материала к сушильному воздуху.

Эти условия соответствуют процессу подсушки на второй стадии сушки молочных продуктов после распылительной сушки на первой стадии

Аналогичный подход применим и для других капиллярно-пористых дисперсных продуктов, в частности, для древесной стружки, которую преимущественно сушат в барабанных сушилках.

Зададим условие, что в процессе тепломассообмена сушильный свежий воздух на выходе из аппарата второй стадии сушки после контакта с горячей стружкой в конце второй стадии сушки будет иметь температуру +60⁰С. Тогда для получения стружки с равновесной влажностью $W_{р.м.} = 4\%$ в соответствии с диаграммой равновесной влажности древесины [3,] воздух в конце второй стадии должен иметь относительную влажность $\varphi_в = 18\%$ при абсолютном содержании влаги 26 г/кг а.с.в. по I-d диаграмме влажного воздуха.

Таким образом, потенциал влагоёмкости воздуха $\Delta d_в$, который можно использовать для подсушки материала на второй стадии в расчете на 1 кг абсолютно сухого воздуха, в зависимости от степени осушки воздуха увеличивается до 20 – 25 г/кг а.с.в.

Если задать температуру сушильного воздуха в конце второй стадии сушки древесной стружки +70⁰С, то в соответствии с диаграммой равновесной влажности древесины относительная влажность воздуха составит 23 %, а его влагоёмкость увеличится до 33 – 38 г/кг а.с.в.

Расход сушильного воздуха второй стадии сушки определяется с учетом количества влаги ΔW , испаряемой на второй стадии сушки по формуле

$$m_{в.с.} = \Delta W / \Delta d_{вл.}$$

Температура, до которой необходимо подогреть предварительно осушенный охлаждением воздух перед использованием на второй стадии сушки, рассчитывают по формуле

$$t_{вх.2} = \frac{G_{с.в.2} \bar{c}_в t_{вх.2} + G_{нр} \bar{c}_{нр} (t_{вх.2} - t_{вх.2}) + q_{исп} G_{u2}}{G_{с.в.2} \bar{c}_в} \quad (2)$$

Для расчета необходимо задаться температурой воздуха $t_{вх.2}$ на выходе из аппарата второй стадии сушки. Значение этой температуры должно соответствовать условиям равновесия влажности продукта, влажности и температуры воздуха. Для сушки молочных продуктов эти условия определяются зависимостью (1), а при сушке древесной стружки диаграммой равновесного состояния древесины [4].

Температура продукта принимается равной температуре сушильного воздуха, причем, температура продукта на входе в аппарат второй стадии равна температуре продукта после первой стадии сушки, $t_{ex.2} = t_{вых.1}$.

Поскольку расчетное значение начальной температуры сушильного воздуха второй стадии (2) при распылительной сушке молочных продуктов небольшие и составляют $t_{ex.2}=30-35^{\circ}\text{C}$, то для его подогрева достаточно использовать низкотемпературное тепло отработанного воздуха первой стадии.

В некоторых случаях, помимо утилизации тепла отработанных сушильных газов первой стадии сушки для подогрева воздуха второй стадии сушки, необходим его дополнительный подогрев от постороннего источника.

3. Эффективность снижения тепловых затрат

Была сделана оценка эффективности подсушки продукта на второй стадии процесса с применением на второй стадии атмосферного воздуха, предварительно осушенного охлаждением и подогретого до расчетной температуры за счет утилизации тепла отработанного сушильного воздуха первой стадии сушки.

Оценка проводилась в сравнении с общими затратами тепловой и электрической энергии на установке в целом.

Рассмотрены энергетические затраты при двухстадийной сушке молочных продуктов с влажностью продукта после первой стадии распылительной сушки в пределах от 7 до 8% и с подсушкой дисперсного продукта в аппарате второй стадии сушки до стандартной влажности $3,5\div 4,7\%$.

