

При минусовых температурах давление над кристаллогидратами несколько ниже, чем над водой (льдом), но, благодаря развитой поверхности гранулированной структуры, эти материалы могут обеспечить достаточно высокую интенсивность массообмена даже при низком давлении паров воды. Кроме того, замена процесса конденсации процессом сорбции способствует увеличению величины теплового эффекта и, соответственно, повышению коэффициента преобразования теплового насоса.

#### Выводы

Применение в качестве рабочих тел адсорбционных тепловых насосов оксидов и солей щелочных металлов, сорбционное действие которых основано на эффекте обратимых термохимических реакций, позволит существенно повысить энергетические показатели адсорбционных агрегатов.

В адсорбционных тепловых насосах, работающих с потреблением электрической энергии, перспективно использование сорбционных материалов на основе высокотемпературных химических реакций с большой температурной депрессией.

#### Литература

1. А.с. 1477999 СССР, МКИЗ F 25 В 17/00. Способ работы сорбционной холодильной установки периодического действия / Д.М. Чалаев и др. – № 4039177/23–06; заявл. 18.03.86; опубл. 07.05.89, Бюл. №17.
2. Пат. 2162009 Российская Федерация, МКИЗ В 01 J 20/02, В 01 J 20/16. Сорбент для адсорбционных холодильных установок / Д.М. Чалаев и др. – № 98119672/12; заявл. 30.10.1998; опубл. 20.01.2001.
3. Чалаев Д.М. Дослідження адсорбційного теплового насоса, що працює із застосуванням оборотних термохімічних реакцій / Д.М. Чалаев, В.С. Шаврин, Н.О. Дабіжа, Т.В. Корінчевська, Л.С. Осадча // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій. – 2010. – Вип. 37. – С. 255-261.
4. M. Tokarev. New composite sorbent CaCl<sub>2</sub> in mesopores for sorption cooling/heating / Mikhail Tokarev, Larissa Gordeeva, Vyacheslav Romannikov, Ivan Glaznev, Yuri Aristov // Int. J. Therm. Sci. – 2002. – V. 41. – P. 470–474
5. Landolt-Börnstein Physikalisch-Chemische Tabellen. – Berlin: Verlag von Julius Springer, 1912. – 1313 с. УДК 664.8.047

## ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ СУШКИ ТЕРМОЛАБИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ

Дабіжа Н.А.

Институт технической теплофизики НАН Украины, г. Киев

*Обоснована целесообразность регулирования влагосодержания сушильного агента с помощью теплового насоса при низкотемпературной сушке термолабильных материалов до низкого остаточного влагосодержания.*

*The expedience of drying agent humidity regulation by a heat pump in the low temperature drying of thermo labile materials to low residue moisture content is founded.*

**Ключевые слова:** термолабильные материалы, сушка, изотермы адсорбции, кинетика сушки, тепловой насос, удельные энергозатраты

Растущие потребности в новых высококачественных продуктах и энергосберегающих процессах, а также проблемы защиты окружающей среды стимулируют исследования и разработки в области технологии сушки.

Согласно статистическим данным [1] на проведение процессов термического обезвоживания расходуется от 10 до 25 % энергии, потребляемой в промышленном секторе промышленно развитых стран. При этом на процессы обезвоживания в пищевой и плодоперерабатывающей промышленности приходится от 12 до 27 % общих затрат энергии на сушку. Таким образом, учитывая высокую стоимость энергоресурсов, при исследовании процессов сушки и проектировании сушильного оборудования расход энергии является определяющим фактором.

В последнее время в связи с подходом, ориентированным на потребительский рынок, предъявляются повышенные требования к качеству высушенного конечного продукта, особенно к такому традиционно сельскохозяйственному сырью как фрукты, травы, семена и т.д. Основным свойством материалов растительного происхождения как объектов сушки является термолабильность, обусловленная их хими-

ческим составом и биологической природой. Качество таких материалов в результате сушки будет тем выше, чем ниже температурный уровень процесса обезвоживания и меньше его длительность.

