

**КОМБИНИРОВАННЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ОБЕЗВОЖИВАНИИ СЫРЬЯ****О.Г. Бурдо, И.И.Яровой, О.М. Кураков***Одесская национальная академия пищевых технологий, г.Одесса, Украина*

**Введение.** Традиционные подходы [1, 2] в технологиях сушки столкнулись с непреодолимым противоречием. С одной стороны, для интенсификации процессов тепломассопереноса требуется увеличивать скорость (т.е. расход) сушильного агента. С другой стороны, чем больше расход теплоносителя, тем больше теряется тепловой энергии с выбросами установки. Представляется, что выход для решения обозначенного противоречия связан с изменением принципов подвода энергии к зерну. Новая техническая идея, которая защищается в этой работе, основывается на 2 положениях [2, 3]. Во-первых, следует снять с воздуха задачи теплоносителя, а оставить только задачи диффузионной среды, среды, которая обеспечивает эффективный «прием» влаги из продукта. Во-вторых, организовать объемный подвод энергии к продукту. Реализация первого положения позволит существенно сократить потери теплоты с отработавшим воздухом, а второго – серьезно сократить время процесса.

**Механизмы переноса влаги из капиллярнопористых тел.** Согласно общепринятой классификации П.А. Рабиндера существует 3 формы физической связи влаги с материалом. Представляется, что разные по физической сути виды связи требуют и разные механизмы их разрыва. Причем, это не обязательно должны быть только диффузионные процессы. Все определяют движущие силы, которые могут иметь разнообразную природу. В настоящее время созданы новые, перспективные виды оборудования, эффективность работы которых сложно объяснить с позиций современной теории сушки. Из этого следует:

- 1) техника обезвоживания развивается стремительней, чем теоретические обоснования новых принципов удаления влаги;
- 2) процессы удаления влаги из материала часто не соответствуют понятию «сушка», движущие силы этих процессов не отвечают диффузионным принципам;
- 3) часто, обезвоживание – это комплекс комбинированных, сопряжено протекающих процессов, что требует корректного учета действительных механизмов переноса влаги.

Исходя из этого, анализируются возможные схемы переноса влаги (табл.1). Представляется, что возникающие при описании процесса сушки проблемы объясняются тем, что авторы, сторонники феноменологического подхода, рассматривают сушку как некий один процесс с постоянными коэффициентами переноса и формируют модели из этих предположений. В данной работе выдвигается гипотеза, что сушка – это результат действия, на принципе суперпозиции, по меньшей мере, трех процессов: перенос влаги с поверхности твердого тела, перенос влаги в стесненных условиях капилляров и десорбция влаги. Каждый из этих процессов характеризуется своим значением движущей силы и кинетическим коэффициентом скорости процесса. Для разных процессов эти параметры могут существенно отличаться. Каждый из трех процессов подчиняется своим законам переноса, и реализуются за счет разных механизмов (табл. 1). Механическое удаление влаги с поверхности тела проводят при, так называемой «фильтрационной сушке». При удалении влаги в среду перегретого водяного пара осуществляется типичный теплоперенос испарением. Эти процессы нельзя называть «сушкой» и моделировать их диффузионными механизмами. И вопрос здесь не столько в терминологии, сколько в принципах построения полных моделей процессов обезвоживания.

Таблица 1

## Схемы и механизмы переноса влаги из капиллярнопористых тел

Форма связи влаги	Механизм удаления влаги	Процесс	Движущая сила процесса	Коэффициент скорости процесса
Поверхностная	Механический	Центрифугирование Фильтрование	Разность давлений	Скорость потока влаги
	Термический	Среда перегретого пара	Разность температур	Коэффициент теплоотдачи
	Диффузионный	Конвективная диффузия	Разность парциальных давлений	Коэффициент массоотдачи
Капиллярная	Механический	гидродинамический	Разность давлений	Скорость потока влаги
	Термический	Испарение	Разность температур	Коэффициент теплоотдачи
	Диффузионный	Диффузия в стесненных условиях	Разность парциальных давлений	Коэффициент массоотдачи
Абсорбционная	Диффузионный	Десорбция влаги	Разность парциальных давлений	Коэффициент массоотдачи

Диффузионная модель сушки должна учитывать распределение во времени поверхностной влаги ( $U_P$ ), влаги в капиллярах ( $U_K$ ) и адсорбционно- связанной влаги ( $U_A$ ). При такой постановке усложняются как граф тепловлагоденоса (рис.1), так и система уравнений А.В.Лыкова, увеличится число феноменологических коэффициентов  $k_{ij}$  [4].