В основу расчетов положены фактические исходные данные, соответствующие технико-экономическим показателям одностадийных установок распылительной сушки РС-1000 с производительностью 1000 кг/ч по испаренной влаге. Установки нашли применение на шести молочно-консервных комбинатах стран СНГ для производства различных видов сухих молочных продуктов. Один из комбинатов находится в г. Калинковичи Гомельской области Белоруссии.

Для оценки энергетических затрат рассмотрены варианты с применением на второй стадии сушки воздуха с предварительным нагревом:

– от дополнительного нагревателя до начальной температуры $t_{1,2} = 100^{\circ}\text{C}$

– за счет утилизации низкотемпературного тепла отработанного сушильного агента первой стадии сушки сушильного воздуха, предварительно осушенного глубоким охлаждением до $-14 \div -15^{\circ}\text{C}$.

Установлено влияние организации процесса двухстадийной сушки на удельные затраты тепла и электроэнергии и термический к.п.д. процесса.

Термический к.п.д. установки оценивался по формуле

$$\eta = \frac{t_{ex} - t_{вых}}{t_{ex} - t_0} \cdot 100, \%$$

При одностадийном процессе $t_{вых}$ обозначает температуру на выходе из камеры, а при подсушке продукта – температуру на выходе из аппарата второй стадии, если для ее реализации утилизируется часть тепла отработанного сушильного воздуха после первой стадии.

Применение в качестве полезных затрат на осуществление процесса сушки только затрат тепла на испарение, как это делают авторы работы [5], не является корректным.

Поэтому дополнительно учитывались необходимые затраты тепла на поддержание конечной температуры сушильного воздуха, которая в соответствии с уравнением кинетики сушки должна соответствовать заданному значению равновесной (квазиравновесной) влажности продукта.

Показатели двухстадийного процесса приведены в таблице.

При начальной температуре сушильного воздуха на первой стадии 177°C и использовании нагреваемого от дополнительного источника воздуха на второй стадии с начальной температурой 100°C без его предварительной осушки в результате дополнительных затрат тепла термический к.п.д. составляет 65%. Подсушка продукта в пневмотрассе (как вторая стадия) несколько улучшает показатели установки.

Таблица

Показатели процессов распылительной сушки молочных продуктов

Параметры и показатели процесса	Размерность	Одностадийный процесс			Двухстадийный процесс			
		Без подсушки	Применение подсушки продукта		$t_2=100^{\circ}\text{C}$	Применение на 2-ой стадии глубоко осушенного воздуха		
Подсушка в пневмотрассе продукта после 1-ой стадии	%	–	0,5	1,5	–	–	–	–
Начальная температура воздуха 1-ой стадии	$^{\circ}\text{C}$	177	177	177	249	249	295	265
Конечная температура воздуха 1-ой стадии	$^{\circ}\text{C}$	77	74	72	65	65	70	65
Степень подсушки продукта после 1-ой стадии, V_1/V_1^1	–	3,5/3,5	4/3,5	4,5/3,5	7/3,5	7/3,5	7,6/3,5	8,2/3,5
Производительность по испаренной влаге	кг/ч	1018	1064	1102	1956	1956	2582	2218
Расход тепла	кДж/кг	5380	5123	4940	4557	4061	3698	3832
Расход воздуха на второй стадии, $m_{в.с}$	кг/ч	5650	5990	5888	9285	12944	20148	19963
Удельный расход электроэнергии на 1 кг испар. влаги	кДж/кг	626	600	578	575	478	402	466
Термический к.п.д.	%	63,7	65,3	66,9	73,7	86	89,3	91

Примечания:

1. Производительность задана для установки по испаренной влаге; расходы тепла и электроэнергии заданы удельными на 1 кг испаренной влаги на установке; для двухстадийного процесса термический к.п.д. в целом для установки; для одностадийного процесса термический к.п.д. был рассчитан для распылительной сушильной камеры.

2. При двухстадийном процессе на первой стадии применяется распылительная сушилка, а на 2-ой стадии сушки – виброаппарат.

3. t_2 – сушка горячим воздухом на второй стадии.