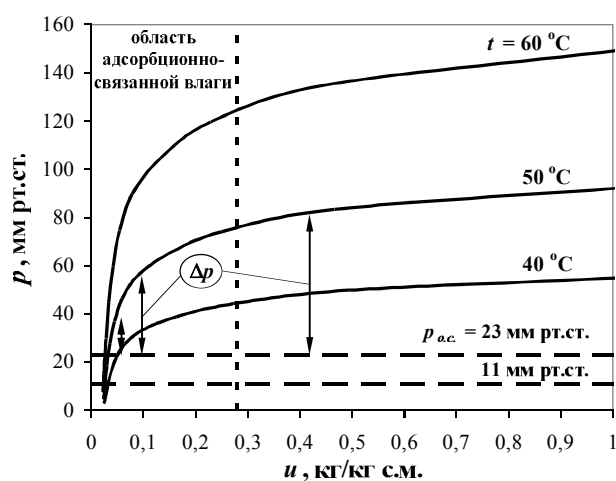
Одним из перспективных направлений в решении задачи снижения энергопотребления и интенсификации процесса тепломассообмена при конвективной сушке является применение тепловых насосов. Способность тепловых насосов снижать влагосодержание сушильного агента делает их незаменимыми для интенсификации влагоудаления, особенно при конвективной низкотемпературной сушке термолабильных материалов до низкого остаточного влагосодержания [2].

В ИТТФ НАН Украины разработана энергосберегающая технология получения пищевых порошков из натурального растительного сырья (фруктов, ягод, овощей и их выжимок). Суть технологии заключается в том, что сырье для достижения хрупкого состояния обезвоживают до низкого конечного влагосодержания (5–6 %), охлаждают, измельчают и разделяют на фракции. Для получения высококачественного продукта температура материала при обезвоживании не должна превышать 55 °С. Потому сушка осуществляется по многоступенчатому режиму с поэтапным снижением температуры сушильного агента от 100 до 55–60 °С в зоне досушки.

Анализ экспериментальных данных по конвективной сушке фруктов показал, что при низкотемпературном досушивании от равновесного с окружающей средой (18–22%) до низкого остаточного влагосодержания значительное снижение скорости сушки приводит к увеличению длительности процесса в 1,25–1,5 раза. При этом зависимость интенсивности процесса от влагосодержания сушильного агента определяется влажностью воздуха окружающей среды.

Для высоковлажных материалов процесс сушки протекает во внешнедиффузионном кинетическом режиме (первый период сушки), смешаннодиффузионном и внутридиффузионном (процесс полностью контролируется внутридиффузионным сопротивлением). Это имеет место во время сушки растительных материалов от высокого начального влагосодержания до низкого остаточного влагосодержания при удалении свободной и связанной влаги. Для интенсификации внутреннего массопереноса необходимо на последнем этапе изменить условия проведения процесса сушки. В связи с этим целью исследований являлось обоснование и разработка энергоэффективных режимов сушки термолабильных материалов до низкого остаточного влагосодержания.

В случае протекания низкотемпературного, «мягкого» процесса сушки справедлива гипотеза о локальном термодинамическом равновесии.

