

## КИНЕТИКА ТЕПЛО- И МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ТЕХНОЛОГИИ ПИЩЕВЫХ КОНЦЕНТРАТОВ

Терзиев С.Г., Ружицкая Н.В., Борщ А.А.

*Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса, Украина*

**Введение.** Ключевыми процессами в технологиях пищевых концентратов являются сушка и экстрагирование. Это сопряженные тепло-массообменные процессы, энергетика и кинетика которых серьезно зависят от организации энергоподвода [1].

В последнее время широкое применение получил инфракрасный нагрев пищевых продуктов. Инфракрасное излучение – электромагнитное излучение, охватывающее диапазон длин волн от 0,75 до 1000 мкм. Механизм поглощения энергии инфракрасных волн состоит в изменении вибрационного состояния молекул. В целом твердые материалы поглощают ИК-излучение только в тонком поверхностном слое. В пористые влажные материалы излучение проникает на определенную глубину, а их проводимость зависит от влагосодержания. Поглощение инфракрасной энергии водой преобладает на всех длинах волн, что позволяет использовать широкий диапазон ИК-излучателей [2].

**Экспериментальный стенд для исследования кинетики сушки.** Для исследования кинетики процесса сушки сырья с помощью ИК-излучения изготовлен экспериментальный стенд, состоящий из электронных весов, ИК-камеры, системы измерения подводенной мощности, температуры продукта и воздуха в камере (рис.1.).

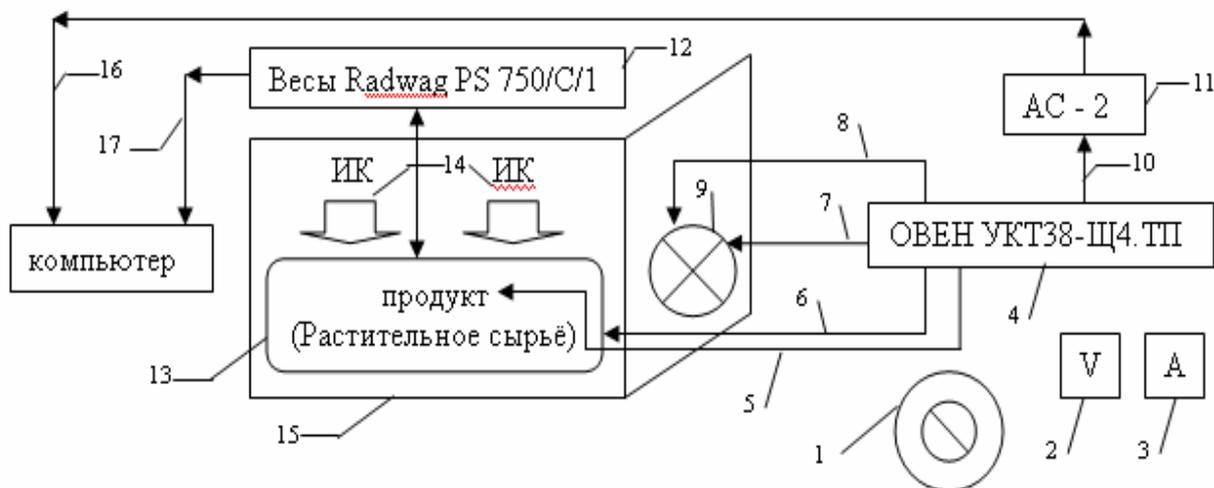


Рис. 1. Автоматизированный лабораторный стенд

- 1 – регулятор мощности ИК излучателей; 2 – вольтметр; 3 – амперметр;  
 4 – устройство контроля температуры восьмиканальное;  
 5 – термопара измеряющая температуру продукта;  
 6 – термопара измеряющая температуру воздуха в камере; 7 – сухой термометр (термопара);  
 8 – мокрый термометр (термопара); 9 – вентилятор; 10 – «токовая петля»; 11 – преобразователь интерфейсов «токовая петля»/RS-232 ОВЕН АС-2;  
 12 – весы; 13 – подвесная платформа для продукта; 14 – ИК излучатели; 15 – камера;  
 16 – сигнал из АС-2 по интерфейсу RS-232 к COM2 порту компьютера; 17 – сигнал из весов по интерфейсу RS-232 к COM1 порту компьютера.

