

## ФИЛЬТРАЦИОННАЯ СУШКА ПРИ ПОВЫШЕННОМ ДАВЛЕНИИ

Потапов В.А., д-р техн. наук, профессор,  
Якушенко Е.Н., канд. техн. наук, доцент,  
Гриценко О.Ю., инженер

Харьковский государственный университет питания и торговли, г. Харьков

*Описан новый метод фильтрационной сушки в тепло-массообменном модуле под действием повышенного давления. Проведено сравнение удельных энергозатрат конвективной сушки и сушки в тепло-массообменном модуле под действием повышенного давления. Показано, что предложенный способ сушки приводит к снижению удельных энергозатрат на процесс сушки в 1,5...2 раза.*

*A new method of filtration drying in the heat-mass exchange module under the elevated pressure is presented. A comparison of specific energy for convective drying and drying in the heat-mass exchange module under elevated pressure were done. It is shown that the proposed method of drying leads to decrease in specific energy consumption for the drying process is 1.5 ... 2 times.*

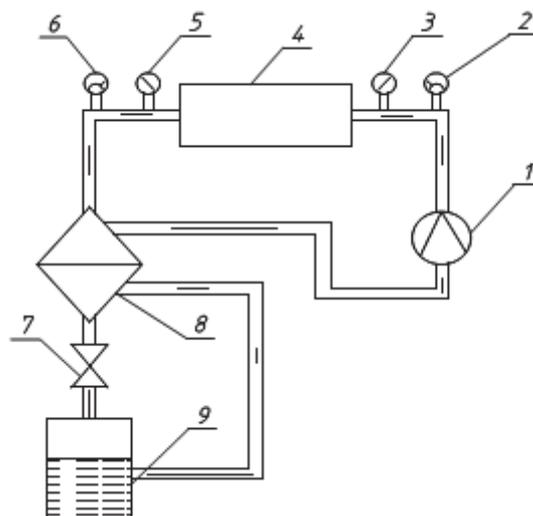
Ключевые слова: сушка; тепло-массообменный модуль; повышенное давление; энергоэффективность.

Увеличение объемов производства в пищевой и перерабатывающей промышленности на фоне продолжающегося удорожания энергоресурсов вызывает потребность в поиске новых подходов при разработке энерго- и ресурсосберегающих технологий и оборудования, а также повышения эффективности работы существующего оборудования. Наиболее энергоемкими являются тепло- и массообменные процессы, и в первую очередь процесс сушки, как универсальный и безопасный способ консервирования. На процессы сушки тратится 25 % потребления энергии промышленно развитых стран, а в пищевой и перерабатывающей промышленности до 30 % [1]. Анализ современных технологий сушки показывает, что наибольшее применение в пищевой промышленности получил конвективный метод сушки. В то же время удельные энергозатраты современных конвективных сушилок составляют 4000 ... 9000 кДж / кг испаренной влаги, что в 2 ... 4 раза больше теоретического минимума на испарение 1 кг воды. Одной из причин является то, что 20 ... 30 % потеря энергии приходится на потери с сушильным агентом, который выбрасывается в окружающую среду при повышенной температуре, что приводит также к ухудшению экологической ситуации. Кроме того нужно учитывать, что в рамках концепции устойчивого развития цивилизации разработка новых технологий сушки должна решаться не только с учетом снижения потребления энергоресурсов, но и улучшения экологических показателей оборудования и обеспечения высокого качества сушеного продукта.

Основными современными методами повышения энергоэффективности и экологичности процессов сушки являются: утилизация тепла уходящего сушильного агента, принудительная осушка сушильного агента с целью интенсификации массообмена, рециркуляция сушильного агента, автоматическое регулирование режимов обезвоживания.

В Харьковском государственном университете питания и торговли активно развивается научное направление в теории и технике сушки, основанное на концепции адресной доставки энергии к высушиваемому материалу: это сушка смешанным теплоподводом (СТП-сушка) [2], вакуумно-микроволновая сушка [3], фильтрационная сушка в тепло-массообменном модуле (ТМОМ) при повышенном давлении [4]. Согласно последнему способу, мелкодисперсный или зернистый влажный материал размещается в герметичном ТМОМ, в котором создается избыточное давление с помощью внешнего компрессора (рис.1). При этом в результате сжатия воздуха в компрессоре он нагревается до требуемой температуры. При фильтрации воздуха через пористый влажный материал он полностью насыщается и конденсируется, а затем под действием избыточного давления парожидкостная смесь выводится из ТМОМ. При этом сушильный агент полностью использует свой сушильный потенциал, охлаждаясь до температуры окружающей среды. После выхода из ТМОМ насыщенный влажный воздух охлаждается в теплообменнике и дросселируется. Конденсат поступает во влагоотделитель, а осушенный воздух вновь нагнетается компрессором в ТМОМ. В результате такой способа сушки отсутствуют потери теплоты с уходящим сушильным агентом, которые, как указано, выше являются основной причиной низкого КПД конвективных сушилок, также отсутствуют выбросы отработанного сушильного агента в окружающую среду. Отсутствует калорифер, энергия адиабатического сжатия непосредственно превращается в теплоту, а сушильный агент адресно доставляется к каждой дисперсной частице за счет высокого давления. Наличие влагоот-

делителя позволяет собирать ароматические и пигментные вещества, уходящие с паром, и использовать их в дальнейшем. Таким образом, в предлагаемой технологии сушки решаются несколько задач: повышение энергоэффективности, ресурсосбережение и экологичность производства.