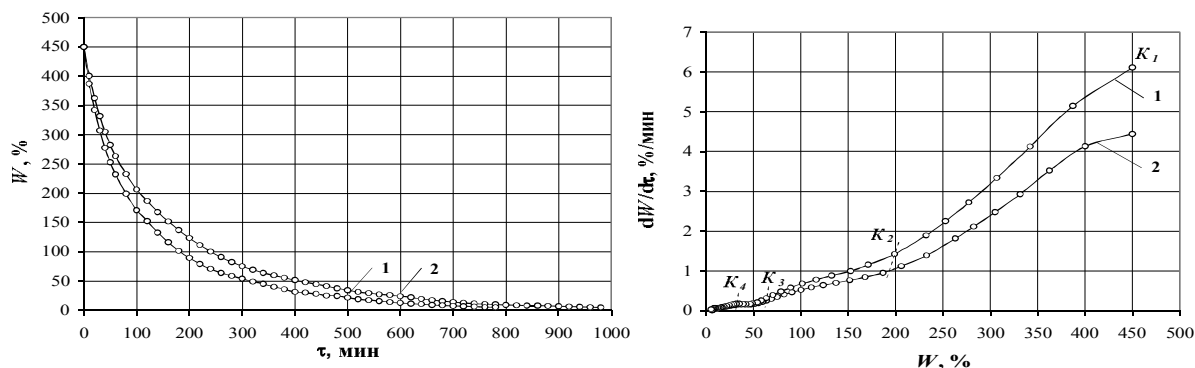


**Рис. 1** – Изотермы десорбции паров воды папеными тканями ананаса

Поскольку время релаксации значительно меньше времени протекания макропроцесса сушки, то в каждый малый промежуток времени на границе раздела фаз устанавливается равновесие. Условия локального равновесия выясняются из изотерм десорбции, что позволяет определить парциальное давление паров воды над поверхностью материала  $p_m$  и, следовательно, массообменный напор  $\Delta p$ . Из экспериментальных данных по сорбционным свойствам фруктов (рис. 1) установлено, что в гигроскопической области по мере уменьшения влагосодержания материала и при снижении его температуры давление паров воды на поверхности уменьшается и при низких остаточных влагосодержаниях становится соизмеримым с давлением в окружающей паровоздушной среде  $p_{o.c.}$ . Вследствие этого падает массообменный напор процесса  $\Delta p$ , что приводит к существенному уменьшению скорости сушки. Как видно, при низкотемпературной досушке для создания необходимого массообменного напора необходимо снижать влагосодержание сушильного агента.

При проведении экспериментов по сушке кубиков ананаса в единичном слое при температуре 50 °С (рис. 2) выявлено, что при снижении влагосодержания сушильного агента с 20 г/кг с.в. до 10 г/кг с.в. скорость сушки в начальный момент увеличивается в 1,38 раза, в результате чего время сушки до конечного влагосодержания 5 % уменьшается на 20 %. При этом средняя скорость сушки адсорбционно-связанной влаги увеличивается в 1,24 раза, а время сушки от критической точки  $K_c$  уменьшается на 100 мин. Таким

образом, использование принудительного снижения парциального давления водяного пара в сушильном агенте позволяет сократить период досушки на 25 %.



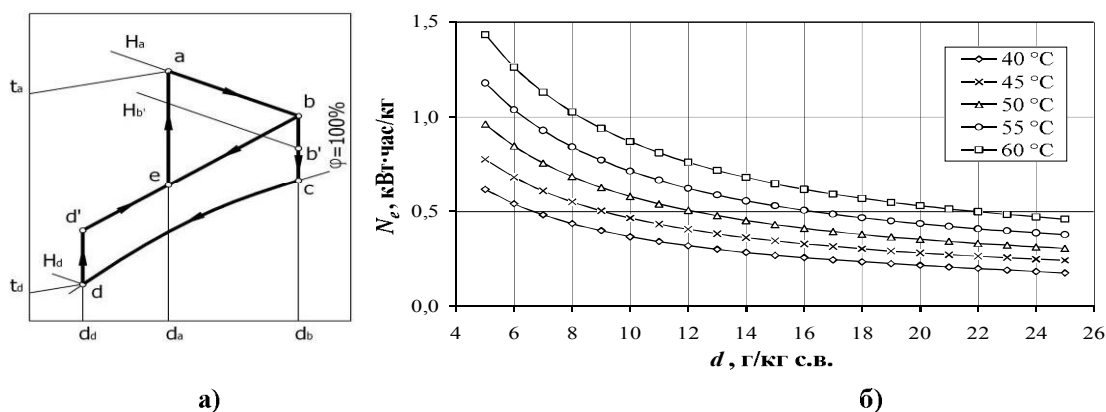
$$1 - d = 10 \text{ г/кг с.в.}; 2 - d = 20 \text{ г/кг с.в.}; t = 50 \text{ }^\circ\text{C}; v = 2,5 \text{ м/с}$$

**Рис. 2 – Влияние влагосодержания сушильного агента на процесс сушки кубиков ананаса в единичном слое**

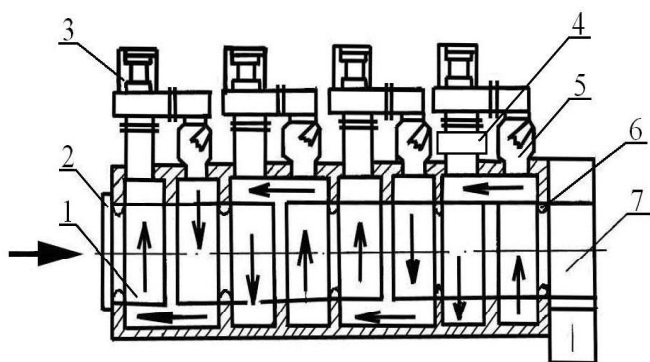
При низкотемпературной сушке термочувствительных материалов до низкого остаточного влагосодержания для обеспечения необходимого массообменного напора посредством регулирования влагосодержания сушильного агента целесообразно использовать парокомпрессионный тепловой насос. К тому же создание с помощью теплового насоса контролируемых условий проведения процесса устраняет влияние нерегулируемого фактора – параметров внешнего воздуха – на влажность сушильного агента. А организация движения теплоносителя в замкнутом циркуляционном контуре сокращает потери теплоты с отработанным сушильным агентом.