В ИК камере расположены два инфракрасных излучателя, платформа, растительное сырьё (продукт), термопара показывающая температуру продукта, термопара показывающая

температуру воздуха в камере, вентилятор отвода влаги из камеры, мокрый и сухой термометры. Таким образом ИК излучатели воздействуют на продукт, который помещён на платформу. В свою очередь платформа подвешена на весы, которые передают информацию о массе продукта на компьютер. Мощность ИК излучателей изменяется в ручную регулятором по показаниям вольтметра и амперметра. За показания и обработку сигналов с температурных датчиков (термопар тип L) отвечает устройство контроля температуры восьмиканальное с аварийной сигнализацией ОВЕН УКТ38-Щ4.ТП. При помощи преобразователя интерфейсов «токовая петля»/RS-232 ОВЕН АС-2, через который и проходит сигнал о температурах из ОВЕН УКТ38-Щ4.ТП на компьютер.

На компьютер приходит одновременно два сигнала по интерфейсу RS-232. Сигнал с ОВЕНА обрабатывается с помощью SCADA-системы OWEN PROCESS MANAGER (OPM). Это позволяет строить термограммы, как в режиме онлайн так и после окончания процесса. А вот для обработки сигнала по интерфейсу RS-232 с весов пришлось, с помощью программы delphi 7 написать программу, которая позволила не только считывать сигнал с весов, но и строить графики линии сушки и скорости сушки в режиме онлайн (рис.2).

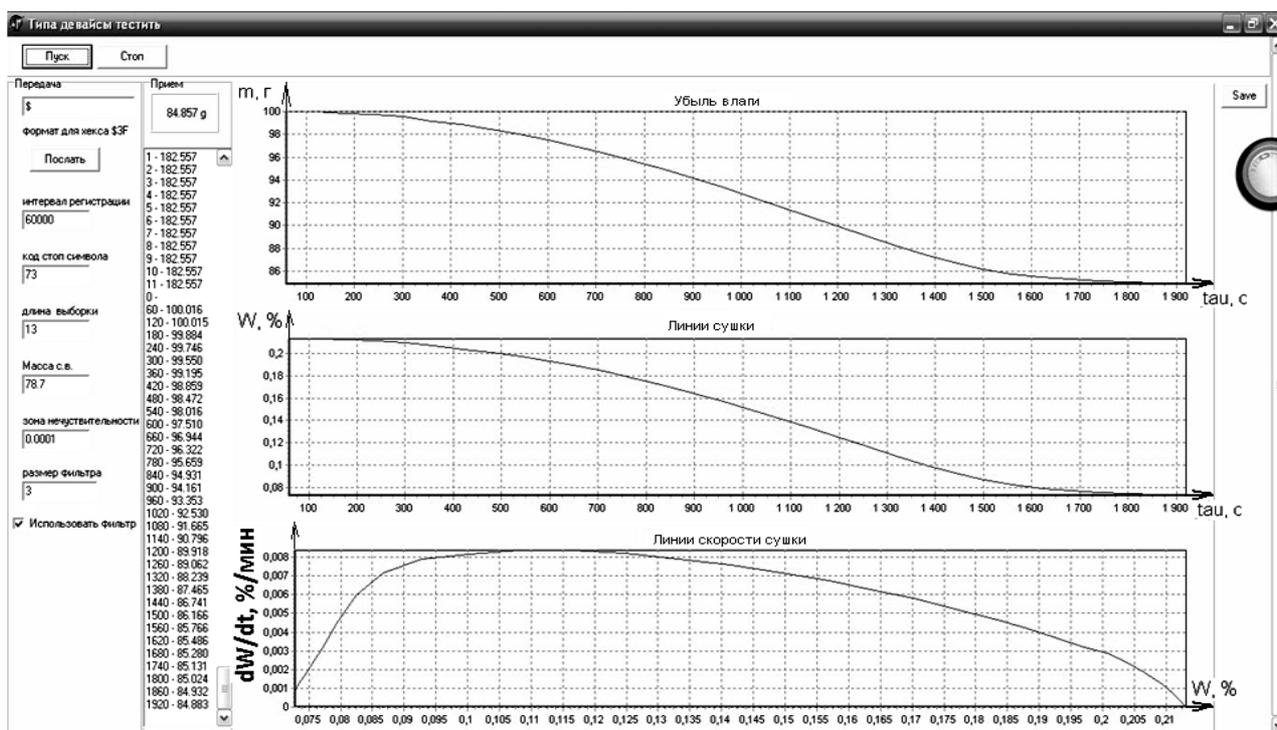


Рис. 2. Разработанная компьютерная программа, считывает сигнал с весов и регистрирует линии сушки и линии скорости сушки

С внедрением автоматического сбора информации, можно легко следить за процессом сушки, а также регулировать его.