С повышением на первой стадии начальной температуры сушильного воздуха до 249°C термический к.п.д.увеличивается до 73,7%.

Применение глубоко осушенного охлаждением воздуха на второй стадии позволяет увеличить термический к.п.д. при этой же начальной температуре сушильного воздуха до 86%. С ростом начальной температуры первой стадии сушки до 265°C и 295°C термический к.п.д. установки соответственно увеличиться до 89% и 91%.

Кроме того, при двухстадийном процессе с предварительной глубокой осушкой воздуха для второй стадии общая производительность установки заметно возрастает, что приводит к снижению удельных затрат тепла на $600\div 720$ кДж/кг.исп.вл., в сравнении с предварительным подогревом атмосферного воздуха от дополнительного источника до $t_{1,2}=100^{\circ}\text{C}$.

Необходимо учесть, что при заданной степени подсушки дисперсного продукта на второй стадии $V_{кн.км}/V_{кн.у}=2\div 2,5$ рост производительности установки опережает рост затрат

электроэнергии. Превышение затрат электроэнергии в варианте использования на второй стадии сушки атмосферного воздуха, нагретого до $t_{1,2}=100^{\circ}\text{C}$, в сравнении с расходом электроэнергии на предварительную осушку охлаждением может составлять в зависимости от начальных параметров двухстадийного процесса до 250 кДж/кг. исп. вл

Таким образом, использование в качестве сушильного агента второй стадии сушки воздуха, предварительно осушенного охлаждением с применением искусственного холода [6] и затем нагретого за счет утилизации низкотемпературного тепла отработанного сушильным воздухом первой стадии распылительной сушки, позволит снизить удельный расход энергии на 850÷970 кДж/кг. исп. вл.

При использовании естественного холода в зимний период при достаточно низких температурах атмосферного воздуха отпадает необходимость в получении искусственного холода, и экономия энергии на установке может составить до 1220 кДж/кг исп. вл.

Двухстадийный процесс при высоких (предельных) начальных температурах сушильного воздуха и применение предварительно глубоко осушенного воздуха с максимально возможной долей подсушки продукта на второй стадии является наиболее экономичным по удельным затратам тепла, электроэнергии и удельному расходу воздуха на 1 кг испаренной влаги и произведенного продукта.

Аналогичный подход может быть применен и при сушке других дисперсных материалов, например влажной древесной стружки.

В качестве базовых режимов рассмотрены четыре режима одностадийной сушки стружки в сушильном барабане Н 411-56 [7] с начальной влажностью $W_m=80\%$ и конечной влажностью $W_{к.м.} = 4\%$ с разными углами наклона барабана, от которых зависит время пребывания в нем подвергаемого сушке продукта. В качестве сушильного агента на первой стадии использованы сильно разбавленные свежим воздухом дымовые газы с температурой на входе от 287 до 575°C и на выходе 155°C . При температуре 155°C сохраняются условия пожарной опасности.

Для рассматриваемых режимов сушки стружки в сушильном барабане Н411-56 удельный расход тепла на один кг испаренной влаги из расчета 100 кг «условного топлива» на 1 т сухой стружки [7] при теплоте сгорания 7000 ккал/кг составляет $q_B=3850$ кДж/кг [8].

При переходе на двухстадийный процесс в результате увеличения подачи влажного продукта в аппарат первой стадии на вторую стадию стружка поступает с повышенной влажностью 8% влажности с влажностью 4% в конце второй стадии сушки.

Подсушка стружки осуществляется глубоко осушенным воздухом предварительным охлаждением до -14°C , благодаря возникновению высокого градиента влагопереноса между стружкой и свежим потоком сушильного воздуха. Воздух, используемый в качестве сушильного агента на второй стадии, предварительно осушают за счет конденсации при охлаждении и отделения содержащейся в нем влаги, а затем подогревают до расчетной температуры (1).