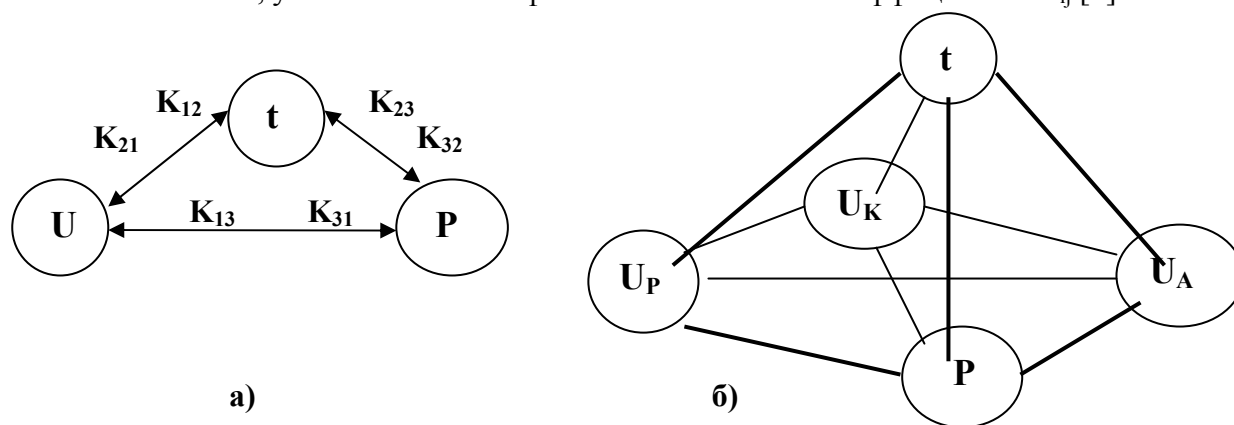


Рис.1. Граф тепловлагоденоса при сушке:  
а) – традиционный подход, б) – предлагаемая модель

Выдвинутая гипотеза не противоречит фундаментальным представлениям физики влажного капиллярно-пористого тела. Общеизвестна схема П.А.Ребиндера форм связи влаги [2]. Удаление влаги разных форм связи – это разные процессы со своими коэффициентами переноса, со своим потенциалом, движущей силой (табл.2).

Таблица 2

## Характеристика основных процессов при сушке

№	Процесс	Механизм процесса	Движущая сила процесса	Кинетический коэффициент
1	Испарение влаги с поверхности	Конвективная диффузия	$a_k P_{II} - P_B$	$\beta_k$
2	Испарение влаги внутри капилляров, пор	Конвективная диффузия в стесненных условиях	$a_c P_{II} - P_B$	$\beta_c$
3	Десорбция влаги	Конвективная диффузия	$a_d P_{II} - P_B$	$\beta_d$

Попытка коррекции движущей силы с помощью показателя активности воды  $a_i$  известна в мировой практике [2].

**Комбинированные процессы обезвоживание продукта при электромагнитном подводе энергии (ИЭМ).** Техническая идея способа ИЭМ удаления влаги основывается на специфичном характере градиентов температур и влагосодержаний в продукте при объемном, электромагнитном подводе энергии.

Возникает вопрос моделирования процесса при ИЭМ подводе энергии. Предложено [2] новое число энергетического воздействия:  $B_u = N (r V \rho)^{-1}$  для учета влияния действия ИЭМ. Число  $B_u$  устанавливает соотношение между энергией излучения и той энергией, которая необходима для преобразования в пар всей воды ( $V$ ), которая находится в продукте. В соотношении ( $r$  – теплота фазового перехода,  $a$   $\rho$  – плотность воды).

В предложенном способе за счет ИЭМ часть жидкости переходит в паровую фазу и внутри капилляра растет давление  $P_K$ . При определенных условиях, это давление становится больше, чем давление воздуха  $P_B$ . Возникает движущая сила ( $P_{ГД} = P_K - P_B$ ). Отдельные капилляры, где достигнуты условия для генерации паровой фазы, начинают периодически выбрасывать в воздух жидкость, без ее испарения. Иницируется гидродинамический поток из капилляров, сопротивление которому на порядок ниже того, которое преодолевает массовый поток. Влага из нанокapилляров выбрасывается в микрокапилляры, преодолевая соответствующее диффузионное сопротивление. Частота таких выбросов и число функционирующих капилляров растет с ростом  $N$  - мощности излучения.

Исходя из этих положений поставлен следующий эксперимент, в котором продувка воздухом слоя зерна проводилась импульсно и чередовалась с действием ИЭМ (рис.2).