Анализ процесса низкотемпературного обезвоживания с использованием теплонасосного цикла показал, что в процессе теплонасосной сушки величина текущих энергозатрат в значительной мере зависит от влагосодержания сушильного агента и температурного режима его осушения: чем выше влагосодержание и температура обезвоживания, тем меньшие удельные энергозатраты на удаление из него влаги.

Для достижения наибольшей эффективности работы теплового насоса удаление влаги из воздуха в цикле теплонасосной сушки необходимо осуществлять с осушением части теплоносителя и рекуперацией холода [3] (рис. 3, а). Цикл теплонасосной сушки при этом осуществляется следующим образом: прошедший над высушиваемым продуктом теплоноситель (процесс  $a-b$ ) разделяется на два потока, один из которых подвергается глубокому охлаждению (процесс  $b-c-d$ ), затем холодный осушенный поток вступает в теплообмен с потоком, поступающим на охлаждение (процессы  $d-d'$  и  $b-b'$ ), и после смешения с оставшейся частью влажного теплоносителя (процессы  $d'-e$  и  $b-e$ ) в состоянии  $e$  подается на нагрев в конденсатор теплового насоса (процесс  $e-a$ ).



**Рис. 3 –  $H-d$  діаграма процесу теплонасосної сушки (а) і залежність енергозатрат на удаление влаги от параметров осушаемого воздуха (б)**



1 – тележка; 2 – ворота сушилки;  
3 – вентилятор сушилки; 4 – тепловой насос  
5 – теплогенератор;  
6 – уплотнения; 7 – зона охлаждения.

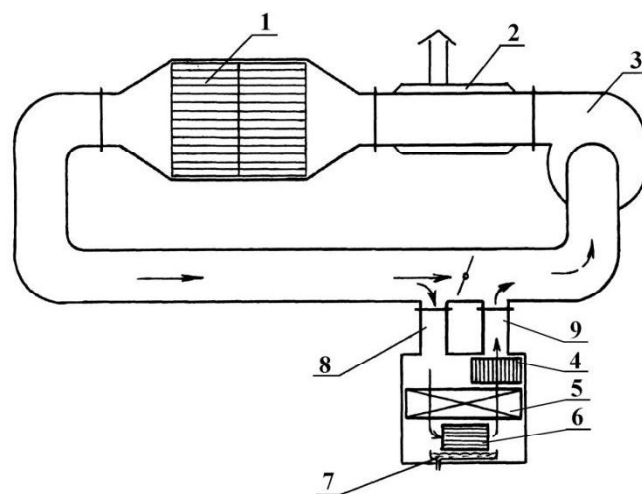
**Рис. 4 – Схема четырехзонной туннельной сушильной установки**

На основе проведенных расчетов энергозатрат теплового насоса в зависимости от режима осушения теплоносителя установлено, что при рациональных режимах работы теплового насоса может быть достигнуто снижение удельных энергозатрат на удаление влаги в 1,3–1,5 разы. Энергозатраты теплового насоса на осушение с рекуперацией холода при средней эффективности рекуператора  $E = 0,4$  приведены на рис. 3, б.

Для осуществления многоступенчатой сушки термочувствительных материалов до низкого остаточного влагосодержания используется четырехзонная сушильная установка (рис. 4). Такая конструкция установки позволяет проводить сушку поэтапно, создавая в каждой зоне оптимальный температурный режим. Первые три зоны работают по традиционной схеме с выбросом влажного воздуха и подпиткой свежего с поэтапным

снижением температуры теплоносителя от 100 до 70 °С. Четвертая зона имеет замкнутый контур циркуляции с теплонасосной системой осушения воздуха. В зоне поддерживается температура около 55–60 °С и заданное влагосодержание сушильного агента, которое ниже чем в окружающей среде.

Схема сушильной установки с принудительным осушением теплоносителя представлена на рис. 5. Влажный отработанный воздух после сушильной камеры через патрубок 8 проходит рекуперативный теплообменник 5 и поступает в испаритель теплового насоса 6, где за счет охлаждения воздуха ниже точки росы из него выпадает влага. Холодный осушенный воздух через рекуперативный теплообменник 5 поступает в конденсатор теплового насоса 4, нагревается в нем и подается через патрубок 9 вентилятор 3, теплогенератор 2 в сушильную камеру 1.



