

УДК 664.8.72

ДАБИЖА Н.А.

Институт технической теплофизики НАН Украины

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ТЕПЛОНАСОСНОЙ СУШКИ КОЛЛОИДНЫХ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

На підставі експериментальних даних вивчено параметри функціонування теплонасосної сушарки. Показано, що використання теплонасосних установок в процесах сушіння дозволяє реалізувати контрольований і легко керований процес, оптимізований по енерговитратам та якості готового продукту.

На основании экспериментальных данных изучены параметры функционирования теплонасосной сушилки. Показано, что использование теплонасосных установок в процессах сушки позволяет реализовывать контролируемый и легко управляемый процесс, оптимизированный по энергозатратам и качеству готового продукта.

On the basis of the experimental data the operational parameters of the heat pump dryer are studied. It is shown that the use of the heat pump in drying processes allows to realize the controllable and easily operated process optimized on energy consumption and product quality.

d – влагосодержание воздуха;

H – энтальпия;

Q – энергозатраты;

t – температура;

W – влагосодержание сушильного агента;

φ – влажность сушильного агента;

τ – время.

В технологии конвективной сушки интенсификация процесса осуществляется главным образом путем повышения температуры сушильного агента. Специфической особенностью растительных материалов (таких как фрукты, травы, злаки) и биологических препаратов является термочувствительность, которая ограничивает возможность применения повышенных температур нагрева материала в процессе сушки и вызывает необходимость тщательного выбора оптимального режима сушки.

Для этих материалов определение предела термостойкости и максимально допустимой температуры нагрева материала обуславливается их биологической природой и химическим составом и связано, в первую очередь, с получением продуктов высокого качества. Так, например, для фруктов при сушке в плотном слое максимально допустимая температура нагрева принимается равной 50...55 °С, а для пекарских дрожжей максимально допустимая температура дрожжевой клетки – 30...35 °С. Кроме того, для сохранения технологических свойств при сушке полезных микроорганизмов и биологических препаратов

существует ограничение по величине конечного влагосодержания, т.е. не допускается его понижение ниже определенного. Выполнение этих требований может быть достигнуто путем приготовления сушильного агента строго определенной температуры и влажности, которые соответствуют установленному конечному влагосодержанию материала.

При интенсивной сушке фруктов происходит вынос водорастворимых веществ (сахаров, кислот) на поверхность. Вода испаряется, концентрация раствора поверхностного слоя увеличивается. Это приводит к явлениям, которые влияют на скорость процесса и качество продукта. Так внутри высушиваемого материала возникает градиент концентрации, причем наибольшая концентрация растворенных веществ создается в поверхностном слое. При увеличении концентрации сахаров и кислот, участвующих в реакции ферментативного потемнения, ускоряются процессы образования темноокрашенных веществ. Кроме того, на поверхности образуется липкий слой, который, затвердевая, превращается в непроницаемую для влаги корочку, в результате чего суш-

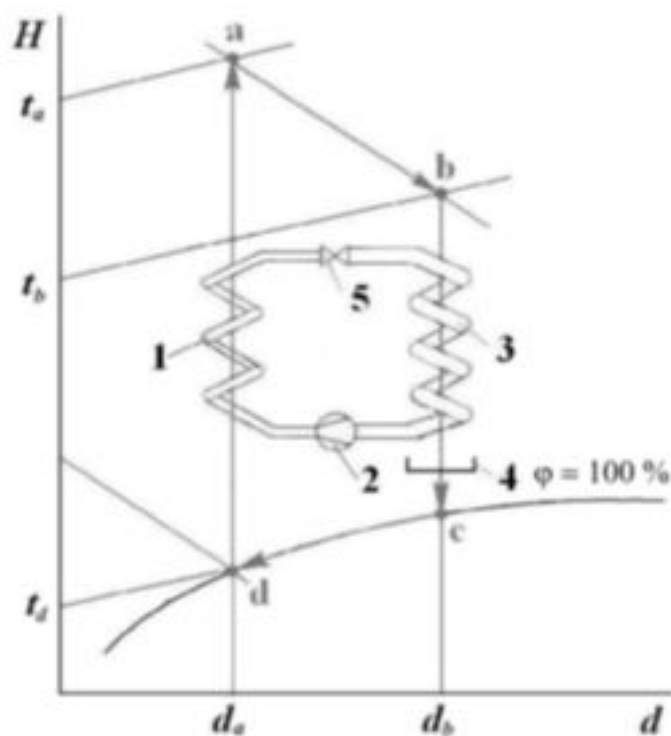


Рис. 1. Процесс теплонасосной сушки в $H-d$ диаграмме:

**1 – конденсатор; 2 – компрессор; 3 – испаритель;
4 – сборник конденсата; 5 – дроссель.**

ка замедляется. Избежать выноса водорастворимых веществ можно, создав условия, благоприятные для испарения жидкости внутри материала, для чего необходимо уменьшить диффузию влаги в материале и одновременно увеличить интенсивность испарения с поверхности. Это достигается ведением процесса при низкой температуре и малом влагосодержании сушильного агента.

Интенсификация, а также управление процессом низкотемпературной сушки возможны только с помощью регулирования влагосодержания сушильного агента. В традиционных конвективных сушилках организовать контролируемый процесс невозможно, так как в установках такого типа параметры сушильного агента зависят от тепловлажностного состояния окружающего воздуха, которое изменяется в зависимости от погодных условий. Данный недостаток может быть устранен за счет применения теплонасосной конвективной сушильной установки, в которой может поддерживаться заданное влагосодержание воздуха.

На рис. 1 представлен процесс теплонасосной сушки в $H-d$ диаграмме. Цикл теплонасосной сушки осуществляется следующим образом: нагретый и осушенный воздух (состояние a) поступает в сушильную камеру, где, проходя над слоем высушиваемого материала, адиабатически увлажняется и охлаждается (состояние b). Увлажненный воздух осушается в испарителе теплового насоса за счет охлаждения (процесс $b-c-d$) до заданной температуры точки росы (состояние d), после чего холодный осушенный воздух нагревается в конденсаторе теплового насоса (процесс $d-a$) и возвращается в сушильную камеру.

Благодаря тому, что в тепловом насосе имеется возможность утилизировать теплоту конденсации влаги, уходящей с воздухом, и вернуть ее в процесс сушки на более высоком температурном уровне, сушилка с тепловым насосом является энергетически эффективным устройством. При исследовании процесса теплонасосной сушки для оценки энергетической эффективности принято использовать следующие характеристики [1]:

- количество влаги, удаляемое в единицу времени – moisture extraction rate (MER). Эта характеристика является производительностью сушилки по испаренной влаге;

- коэффициент преобразования – coefficient of performance (COP). В процессах сушки и удаления влаги величина коэффициента преобразования не может служить показателем эффективности теплонасосной сушилки, т.к. тепловой насос, охлаждающий и нагревающий потоки воздуха при низких разностях температур, может иметь высокий коэффициент преобразования и без снижения влагосодержания сушильного агента;

- количество сконденсированной влаги, приходящееся на единицу подведенной энергии – specific moisture extraction rate (SMER). SMER является единственной характеристикой, связывающей сушилку и теплонасосную систему и отражающей степень эффективности использования энергии.

Хотя теплонасосные сушилки применяются в промышленности с 1960-х годов (в основном для сушки пиломатериалов), исследований, проведенных для полного понимания путей повышения эффективности функционирования тепло-

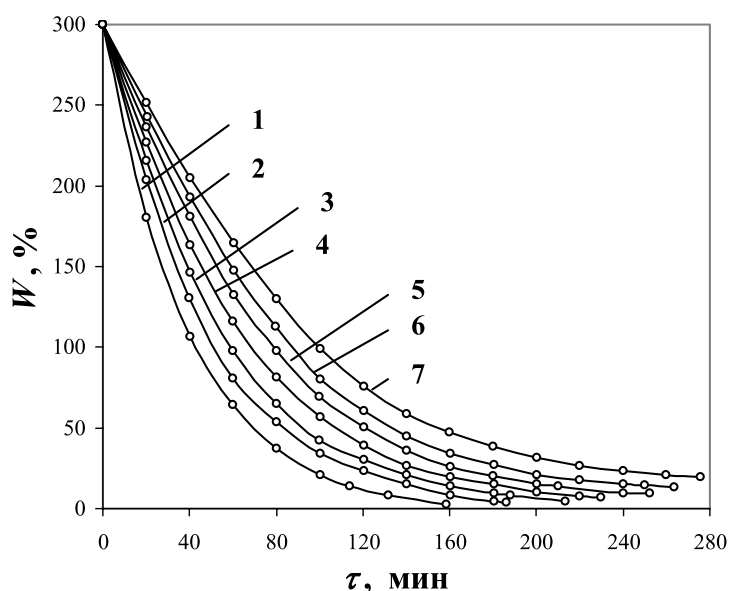


Рис. 2. Влияние влагосодержания сушительного агента на процесс сушки пекарских дрожжей при температуре $t = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$: 1 – $\varphi = 10\%$; 2 – 20% ; 3 – 30% ; 4 – 40% ; 5 – 50% ; 6 – 60% ; 7 – 70% .

