

УДК: 641.78:664

## ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СУШКИ ВИНОГРАДНЫХ ВЫЖИМОК В МАССООБМЕННОМ МОДУЛЕ С КОНДУКТИВНЫМ ПОДВОДОМ ТЕПЛОТЫ

Потапов В.А., д-р техн. наук, проф., Якушенко Е.Н.  
Харьковский государственный университет питания и торговли, г. Харьков

*В статье теоретически и экспериментально обосновано применение кондуктивного подвода теплоты и оптимальные режимы сушки виноградных выжимок в массообменном модуле.*

*The paper theoretically and experimental justified using the conductive heat transfer and the optimal mode of drying of grape pomace.*

**Ключевые слова:** сушка, теплообмен, энергоэффективность, тепломассообменный модуль, виноградная выжимка.

Агропромышленный комплекс Украины – один из наибольших потребителей топливно-энергетических ресурсов в стране. Переработка плодов и овощей в пищевые полуфабрикаты и готовые продукты осуществляется в достаточно больших масштабах, что влечет за собою затраты как энергии так и привлечение больших материальных ресурсов.

Перспективным направлением в пищевой промышленности является развитие технологий, обеспечивающих производство порошковых полуфабрикатов из вторичного растительного сырья, одним из которых является вторичный продукт виноделия - виноградная выжимка.

По данным Ассоциации виноградарей и виноделов Украины, валовой сбор технического винограда в 2010-2011 гг. составляет около 244 тыс. тонн в год. Отходы в виде виноградной выжимки составляют 15-17% от массы ягод, т.е. около 40 тыс. тонн в год, однако в Украине практически полностью отсутствует переработка виноградной выжимки.

Виноградные выжимки, переработанные в порошковый полуфабрикат, являются ценнейшим сырьем для пищевой, химической, фармацевтической и косметологической промышленности. Из них получают более десятка высококорентабельных продуктов таких, как спирт, винная кислота, винный камень, виноградное масло, пищевой краситель, танин, энантовый эфир, удобрения, кормовые продукты и др.

В настоящее время порошковые полуфабрикаты из растительного сырья получают путем химического синтеза или многократной экстракции, что не позволяет максимально сохранять биологически активные вещества, витаминные комплексы, органические кислоты. Получение порошковых полуфабрикатов методом сублимационной сушки устраняет приведенные выше недостатки, но характеризуется повышенными энергозатратами и сложностью оборудования.

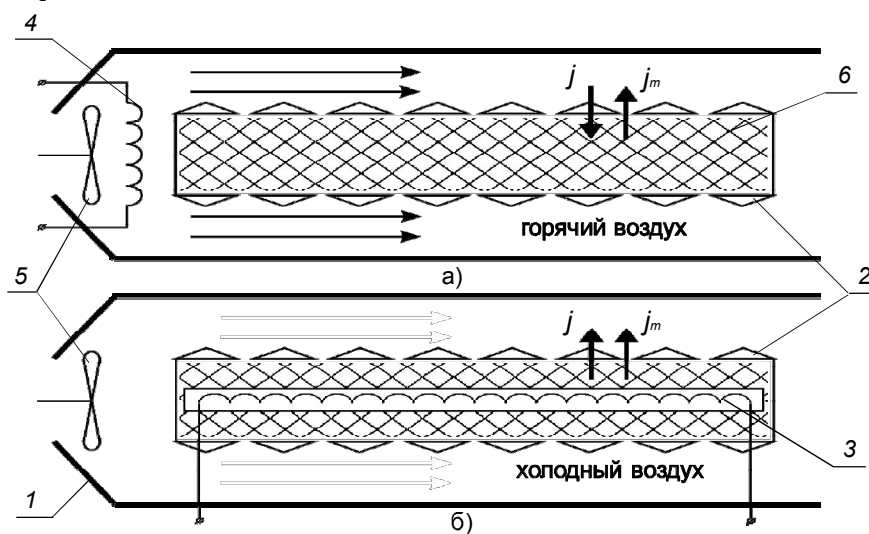
В работах ученых ХГУПТ Погожих Н.И. [1], Потапова В.А. [2], Цуркана Н.М., Сомова А.С., Пака А.О. показано, что альтернативой сублимационной сушки, для некоторых видов пищевого сырья на сегодняшний момент, является сушка со смешанным теплоподводом. Однако использование в этом процессе конвективного подвода теплоты от сушильного агента к тепломассообменному модулю (ТМОМ) не является оптимальным.