**Кинетика сушки гороха.** Диапазон экспериментальных данных, полученных на описанной установке приведен в табл. 1.

Таблица 1

Сырье	Удельная мощность ИК	Температура, $T, ^\circ\text{C}$	Загрузка $g, \text{кг/м}^2$	Время обработки $\tau, \text{мин}$
Кофейный шлам	2,5...12,5 кВт/м <sup>2</sup>	45...130 °C	2,5...10	20...100
Вареный горох	1,25...12,5 кВт/м <sup>2</sup>	60...130 °C	2,5...10	10...200

Влияние удельной мощности подводенной ИК-энергии на скорость сушки целого гороха показано на рисунке 3.

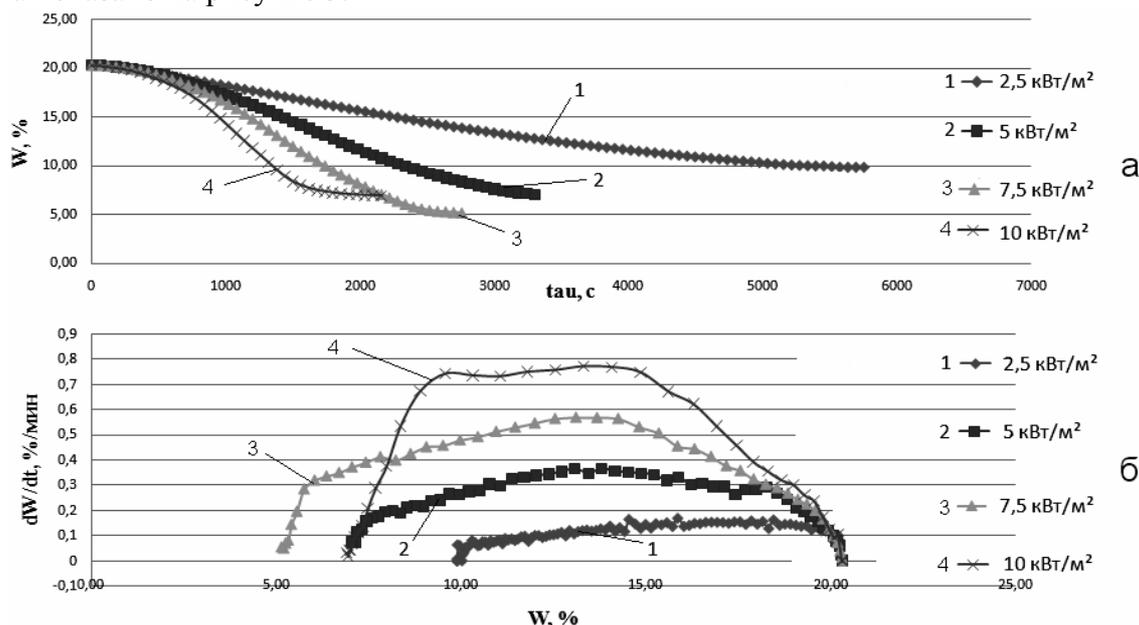


Рис. 3 – Влияние мощности ИК излучения в неподвижном слое для загрузки целого гороха 2,5 кг/м<sup>2</sup>  
 а) - линии сушки б) - линии скорости сушки

С увеличением подводимой мощности скорость сушки увеличивается (рис.3). Так при увеличении подвода энергии в 4 раза, скорость сушки возросла в 4 раза. Однако при подводе 10 кВт/м<sup>2</sup> энергии наблюдается подгорание продукта, что ухудшает его качество.

Результаты исследования сушки гороха с размером частиц в пол-зерна приведены на рис. 4.