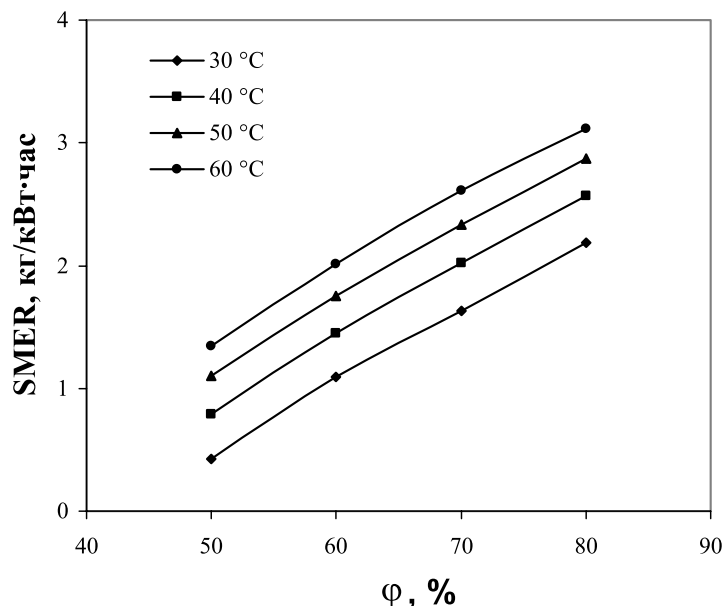


Рис. 3. Зависимость SMER в теплонасосной сушилке от тепловлажностного состояния сушительного агента.

насосной сушилки, опубликовано чрезвычайно мало. Исследования показывают, что максимальные величины COP, MER и SMER не обязательно имеют место при одних и тех же рабочих условиях. Поскольку эксплуатационные характеристики теплонасосной сушилки определяются тепло- и массообменом, который происходит при взаимодействии двух рабочих тел (воздуха и хладагента), любое изменение в одном из этих тел неизбежно будет влиять на всю систему. Так, при конвективной сушке интенсивность удаления влаги из материала зависит от вида продукта, температуры и влагосодержания теплоносителя и изменяется в процессе сушки. Влияние тепловлажностных параметров уходящего из сушилки воздуха на условия работы теплового насоса исследовано в работе [2].

На основании экспериментальных данных по кинетике сушки пекарских дрожжей [3] при различных влажностях сушительного агента (рис. 2) изучены параметры функционирования теплонасосной сушилки. Уменьшение влажности сушительного агента способствует увеличению движущей силы массообмена, что приводит к значительному сокращению продолжительности процесса сушки. Однако, при поддержании низ-

кого влагосодержания воздуха с помощью теплового насоса уменьшается величина SMER (рис. 3). Это происходит, потому что при низком влагосодержании часть холодопроизводительности теплонасосного агрегата используется непроизводительно на охлаждение массы сухого воздуха.

Таким образом, с точки зрения энергозатрат для эффективной работы теплового насоса выгодны режимы сушки с высокой влажностью сушительного агента, так как удельные затраты энергии на охлаждение и удаление влаги из воздуха при таких условиях меньше. Но при этом увеличивается время сушки. Следовало бы предположить, что в случае низких удельных затрат при большей длительности процесса будут иметь место более высокие общие энергозатраты на весь процесс сушки, нежели при высоких энергозатратах и меньшей длительности.