Проведенный критический анализ существующих методов получения порошков из растительного сырья базировался на основе технических, технологических и экономических показателей. По комплексу показателей способ СТП-сушки превосходит остальные методы сушки: он характеризуется небольшими энергозатратами сравнимым с СВЧ-сушкой, высоким качеством готового продукта, сравнимым с сублимационной сушкой, экологической безопасностью и простотой конструктивной реализации сравнимой с конвективными сушилками.

В тоже время недостатком существующей реализации способа СТП-сушки, является наличие смешанного конвективно-кондуктивного подвода теплоты при котором теплота от воздуха передается конвективным путем к поверхности тепломассообменного модуля, а затем от нее к внутренним слоям кондуктивно.

Таким образом, существует два лимитирующих фактора процесса СТП-сушки: низкое значение коэффициента теплоотдачи конвекцией и наличие градиента температур направленного против внутренне-го потока массы.

Поэтому была выдвинута гипотеза о повышении энергоэффективности процесса СТП-сушки путем разделения функций тепло- и массообмена между внутренним нагревателем и внешним потоком, при котором нагреватель используется для кондуктивной передачи теплоты, а внешний конвективный поток выполняет функцию поглотителя влаги (рис. 1). В этом случае градиенты температур и потока массы совпадают по направлению.



а) – конвективный подвод теплоты; б) – кондуктивный подвод теплоты; 1 – сушильная камера; 2 – ТМОМ; 3 – внутренний нагреватель; 4 – внешний нагреватель; 5 – вентилятор; 6 – продукт;  $j$  – поток теплоты;  $j_m$  – поток массы.

Рис. 1 – Схема СТП-сушки

С целью выяснения способа реализации кондуктивного теплоподвода при СТП-сушке были исследованы три варианта ТМОМ, которые отличались расположением и конструкцией тепловыделяющих элементов:

- внутренний трубчатый нагреватель (ВТН);
- плоский поверхностный нагреватель расположенный на теплообменной поверхности ТМОМ (ППН);
- внутренний плоский нагреватель (ВПН).

Согласно поставленным задачам исследований были проведены теоретические и экспериментальные работы. Одной из первых задач являлось теоретическое обоснование эффективности конвективного и кондуктивного теплоподвода к ТМОМ.

С этой целью была использована математическая модель тепло-массопереноса при СТП-сушке на основе классического уравнения теплового баланса (1) и получены выражения для зависимости безразмерного температурного напора: источник теплоты – материал от процессных факторов в случае конвективного и кондуктивного теплоподвода. Величина температурного напора в процессе сушки служит мерой аппаратных энергозатрат в сушилке.

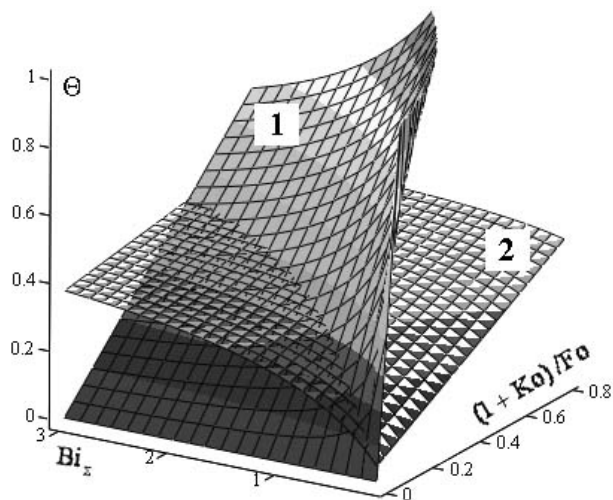
$$c\rho V \frac{dT}{d\tau} = jS - r_w \rho V \frac{dw}{d\tau}, \quad (1)$$