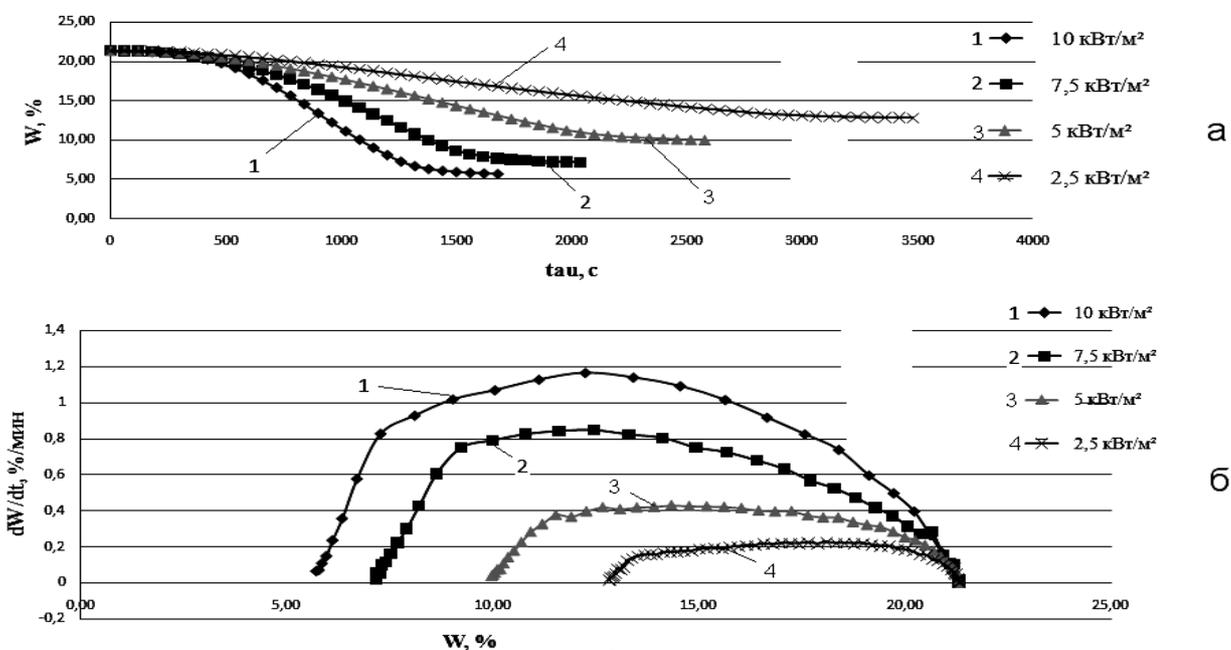


Рис. 4 – Влияние мощности ИК излучения в неподвижном слое для загрузки половинок гороха массой 2,5 кг/м<sup>2</sup>  
 а) - линии сушки б) - линии скорости сушки

При сравнении с результатами сушки целого гороха, видно, что скорость обезвоживания  $\frac{1}{2}$  зерна увеличилась при подводе 7,5 – 10 кВт/м<sup>2</sup> энергии в 1,3 – 1,5 раза,

однако при меньших значениях удельной мощности увеличения скорости сушки не наблюдалось.

**Кинетика сушки кофейного шлама.** Кофейный шлам – один из основных отходов производства растворимого кофе. Предлагается утилизировать кофейный шлам по следующей схеме (рис. 5.)

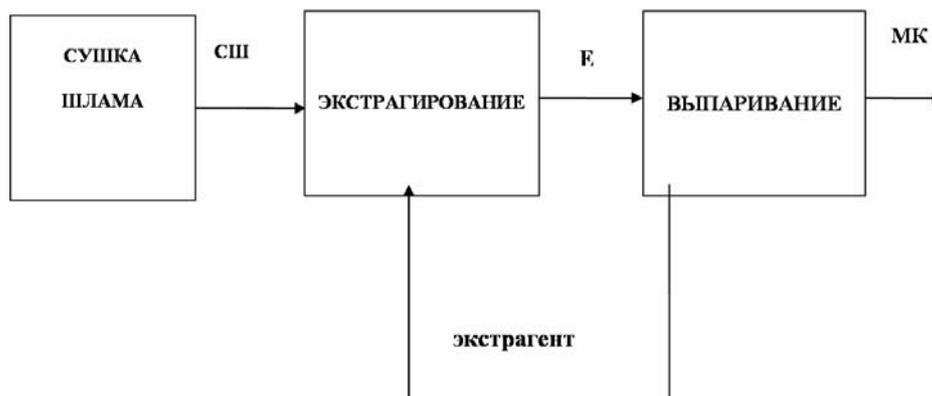


Рис. 5 – Принципиальная технологическая схема извлечения масла из кофейного шлама  
СШ - сухой шлам; Э – экстрагент; МК – масло кофе

Шлам начальной влажностью около 80% поступает в сушилку, сушится до 7-5 % и поступает в экстрактор. Из экстракта отгоняется и возвращается в экстрактор экстрагент, полученное масло направляется на дальнейшую обработку.

В опытах по ИК-сушке кофейного шлама определяли зависимости текущей влажности продукта и температуры от удельной массы шлама и удельной мощности подведенной энергии. В камере располагали шлам удельной массой 2,5...10 кг/м<sup>2</sup> при скорости воздуха на выходе из камеры 0 – 2,5 м/с. Фиксировалась продолжительность обработки, температура и масса шлама во время обработки. Удельная масса материала (g) показывает массу (m) продукта на единицу поверхности обработки (F).