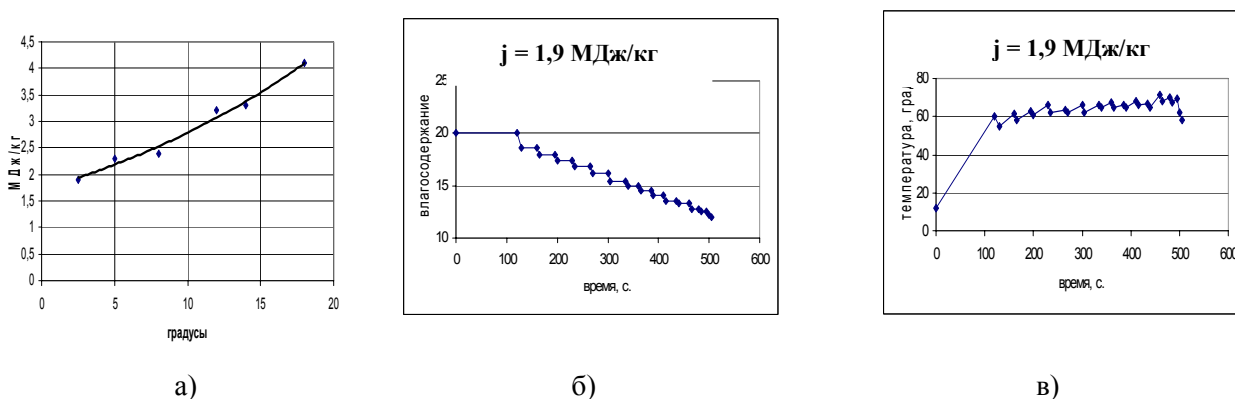


Рис.2. Влияние величины охлаждения продукта на удельные затраты энергии (а), линия убыли влаги (б) и термограмма (в) процесса

Уровень энергетических затрат (рис.2) показывает, что удаление влаги проходит в виде пара и в виде тумана. Анализ результатов опытов показал, что удельные затраты энергии

связаны с диапазоном изменения температур, особенно в режиме продувки (фльтрации) продукта. И, действительно, такая корреляция обнаружена, что позволяет сделать вывод, что достигнутый в опытах уровень энергетических затрат ( $j$ ) ниже удельной теплоты фазового перехода для воды.

Из анализа рис. 2 можно сделать два вывода:

- существует четкая зависимость между величиной изменения температуры при продувке продукта и значением удельных затрат энергии на удаление влаги из продукта (рис.2,а);

- достигнутый в опытах уровень энергетических затрат ниже удельной теплоты фазового перехода для воды.

Второй вывод убедительно подтверждает выдвинутую гипотезу о возможности в условиях ИЭМ обезвоживания без обязательного полного парообразования.

Так подтверждена выдвинутая гипотеза о возможности в условиях ИЭМ организации обезвоживания без обязательного полного парообразования.

Структура уравнения в обобщенных переменных для условий неподвижного слоя сырья, ИЭМ подводе энергии и потока диффузионной среды имеет вид:

$$Sh = A (Re)^n (Sc)^m (Bu)^k \quad (1)$$

Перспективным способом при организации процесса сушки является технология микроволновой (МВ) обработки сырья, имеющая целый ряд важных отличий от традиционных методов обезвоживания.

**Схема экспериментального стенда.** Для проведения комплексных исследований был создан стенд, состоящий из микроволновой камеры с магнетроном мощностью 800 Вт и лабораторных весов (рис.3).



Рис. 3. Стенд для исследования кинетики обезвоживания в электромагнитном поле

В качестве растительного сырья исследовалось зерно пшеницы, размещенное плотным слоем, на подвесе весов в центре микроволновой камеры. Экспериментальная часть исследований включала серию опытов с различными нагрузками (весом зерна) и различной мощностью МВ излучения подводимого к камере. Результаты измерения веса и температуры слоя фиксировались программно – аппаратным комплексом стенда.

В непрерывном режиме компьютер обрабатывал информацию, которая поступала с весов и от термодатчиков, и выводил на монитор линии трендов массы продукта, линии сушки и скорости сушки продукта, температуры продукта, воздуха в камере, сухого и влажного термометров на выходе воздуха из камеры (рис.4).