где  $c$  – удельная теплоемкость продукта, Дж/(кг·К);  $\rho$  – плотность продукта, кг/м<sup>3</sup>;  $V$  – объем ТМОМ, м<sup>3</sup>;  $T$  – средняя температура продукта в ТМОМ, К;  $j$  – плотность потока теплоты внутри ТМОМ, Вт/м<sup>2</sup>;  $S$  – площадь теплообменной поверхности ТМОМ, м<sup>2</sup>;  $r_w$  – удельная теплота парообразования, Дж/кг;  $w$  – влагосодержание продукта, кг/кг

На рис. 2 приведены расчетные зависимости безразмерных температурных напоров для двух способов теплоподвода к ТМОМ, которые позволяют сделать следующие выводы:

- с увеличением интенсивности процесса сушки и уменьшением числа Био, энергозатраты на процесс сушки возрастают;
- при малых интенсивностях сушки  $(1+Ko)/Fo$  аппаратные затраты энергии в случае конвективного теплоподвода к ТМОМ ( $\Theta_{конв} < \Theta_{конд}$ ) меньше;
- при больших интенсивностях сушки меньше аппаратные затраты энергии в случае кондуктивного теплоподвода к ТМОМ ( $\Theta_{конд} < \Theta_{конв}$ ).

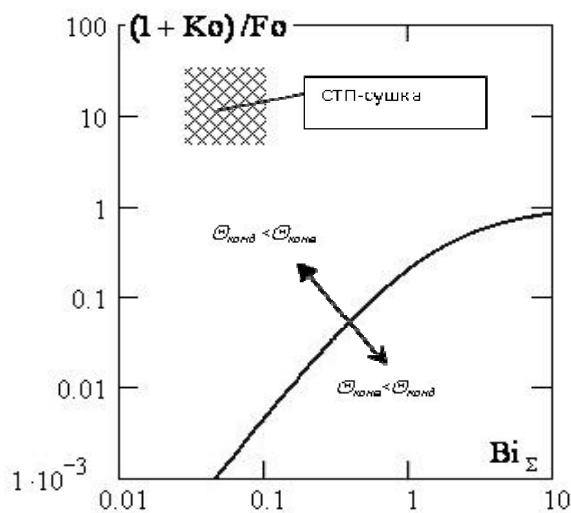
Граница области рациональных режимов определяется линией пересечения поверхностей безразмерного температурного напора (рис. 2). Ниже кривой лежит область энергоэффективных режимов для конвективного теплоподвода, выше – для кондуктивного теплоподвода.



1 – конвективный подвод; 2 – кондуктивный подвод

**Рис. 2 – Температурный напор источник теплоты – материал в процессе сушки в ТМОМ**

Таким образом, впервые теоретически обосновано, что область энергоэффективных режимов СТП-сушки соответствует кондуктивному теплоподводу (рис. 3). Что вызывает необходимость создания соответствующей конструкции ТМОМ.



**Рис. 3 – Область энергоэффективного использования кондуктивного и конвективного теплоподвода к ТМОМ**

Следующей теоретической задачей было определение адекватного показателя энергоэффективности сушилок. В настоящее время для этой цели используются: производительность по испаренной влаге, удельные затраты энергии на сушку, КПД сушилки, однако они не позволяют оценить эффективность использования энергии для сушилок разной производительности. С этой целью предлагается использо-

вать технико-экономический подход: условная прибыль, получаемая при производстве сушеного продукта (2) тем больше, чем больше произведено продукта при том же количестве затраченной энергии.

$$УП = C_{П} - C_{Э} = E_{ф} \cdot q \cdot \tau_c (Ц_{П} \cdot k - Ц_{Э} \cdot q) \quad (2)$$

где  $C_{П}$  – стоимость сушеного продукта, грн;  $C_{Э}$  – стоимость энергии, затраченной на испарение влаги в сушилке, грн;  $E_{ф}$  – показатель энергоэффективности, (кг/ч)<sup>2</sup>/кВт;  $q$  – удельные энергозатраты на процесс сушки, Дж/кг;  $\tau_c$  – период работы сушилки, ч;  $Ц_{П}$  – цена сушеной продукции, грн/кг;  $k = w_k / (w_0 - w_k)$  – коэффициент пересчета производительность сушилки по сушеному продукту ( $w_0$ ,  $w_k$  – начальное и конечное влагосодержание продукта);  $Ц_{Э}$  – цена единицы энергии, грн/Дж.