Удельная мощность показывает количество ИК-энергии, которое подводится к 1 м<sup>2</sup> обрабатываемой поверхности. Термограммы сушки приведены на рисунке 6.

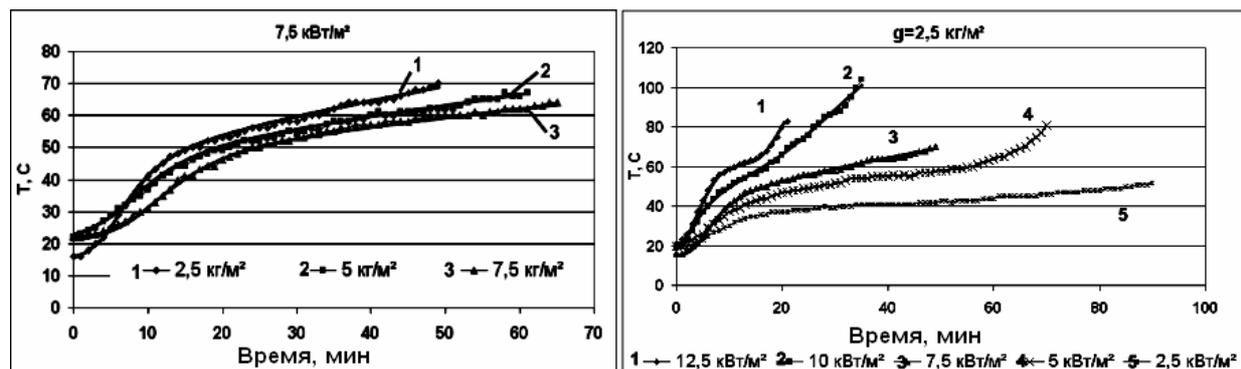


Рис. 6 – Термограммы сушки шлама в зависимости от удельной загрузки и от удельного подвода энергии

С увеличением мощности подведенной ИК-энергии, увеличивается скорость роста температуры продукта (рис.6). Быстрый рост температуры до относительно высокого значения (102 °С) указывает на то, что часть подведенной энергии идет не только на испарение влаги, а и на нагрев продукта. Линии процесса сушки приведены на рис. 7.

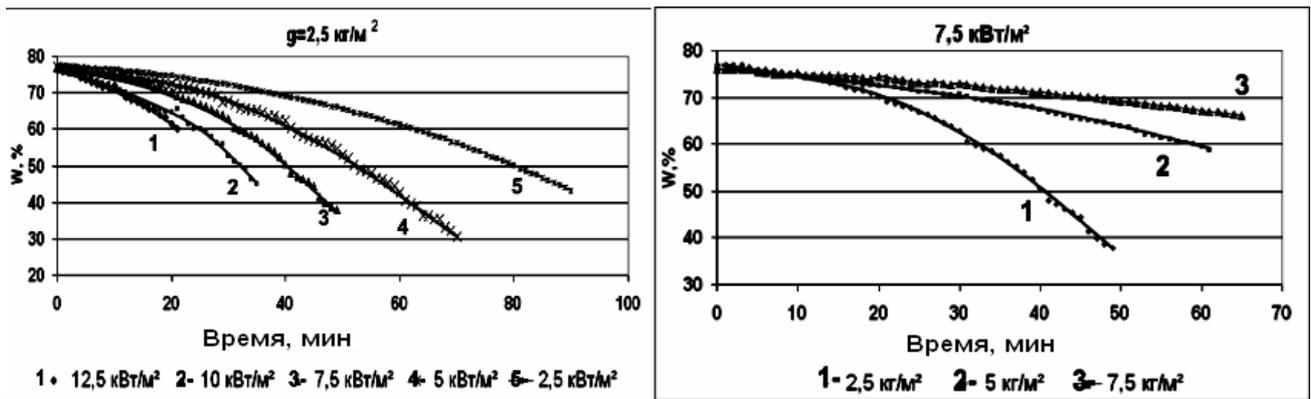


Рис. 7 – Линии сушки шлама в зависимости от удельного подвода энергии и удельной загрузки

Удаление влаги начинается в течение первых 10 минут обработки (рис.7). При этом с увеличением мощности ИК-излучения и уменьшением толщины слоя шлама (удельной загрузки), скорость сушки увеличивается. Скорость сушки составляла 0,6 – 1,8 %/мин. Интенсивное удаление влаги при достаточно низких температурах (40 – 50 °С) объясняется непосредственным действием ИК-излучения на продукт и поглощения энергии водой.