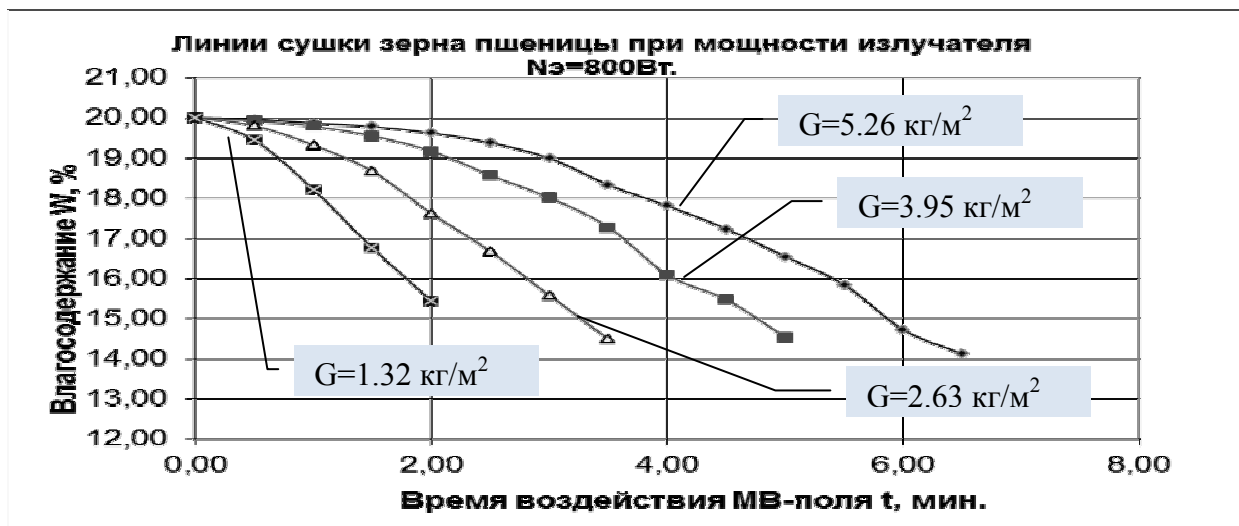


Рис.4. Кинетика сушки пшеницы в микроволновом поле

При различной, но постоянной в каждой серии опытов мощности микроволнового излучения, изменялась удельная масса зерна в пределах  $G=1.32-5.26$  кг/м<sup>2</sup>. Данные о влагосодержании зерна регистрировались по показаниям электронных весов по балансу массы. По полученным в результате серии данным определены зависимости изменения влагосодержания зерна при неизменной мощности микроволнового излучения. При меньших мощностях динамика процесса пропорционально снижается. Снижение скорости сушки не наступало до окончания эксперимента. Также прослеживалась прямая зависимость между скоростью сушки и мощностью излучения.

**Опытный образец установки.** За основу для построения установки принят ленточный конструктив с модульным принципом компоновки сушильных секций. В качестве отправных точек для построения установки были выбраны следующие параметры: каждый из трех модулей должен включать микроволновую и инфракрасную камеры, скорость ленточного привода и производительность питателя должны регулироваться в широких пределах, мощность излучателей каждого модуля должна ступенчато регулироваться в пределах 30 – 100% мощности магнетрона, регулирование мощности – импульсная модуляция. Предварительная исследовательская работа и опыт сотрудников кафедры позволили в короткий срок построить экспериментальную установку (рис.5) и приступить к отработке основных технических решений и ее испытаниям.

Технические характеристики экспериментального образца приведены в табл.4.

Таблица 4

Основные характеристики сушильной установки

Потребляемая электрическая мощность:	≤ 6,0 KVA
Выходная мощность МВ излучателей:	≤ 2,4 KW (ручное упр.)
Выходная мощность ИК излучателей:	≤ 3 KW (ручное упр.)
Скорость конвейера:	0-0,3 m/min (ручное упр.)
Габаритные размеры установки:	3000*600*1200 mm
Материал тоннеля:	Нержавеющая сталь



Рис.5. Экспериментальный образец микроволновой ленточной сушилки разработанной и изготовленной в ОНАПТ

### **Выводы.**

Перспективный шаг в эволюции сушильных установок связан с задачей организации частичного механического обезвоживания, что возможно при комбинации бародиффузионных технологий и принципов фильтрационной сушки. Результаты комплексных исследований разработанного экспериментального образца микроволновой сушильной установки подтвердили перспективность предложенных технических решений для многоцелевой микроволновой обработки растительного сырья. Естественно, что предложенные принципы требуют ряда конструкторских решений для обеспечения точности, безопасности и производительности промышленных установок.

### **Литература**

1. Бурдо О.Г. Энергетический мониторинг пищевых производств – Одесса: Полиграф, 2008 – 244с.
2. Бурдо О.Г. Эволюция сушильных установок – Одесса: Полиграф, 2010 – 368с.
3. Бурдо О.Г. Эволюция сушильных установок. Энергетический аспект /Труды межд. науч. тех. сем. Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов. – Воронеж: 2010.- с. 478-487.
4. Бурдо О.Г., Терзиев С.Г., Яровой И.И., Ружицкая Н.В. Исследование модуля ленточной сушилки растительного сырья с комбинированным электромагнитным подводом энергии// Труды IV Международной научно-практической конференции «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов СЭТТ-2011». – Т.1, Москва, 2011. – С. 422 – 426.