Для режимов сушки дрожжей при разных влажностях (от 10% до 70%) и температурах (30 и $35\text{ }^{\circ}\text{C}$) сушительного агента удельные энергозатраты на охлаждение и осушение воздуха в испарителе теплового насоса были определены с учетом характеристик стандартного поршневого компрессора с хладагентом R-22 [4]. По величинам удельных энергозатрат рассчитан расход энергии на весь процесс сушки, окончанием ко-

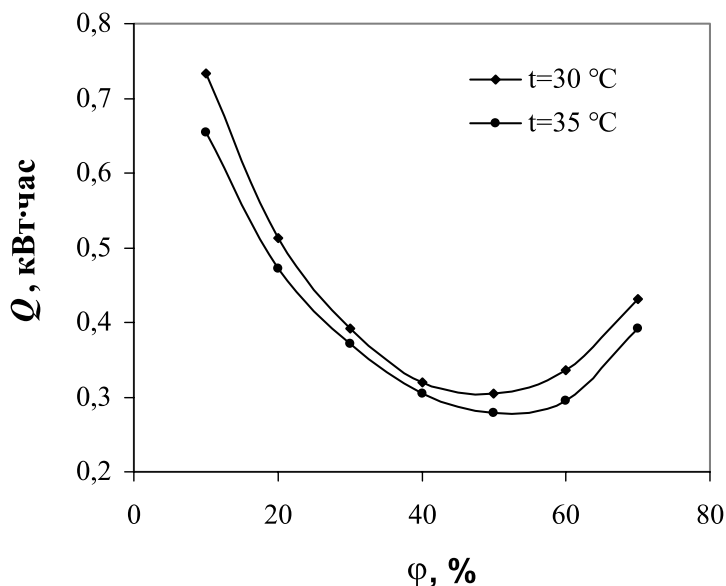


Рис. 4. Зависимость энергозатрат на сушку от влажности сушительного агента.

того для каждого режима являлся момент достижения материалом влагосодержания, равного 14 % (рис. 4).

Анализ полученных результатов показал, что существует оптимальный по влагосодержанию сушительного агента режим, обеспечивающий минимальные затраты энергии на весь процесс сушки. При сушке дрожжей минимальные энергозатраты наблюдались при поддержании влажности сушительного агента на уровне 50 %. Понижение влажности до 10 % сокращает время сушки в 1,8 раза, однако, вследствие увеличения величины SMER, общие энергозатраты на сушку возрастают в 2,3 раза. При повышении влажности воздуха до 70 % продолжительность процесса увеличивается в 1,6 раза, а энергозатраты – в 1,4 раза.

Согласно экспериментальным исследованиям [3] в случае пересушки дрожжей до остаточной влажности 6...7 % они резко ухудшают свою подъемную силу. Поэтому оптимальное конечное влагосодержание дрожжей устанавливается на уровне 8 %, которому, исходя из условий гигротермического равновесия [3], при температурах 30 и 35 °C соответствуют влажности воздуха 42,5 и 47,0 %, соответственно. В случае традици-

онной конвективной сушки тепловлажностное состояние атмосферного воздуха, поступающего в сушилку, может изменяться в широких пределах (от $d = 5$ до $d = 20$ г/кг с.в.), что приводит к колебанию влажности сушительного агента при установленных температурах от 18 % до 70 %. Создание с помощью теплового насоса строго контролируемых условий проведения процесса устраняет влияние окружающей среды на влажность сушительного агента, что позволяет получать продукт стабильного качества при минимальных энергозатратах.

В этом исследовании показано, что возросший интерес к использованию теплонасосных установок в процессах сушки продиктован не только их энергетической эффективностью, но и, с учетом использования современного ПИД-регулирования, возможностью реализовывать контролируемый и легко управляемый процесс, оптимизированный по энергозатратам и качеству готового продукта.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Prasertsan S., Saen-saby P.* Heat pump dryers: research and development needs and opportunities // *Drying technology*. – 1998. – Vol. 16, № 1&2. – P. 251–270.
2. *Снежкин Ю.Ф., Чалаев Д.М., Шаврин В.С., Дабижка Н.А. Гатиллов К.А.* Эффективность применения тепловых насосов в процессах конвективной сушки // *Наукові праці ОНАХТ*. – 2007. – Вип.30. – Т.1. – С. 185–189.
3. *Смольский Б.М.* Внешний тепло- и массообмен в процессе конвективной сушки. – Минск: Издательство БГУ, 1957. – 204 с.
4. *Чалаев Д.М., Шаврин В.С., Хавин А.А., Дабижка Н.А.* Оптимизация режимов работы теплонасосной конденсационной сушительной установки // *Труды 1-й Междунар. научно – практич. конф. “Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов)”*. – Москва. – 2002. – Том 4. – С. 234–236.

Получено 31.07.2007 г.