Изучалось также влияние скорости воздуха в сушильной камере на кинетику сушки шлама. Известно, что уменьшение содержания влаги в окружающем воздухе увеличивает интенсивность массопереноса. Однако с воздухом из камеры наблюдаются потери теплоты, что негативно влияет на энергоэффективность процесса. Опыты проводились при загрузке 2,5 кг/м<sup>2</sup> и подводе 7,5 кВт/м<sup>2</sup> энергии.

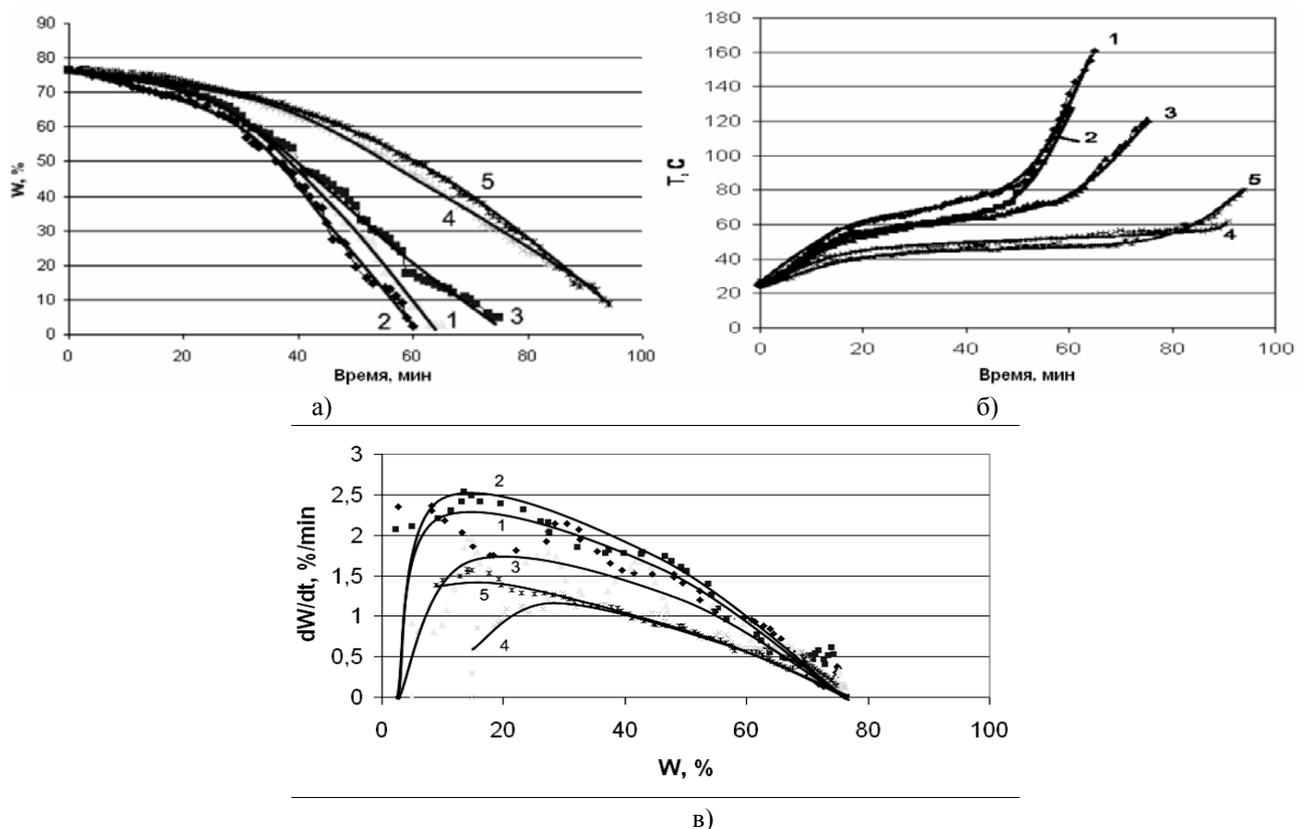


Рис. 8 – Линии сушки (а), термограммы (б) и линии скорости сушки (в):  
1 – 0 м/с, 2 – 0,5 м/с, 3 – 1 м/с, 4 – 1,5 м/с, 5 – 2 м/с

При низких скоростях движения воздуха в камере, и без дополнительного обдува наблюдается резкий рост температуры продукта, по времени совпадающий с началом периода падающей скорости сушки, в то же время период падающей скорости сушки почти не выражен, что объясняется радиационным подводом энергии (рис.8).