В соответствии с этим предлагается ввести следующий новый показатель энергоэффективности сушилок: производительность сушилки по испаренной влаги отнесенную к удельным затратам энергии на процесс (3).

$$E_{ф} = \frac{П}{q} = \frac{П^2}{\sum p} \quad (3)$$

где  $П$  – производительность сушилки по испаренной влаги, кг/с;  $\sum p$  – суммарная мощность подводимая к сушилке, Вт.

Сравнение существующих сушилок по этому показателю показывает, что энергоэффективность сушилок тем выше, чем выше их производительность. Для сопоставимой производительности 20...60 кг/ч энергоэффективность СВЧ-сушилок оказывается в 3 раза больше, а сублимационных в 1,5 раза меньше, чем у остальных конвективных и кондуктивных.

Предложенный показатель энергоэффективности использовали в дальнейшем для оценки эффективности ТМОМ с внутренним нагревателем.

С этой целью был спланирован эксперимент по изучению влияния процессных факторов на удельную производительность ТМОМ. Определяющими факторами являлись температура воздуха и нагревателя, скорость воздуха, ширина массообменного зазора ТМОМ, толщина ТМОМ.

В результате была предложена математическая модель, которая на практике позволяет проводить расчеты СТП-сушилки. В частности, после выбора режима сушки для данного вида сырья, рассчитывается удельная производительность ТМОМ (4), а затем общая площадь массообменных модулей и их количество.

$$j_m = j_0 \Pi^a \theta^b \text{Re}^c \left( \frac{S_M}{S} \right)^d \quad (4)$$

где  $j_m$  – плотность потока массы из ТМОМ, кг/(м<sup>2</sup>·с);  $j_0$ ,  $a, b, c, d$  – эмпирические коэффици-

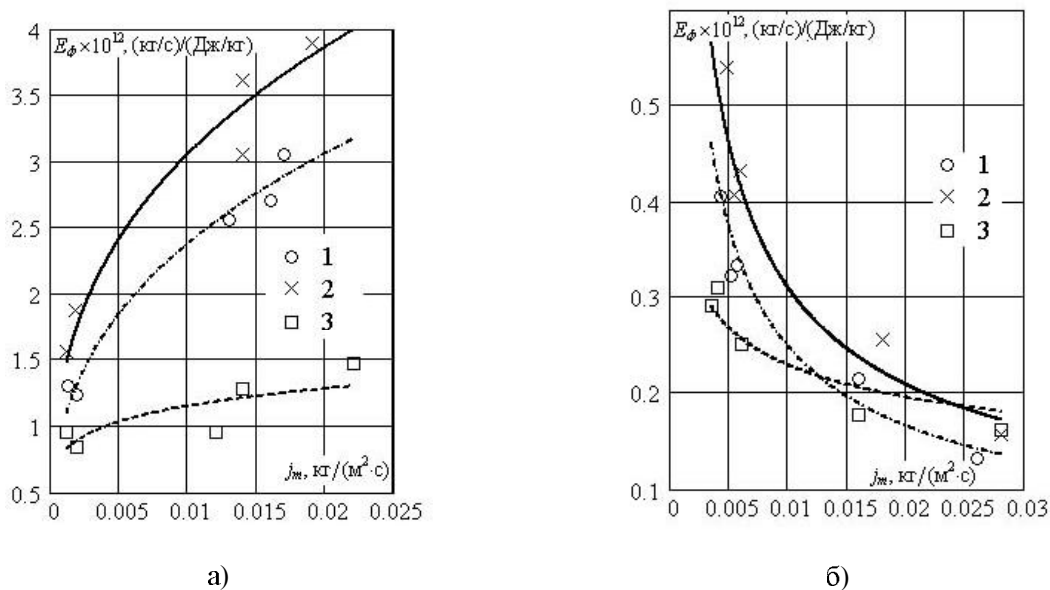
енты;  $\Pi$  – пористость заполнения ТМОМ продуктом;  $\theta = \frac{T_c - T_M}{T_0}$  – безразмерный потенциал сушки;  $T_c$  – средняя температура сушильного агента, К;  $T_M$  – температура мокрого термометра, К;  $T_0$  – начальная температура продукта, К;  $\text{Re}$  – число Рейнольдса;  $S_M$  – площадь массообменной поверхности ТМОМ, м<sup>2</sup>;  $S$  – площадь теплообменной поверхности ТМОМ, м<sup>2</sup>.