1 - компрессор; 2, 6 - датчики температуры; 3, 5 - датчики давления;  
4 - тепло-массообменный модуль; 7 - дросель; 8 - теплообменник; 9 - влагоотделитель.

**Рис. 1 – Схема фильтрационной сушилки для сушки при повышенном давлении.**

Нами было проведено математическое моделирование теоретического (изоэнтальпийного) процесса сушки для двух случаев: 1) фильтрационная сушка при атмосферном давлении, 2) фильтрационная сушка при повышенном давлении. При этом рассматривался одинаковый режим для обоих случаев, при котором сушильный агент полностью насыщается влагой до относительной влажности  $\varphi_2=1$  на выходе сушилки. Производительность по испаренной влаге для обеих сушилок принималось одинаковой, как и температура сушильного агента. При этом рассчитывались удельные энергозатраты на процесс сушки для обоих случаев.

$$q = \frac{P}{(\Delta m / \Delta \tau)}, \quad (1)$$

где  $q$ - удельные энергозатраты на процесс сушки, Дж/кг;  $P$  - мощность, затрачиваемая на процесс сушки, Вт;  $\Delta m / \Delta t$  – скорость сушки, (кг испар. влаги)/с.

Мощность, затрачиваемая на процесс фильтрационной сушки при атмосферном давлении, рассчитывалась по уравнению (2)

$$P_{\text{конв}} = L\rho C(t_1 - t_0) + P_{\text{вент}}, \quad (2)$$

где  $P_{\text{конв}}$  – мощность, затрачиваемая на процесс сушки, Вт;  $L$  – расход воздуха в сушилке, м<sup>3</sup>/с,  $C$  – удельная теплоемкость воздуха, Дж/кг;  $t_0$  – температура окружающей среды, °С,  $t_1$ –температура на выходе из калорифера,  $P_{\text{вент}}$  – мощность вентилятора. Вт.

Мощность, затрачиваемая на процесс фильтрационной сушки под действием повышенного давления, рассчитывалась исходя из работы в адиабатном процессе сжатия в компрессоре

$$P_{\text{фильт}} = \frac{p_0 L}{\gamma - 1} \left[ 1 - \left( \frac{p_1}{p_0} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} \right], \quad (3)$$

где  $P_{\text{фильт}}$  - мощность затрачиваемая на процесс фильтрационной сушки под действием повышенного давления, Вт,  $\eta$  - к.п.д. компрессора;  $p_1$  – давление на выходе из компрессора, Па;  $\gamma$ - показатель адиабаты для воздуха ( $\gamma=1,4$ ).

Температура при адиабатическом процессе сжатия в компрессоре связана с давлением следующим образом

$$t_1 = (t_0 + 273) \left( \frac{p_1}{p_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 273 \quad (4)$$

где  $t_0$  - температура на входе в компрессор, °C;  $t_1$  - температура на выходе из компрессора, °C.

Расчет по этой формуле показывает, что при увеличении давления от 0,14 МПа до 4 МПа температура на выходе из компрессора увеличивается от 50°C до 160°C (реально процесс в компрессоре является политропным и температура на выходе может быть несколько больше или меньше).

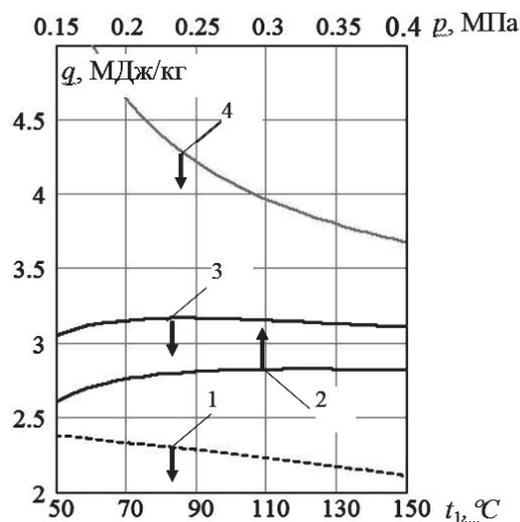
Расход воздуха на процесс сушки рассчитывался следующим образом

$$L = \frac{\Delta m}{\Delta \tau} \frac{v}{d_2 - d_0} \quad (5)$$

где  $v$  - удельный объем воздуха, м<sup>3</sup>/кг;  $d_0, d_2$  - влагосодержание воздуха на входе и выходе из сушилки.