Исследование процесса сушки в подвижном слое проводили на универсальном стенде для СВЧ и ИК обработки пищевого сырья, который состоит из ленточного конвейера, трех модулей СВЧ-обработки и трех модулей ИК-обработки сырья.

Изучалось влияние количества подведенной энергии на среднюю скорость процесса сушки. При подводе уже 100 Вт ИК – энергии средняя скорость обезвоживания превысила 1 %/мин, но при увеличении количества подведенной энергии в 2 и 3 раза, этот показатель возрастал только на 0,2 %/мин.

Скорости сушки при движении ленты со скоростью от 0,13 до 0,33 см/с почти одинаковы, что можно объяснить сокращением продолжительности пребывания продукта в ИК модуле и более эффективным использованием подведенной энергии. На скорости большей, чем 0,4 см/с продукт, по-видимому, не успевает получить достаточное количество энергии для эффективного удаления влаги.

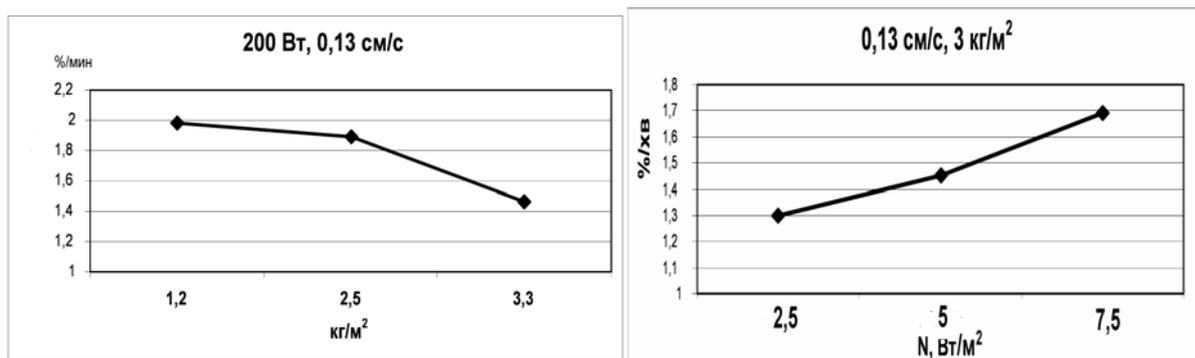


Рис. 9 – Влияние толщины слоя (загрузки) и удельного подвода энергии на скорость процесса сушки

С увеличением загрузки и, в свою очередь, толщины слоя продукта уменьшается скорость сушки, а с увеличением удельного подвода энергии скорость сушки увеличивается. (рис. 9).

Энергетика процесса сушки в одном ИК-модуле приведена на рис. 10.



Рис. 10 – Удельные энергозатраты при сушке кофейного шлама в ИК-модуле

На графике (рис. 10) прослеживается тенденция к увеличению энергоэффективности процесса с уменьшением количества подведенной энергии. Температура продукта во всех опытах не превышала 65 °С.

**Кинетика экстрагирования масла кофе.** Высушенный шлам готов к процессу извлечения кофейного масла. Наиболее ценными компонентами кофейного шлама, целесообразными для дальнейшей переработки являются: кофейное масло (7 – 12%), целлюлоза и лигнин (60 – 75%), смесь вкусо-ароматических веществ (кофеоль) – (3 – 5%), белок (5 – 7%) [1, 3]. В зависимости от характера растворителя удалось получить две разновидности кофейного масла: чистое и ароматизированное, содержащее ароматические и красящие вещества кофе.

Изучалось влияние таких факторов, как температура, характер растворителя и вид подведенной энергии на скорость процесса экстрагирования. Интенсификация процесса массопереноса из твердой фазы шлама осуществлялась подведением микроволновой энергии поля частотой 2450 кГц при мощностях 85 – 127 Вт. Использовались режимы импульсного и непрерывного воздействия поля, а также температуры от 40 °С до кипения растворителя при гидромодуле 1:3.

Для исследований использовались органические растворители: неполярные гексан и нефрас, и полярный – спирт. Неполярные растворители воздействию микроволнового излучения не подвергаются, их нагрев осуществляется за счет содержащейся в сырье воды. Полярные растворители, такие как этанол, в микроволновом поле нагреваются. Известно, что спирт и гексан извлекают из продукта различные компоненты, соответственно состав и качество полученного масла различны.