На рис. 4 приведены полученные значения показателя энергоэффективности процесса сушки в ТМОМ с нагревателями различных типов для двух случаев: без подогрева воздуха и с дополнительным подогревом воздуха во внешнем калорифере. При этом, во всех случаях температура нагревателей в ТМОМ поддерживалась постоянной –  $t_{нагр} = 70^\circ\text{C}$ .

Установлено, что показатель энергоэффективности имеет принципиально разный характер: при использовании воздуха без подогрева он растет с увеличением производительности ТМОМ, а при использовании воздуха с подогревом – падает. Это объясняется тем, что при использовании нагретого воздуха увеличение производительности достигается непропорциональным увеличением энергозатрат на его излишний подогрев во внешнем калорифере, при этом только часть этой энергии используется на сушку, а большая теряется с обработанным сушильным агентом.

При этом показатель энергоэффективности при использовании дополнительного подогрева почти в 10 раз ниже, чем в случае использования воздуха без подогрева.

Наименьшим показателем энергоэффективности обладает поверхностный плоский нагреватель, поскольку его использование фактически эквивалентно дополнительному подогреву воздуха во внешнем калорифере, что, как показано выше, не является энергоэффективным решением. Поэтому рациональная конструкция ТМОМ должна предусматривать использование ВПН или ВТН.

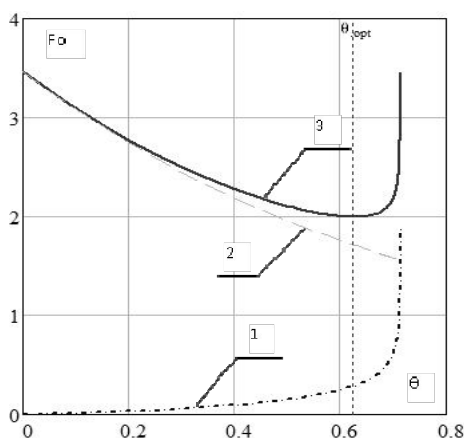


а) при использовании сушильного агента без дополнительного нагрева ( $t_c=20^\circ\text{C}$ );  
 б) при использовании сушильного агента с дополнительным нагревом ( $t_c=90^\circ\text{C}$ );  
 1 – ВПН; 2 – ВТН; 3 – ППН

**Рис. 4 – Зависимость показателя энергоэффективности ТМОМ от удельной производительности**

С целью дальнейшего повышения энергоэффективности сушки в ТМОМ нами было предложено использовать предварительный нагрев материала. Эффективность этого технологического приема основана на том [3], что повышение средней температуры материала перед началом сушки повышает коэффициент внутреннего массопереноса. Однако повышение средней температуры материала уменьшает длительность последующего процесса сушки, но требует большей длительности прогрева, а следовательно, и больших общих энергозатрат. Поэтому было проведено теоретическое моделирование процесса предварительного прогрева материала в ТМОМ.

Установлено, что (рис. 5) с увеличением продолжительности предварительного нагрева растет средняя температура материала, а продолжительность второго этапа, сушки, сокращается. При оптимальной температуре материала в конце первого этапа ( $\theta_{opt}$ ) общая продолжительность процесса минимальна.