1 – сушильная камера; 2 – теплогенератор; 3 – вентилятор; 4 – конденсатор теплонасосного агрегата; 5 – регенеративный теплообменник; 6 – испаритель теплонасосного агрегата; 7 – сборник конденсата; 8, 9 – патрубок.

**Рис. 5 – Конвективная сушильная установка с принудительным осушением теплоносителя**

Рекуперативный теплообменник 5 позволяет снизить расход энергии в тепловом насосе за счет частичного охлаждения влажного теплого воздуха на входе в испаритель в результате теплообмена с холодным воздухом, выходящим из испарителя.

### Выводы

Результаты экспериментальных исследований показали, что при низкотемпературной конвективной сушке влагосодержание сушильного агента существенно влияет на скорость процесса. Использование принудительного снижения парциального давления водяного пара в сушильном агенте позволяет на 25 % сократить время сушки.

Для интенсификации процесса обезвоживания термолабильных материалов при низких температурах посредством регулирования влагосодержания сушильного агента целесообразно использовать парокompрессионный тепловой насос. К тому же по сравнению с традиционными конвективными сушилками технология сушки с тепловым насосом обеспечивает снижение удельных энергозатрат 1,3–1,5 раза и является экологически чистой.

### Литература

1. *Advances in Food Dehydration* / [Edited by Cristina Ratti]. – CRC Press, 2009.
2. Снежкін Ю.Ф. Використання теплових насосів в процесах сушіння / Ю.Ф. Снежкін, Д.М. Чалаєв, В.С. Шаврин, Р.О. Шапар, О.О. Хавін, Н.О. Дабіжа // Промышленная теплотехника. – 2006. – Т. 28, № 2. – С. 106-110.
3. Снежкин Ю.Ф. Эффективность применения тепловых насосов в процессах конвективной сушки / Ю.Ф. Снежкин, Д.М. Чалаев, В.С. Шаврин, Н.А. Дабижа, К.А. Гатиллов // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій. – 2007. – Вип.30. – Т.1. – С.185–189

УДК 663.938 – 027.332:620.91

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОФЕЙНОГО ШЛАМА

Перетяка С.Н. канд. техн. наук, доцент  
Одесская национальная академия пищевых технологий

*В статье рассмотрены перспективы использования пеллет. Показаны тенденции производства пеллет в развитых странах и в Украине. Представлены результаты исследования энергетических характеристик кофейного шлама: температура сгорания, остаток после сгорания, теплота сгорания и др. Рассмотрены достоинства и недостатки пеллет из кофейного шлама.*

*The perspectives of using the pellets are considered in the paper. Tendencies of pellet production in developed countries and Ukraine has been shown. The results of coffee sludge energy characteristics (burnout temperature, residue after burning, combustion heat etc.) research has been shown. Advantages and disadvantages of coffee sludge pellets has been considered.*

**Ключевые слова:** биотопливо, пеллеты, теплота сгорания.

В мире уже давно существует стойкий интерес к использованию биотоплива. В США и Европейском Союзе применение биотоплива поддерживается на государственном уровне. Так расходы федерального бюджета США на разработку альтернативных видов энергии составляют 42% от общего объема расходов на энергетику. Существуют четыре основных направления производства биотоплива: биоэтанол, биодизель, биогаз и пеллеты. Для получения двух первых видов (биоэтанол и биодизель) необходимо использовать сельскохозяйственные земли, что приведет к дефициту продовольствия и дальнейшей деградации грунта. Таким образом, попытка решения энергетической проблемы приведет к появлению новых проблем, а именно социальной (нехватка продовольствия) и экологической (земля истощается посевами рапса). Биогаз и пеллеты получают в результате переработки отходов, что решает не только проблему с обеспечением энергоносителями, но экологическую (утилизация отходов), кроме того, не влияет на рынок продовольствия [1-3].

С экономической точки зрения, более привлекательным является производство пеллет:

- незначительные капитальные затраты;
- быстрая прибыль за счет сбережения традиционных энергоносителей;
- возможность использования пепла в виде удобрений;
- уменьшаются расходы на транспортировку и утилизацию отходов;
- не оказывается вредное воздействие на окружающую среду.