Для расчетов параметров состояния влажного воздуха (влагосодержание, энтальпия, удельный объем, удельная теплоемкость, плотность) использовались классические уравнения [5]. Параметры воздуха на выходе сушилки  $t_2$  определялись для изоэнтальпийного процесса сушки (тепловые потери не учитывались). Параметры окружающего воздуха принимались равными  $t_0=20$  °C;  $d_0=0,01$  кг/кг. Расчеты по уравнениям (1)-(5) проводились в среде пакета Mathcad, для этого использовались данные о давлении насыщенных паров воды [6].

Результаты расчетов приведены на рис. 2. Кривая 1 построена по табличным значениям зависимости удельной теплоты парообразования воды от температуры [6].



- 1 - удельная теплота парообразования воды;
- 2 - фильтрационная сушка при повышенном давлении;
- 3 - фильтрационная сушка при атмосферном давлении  $\varphi_2=1$ ;
- 4 - фильтрационная сушка при атмосферном давлении  $\varphi_2=0,4$ .

Рис. 2 – Удельные энергозатраты на процесс сушки.

Для моделирования был принят типичный диапазон температур сушильного агента при фильтрационной сушке 50...160 °C, что соответствует давлениям нагнетания в компрессоре от 0,14 до 0,4 МПа. Как показывают расчеты для теоретического процесса конвективной сушки (при полном насыщении воздуха на выходе из сушилки  $\varphi_2=1$ ) энергозатраты на 10...12 % выше, чем для аналогичного режима сушки в ТМОМ под давлением, для которой удельные энергозатраты на испарение влаги составляют 2,6...2,8 МДж/кг и практически сравнимы с физическим пределом удельных энергозатрат на испарение воды (кривая 1).

Если же сравнивать энергозатраты для традиционных режимов фильтрационной сушки, при котором относительная влажность сушильного агента на выходе из сушилки  $\varphi_2=0,4$ , то они в 1,5...2 раза выше (3,6...5,5 МДж/кг), чем для сушки под давлением.

Характерное уменьшение удельных энергозатрат при фильтрационной сушке при атмосферном давлении с ростом температуры связано с увеличением поглощающей способности сушильного агента ( $d_2-d_0$ ) и уменьшением расхода воздуха, а соответственно требуемой мощности.

В тоже время удельные энергозатраты на сушку под действием повышенного давления практически не зависят от температуры и давления (в соответствии с уравнением 3 зависимость от давления степенная с показателем  $(\gamma-1/\gamma)=0,27$ ). При этом уменьшение давления нагнетания приводит к уменьшению энергозатрат на процесс (кривая 2, рис.2). Это объясняется тем, что с увеличением давления уменьшается поглощающая способность влажного воздуха.

В заключении следует отметить, что в этих расчетах не учтена доля влаги, которая удаляется из влажного материала без фазового перехода под действием избыточного давления в ТМОМ. Доля такой влаги в пищевом сырье (влага смачивания и влага макропор) может составлять от 25 до 50 %.

**Выводы.** Проведенный теоретический анализ показал, что предлагаемый способ сушки в тепло-массообменных модулях под действием повышенного давления обладает рядом преимуществ: уменьшаются энергозатраты на испарение влаги минимум в 1,5...2 раза по сравнению с традиционными режимами конвективной сушки; снижается материалоемкости оборудования, поскольку функции калорифера и вентилятора совмещены в одном устройстве (компрессоре); отсутствуют выбросы отработанного сушильного агента в окружающую среду (полная утилизация теплоты в замкнутом контуре), появляется возможность концентрирования ароматических и пигментных веществ, уходящих с паром.

#### Литература

1. Kudra, T. Energy aspects in drying// *Drying Technology*. 2004. Vol.22, №5. P. 917-932.
2. Погожих М. І. Наукові основи теорії й техніки сушіння харчової сировини в масообмінних модулях: дис... д-р техн. наук : 05.18.12 : захищена 04.06.2002 / Погожих Микола Іванович. – Харків., 2002. – 331 с.
3. Використання мікрохвильової вакуум-ної обробки в процесах виробництва овочевих концентратів: монографія / [О.І Черевко, В.М. Михайлов, І.В. Бабкіна, В.О. Потапов, С.В. Михайлова]. – Харків: ХДУХТ, 2014. – 118 с..
4. Потапов В.О. Гриценко О.Ю, Пономаренко Ю.О. Дослідження процесу сушіння в масообмінних модулях під дією підвищеного тиску // *Прогресивні техніка та технологія харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі*: зб. наук. праць: Харк. держ. ун-т харчування та торгівлі. – Харків: ХДУХТ, 2013. - Вип. 1 (17). Ч.1. С. – 148-153.
5. Термодинамические свойства и процессы влажного воздуха / Белоусов В.С. Нейская С.А., Ширяева Н.П., Ясников Г.П. // *Екатеринбург, ГОУ ВПО УГТУ – УПИ, 2005. 20 с.*
6. Principles of heating ventilating and air conditioning / ASHRAE 1791 Tullie Circle, N.E. Atlanta, GA 30329, 2013. 585 p.