**Рис. 5 – Продолжительность нагрева (1), продолжительность сушки (2), общая продолжительность процесса (3) зависимости от средней температуры материала.**

**Выводы.** В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований установлено преимущество кондуктивного подвода теплоты к ТМОМ от внутреннего нагревателя по сравнению с конвективным. Рекомендованы следующие рациональные режимы сушки виноградной выжимки в ТМОМ.

- использование внутреннего плоского нагревателя;
- температура внутреннего нагревателя – 70 °С;
- воздух без дополнительного нагрева во внешнем калорифере;
- относительная массообменная поверхность ТМОМ (SM/S) – 0,02;
- пористость заполнения продуктом ТМОМ не менее 0,6 ( $P \geq 0,6$ );
- число Рейнольдса в канале сушильной камеры не менее 10000;
- предварительный нагрев виноградной выжимки в течении 10 мин.

В результате увеличивается коэффициент энергоэффективности на 25...45% в сравнении с ТМОМ с конвективным теплоподводом и уменьшаются потери аскорбиновой кислоты в процессе сушки виноградной выжимки до уровня 3...8%.

#### Литература

1. Погожих, М. І. Наукові основи теорії й техніки сушіння харчової сировини в масообмінних модулях [Текст] : дис... д-р техн. наук : 05.18.12 : захищена 04.06.2002 / Погожих Микола Іванович. – Х., 2002. – 331 с.
2. Потапов В.А. Кинетика сушки: анализ и управление процессом [Текст]: монография / В. А. Потапов. – Харьков: ХДУХТ - 2009.- 250 с.
3. Лыков А.В. Теория сушки [Текст] : А.В. Лыков. – «Энергия». – М., 1968 – 472 с.

УДК 62 229. 316. 0002. 51

## ВПРОВАДЖЕННЯ МАГНІТНИХ ГІДРОДИНАМІЧНИХ РЕЗОНАТОРІВ ПРИ ОЧИЩЕННІ СОНЯШНИКОВОЇ ОЛІЇ

Осадчук П. І. канд. тех. наук, доцент  
Одеський державний аграрний університет, м. Одеса

*У статті проаналізовано механізм впливу магнітного поля на розчин олія-вода при процесі гідратації. Ґрунтуючись на відомих теоріях впливу магнітного поля на воднодисперсні розчини, наводиться своє бачення теорії протікання даного процесу.*

*In the article it is analysed mekhaniz influence of the magnetic field on solution butter-water at the process of hydration. Based on the known theories of influence of the magnetic field on vodnodispesni solutions, svoe vision of theory of flowing of this process is pointed.*

**Ключові слова:** вода, розчин вода – олія, магнітне поле, гідратація, хімічна реакція.

Наукові дослідження багатьох лабораторій показали, що небезпека для здоров'я людини представляють не стільки окремі компоненти масел і жирів, скільки продукти їхнього окислювання та розпаду.

Не сам холестерин викликає утворення атеросклеротичних бляшок, а продукти його окислювання, які утворюють із насиченими жирними кислотами складноєфірні зв'язки. Окислені похідні холестерину та інших ліпідних компонентів, що входять до складу нерафінованих жирів, можуть бути також причиною виникнення важких захворювань, таких, як ішемія й навіть рак. При цьому самі гідроперекиси не завжди небезпечні для здоров'я, а от продукти їхнього розпаду з утворенням вільних радикалів являють реальну загрозу здоров'ю людини.

Застосовувана в цей час технологія повного циклу рафінації та модифікації рослинних олій складається з хімічних, фізико-хімічних і фізичних процесів.

Гідратація фосфоліпідів являє собою перший етап комплексного процесу рафінації, що визначає не тільки якість масла, але і економічну ефективність наступних стадій його переробки. Фосфоліпіди здатні до різних перетворень і взаємодій, наприклад, вони реагують із водою. На цьому заснований у цей час процес гідратації при  $t = 60...80$  °С, що приводить до відходів олії при відділенні фосфоруотримуючої емульсії. Причому процес гідратації з водою забезпечує видалення тільки гідратуємих фосфоліпідів на 50 %. Виділена фосфатида емульсія разом з жирами використовується в кормових цілях.