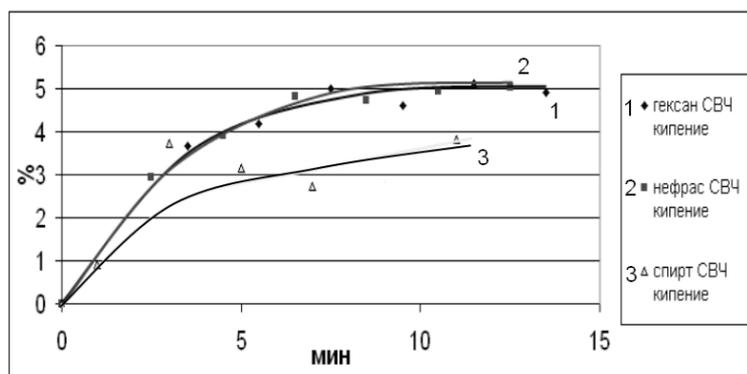


Рис. 11 – Влияние характера растворителя на скорость процесса экстрагирования

Скорость экстрагирования масла гексаном и нефрасом одинакова, а выход масла больше, чем при экстрагировании спиртом (рис.10). В то же время спирт извлекает красящие и ароматические вещества кофе, не растворимые в гексане.

Влияние способа подвода энергии показано на рис. 12.

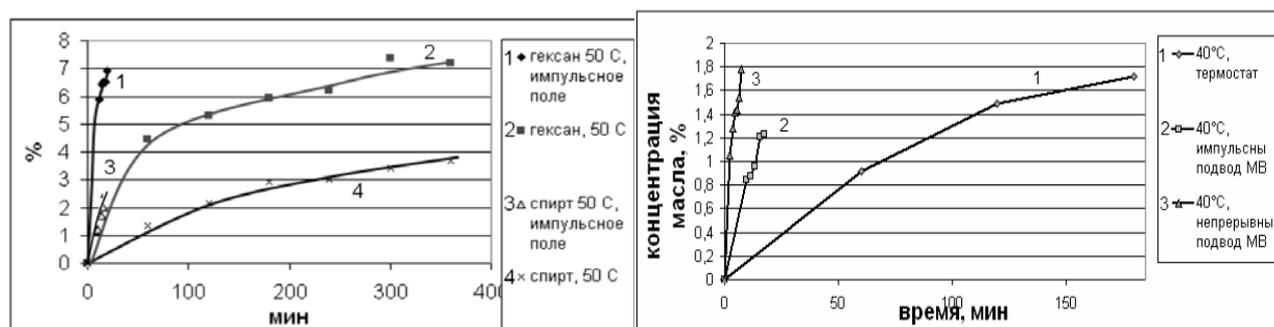


Рис. 12 - Зависимость скорости экстрагирования от характера подведенной энергии

На рис. 12 видно значительное ускорение процесса экстрагирования при подводе микроволновой энергии. Продолжительность процесса сокращается с нескольких часов до нескольких минут при температурах ниже температуры кипения растворителя. Таким образом микроволновая интенсификация процесса массопереноса при экстрагировании может найти широкое применение для извлечения термолабильных компонентов, извлечение которых в условиях кипения недопустимо. Отмечено также, что непрерывный подвод микроволновой энергии существенно интенсифицирует процесс экстрагирования кофейного масла спиртом по сравнению с импульсным.

**Выводы.** Применение электромагнитных излучений для интенсификации процессов массопереноса в технологиях пищевых концентратов позволяет повысить энерго- и ресурсоэффективность производства. Новые подходы позволяют не только усовершенствовать существующие технологии сушки гороха и круп, но и создать новые линии по переработке отходов, позволяющие не только снизить нагрузку на окружающую среду, но и получить новые ценные продукты.

### Литература

1. Бурдо О.Г. Процеси переробки шламу в технологiях виробництва розчинної кави / Бурдо О.Г., Терзієв С.Г., Шведов В.В. Ружицька Н.В. // Наукові праці ОНАХТ, - Одеса. – 2010. – Вип. 37. – С. 252 – 255.
2. Kathiravan K. Infrared Heating in Food Processing: An Overview / Kathiravan Krishnamuthy, Harpreet Kaur Khurana, Soojin Jun, J. Irudayaraj, and Ali Demirci // COMPREHENSIVE REVIEWS IN FOOD SCIENCE AND FOOD SAFETY – Vol. 7. – 2008. – P. 2 – 13.
3. Бурдо О.Г., Ряшко Г.М. Экстрагирование в системе «кофе- вода».- Одесса, 2007.- 176с.