Температура на выходе из аппарата первой стадии сушки принята 100°C . Для получения стружки с заданной равновесной влажностью $W_{р.м.} = 4\%$ расчетная температура воздуха в конце второй стадии в соответствии с диаграммой равновесной влажности древесины [5] должна составлять $+60^{\circ}\text{C}$ при относительной влажности воздуха $\phi_e = 18\%$ или $+70^{\circ}\text{C}$ при $\phi_e = 23\%$.

Этим условиям по I-d диаграмме влажного воздуха соответствует абсолютное содержание влаги 33 – 38 г/кг а.с.в., которое может приобрести воздух при испарении влаги из материала при его подсушке.

При достаточно большом времени контакта материала и сушильного воздуха на второй стадии этот потенциал влагоемкости воздуха определяет производительность по испаренной влаге.

Наиболее экономичны режимы при $t_{\text{вых.2.}}=70^{\circ}\text{C}$, коэффициенте достижимости равновесной влажности стружки $k_p = W_{\text{к.м.}}/ W_{\text{р.м.}}$, значение которого можно принять равным $k_p=1,0$ при достаточно большом времени пребывания в барабанной сушилке.

Производительность увеличится на 14 – 25% при удельном снижении затрат тепла на 12-48 %.

Непрерывным условием наиболее полного использования влагоемкости воздуха в качестве потенциала подсушки продукта является обеспечение достаточно большого времени пребывания в аппарате второй стадии сушки.

Следует отметить, что переход на двухстадийную сушку с применением воздуха, предварительно осушенного охлаждением, с последующим его подогревом позволяет также снизить пожароопасность процесса, поскольку сухой продукт может быть получен при пониженных конечных температурах сушильного воздуха.

Снижение пожароопасности позволяет осуществлять процесс при значительно более высоких начальных температурах сушильного газа на первой стадии сушки.

Обозначения

а.с.в. – абсолютно сухой воздух; $B_{\text{кн.км}}$ – конечная влажность продукта на выходе из камеры распылительной сушки (первая стадия), %; B_1 – влажность продукта после первой стадии сушки, %; B_2^l – влажность продукта в конце второй стадии сушки, %; $B_{\text{кн.у}}$ – конечная влажность продукта на выходе аппарата второй стадии сушки, %; $c_{с.в}$ – удельная теплоемкость сушильного воздуха, Дж/кг град; c_{np} – удельная теплоемкость продукта, Дж/кг град; $G_{св.2}$ – расход сушильного воздуха второй стадии; G_{u2} – количество влаги, испарившейся в процессе второй стадии сушки, кг/ч; G_m – расход материала, кг/ч; $q_{исп}$ – скрытая теплота испарения воды, Дж/кг; $t_{\text{вых.}}$ – температура сушильного воздуха на выходе из камеры, $^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{вх.2}}$ и $t_{\text{вых.}}$ – начальная и конечная температуры на входе и выходе сушильной камеры, $^{\circ}\text{C}$.

Литература

1. Липатов Н.Н., Харитонов В.Д. Сухое молоко. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. – 263 с.
2. Паращук С.В., Казанский М.М., Королев А.Н., Коваленко М.С. Технология молока и молочных продуктов. – М.: Пищепромиздат, 1949. – 630 с.
3. Серговский П.С. Гидротермическая обработка и консервирование древесины [Текст] / П.С. Серговский.– М.: Лесн. пром-сть, 1968.– 448с.
5. Шморгун В.В., Кузьменко В.В. Комплексный теплотехнологический аудит линий распылительной сушки. // Доклад. 1-ая международная научно-практическая конференция «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов)». (М., 28-31 мая 2002г.). – Т.4. – С. 159-163.
6. Курьлев Е.С., Герасимов Н.А. Холодильные установки. М., Л.: Машгиз, 1961. – 380с.
7. Отлев И.А.: справочник по производству древесностружечных плит [Текст]/ И.А. Отлев, Ц.Б. Штейнберг [и др.]. – М. : Лесн. пром-сть, 1990.– 384 с.
8. Бахмачевский Б.И. Теплотехника [Текст]/ Б.И. Бахмачевский [и др.].– М.: Металлургиздат, 1963. – 608 с.