

2. Потапов В. О. Исследование энергоэффективности процесса сушки в тепломассобменных модулях с внутренним нагревателем / В. О. Потапов, С. М. Якушенко // 36. наук. пр. – Одеса : ОНАХТ, 2010. – Выпуск 37. – С. 32–37.
3. Потапов В. О. Кінетика сушіння: аналіз і керування процесом : монографія / В. О. Потапов. – Х. : ХДУХТ, 2009. – 250 с.

Отримано 30.03.2012. ХДУХТ, Харків.

© В.О. Потапов, С.М. Якушенко, 2012.

УДК 535-1:536

А.А. Завалий, канд. техн. наук (ЮФ НУБиП Украины «КАТУ», Симферополь)

И.В. Янович, (ЮФ НУБиП Украины «КАТУ», Симферополь)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОСА В УСТРОЙСТВАХ ИНФРАКРАСНОЙ СУШКИ ПРОДУКТОВ ПИТАНИЯ

Описано конструкцію експериментальної інфрачервоної сушильної камери. Розроблено системи та методики вимірювання режимних параметрів процесу інфрачервоного сушіння: температури, вологості повітря, маси продукту, щільності теплових потоків.

Описана конструкция экспериментальной инфракрасной сушильной камеры. Разработаны системы и методики измерения режимных параметров процесса инфракрасной сушки: температуры, влажности воздуха, массы продукта, плотности тепловых потоков.

The design of an experimental infrared drying chamber. Developed systems and methods for measuring operational parameters of the process of infrared drying temperature, air humidity, the mass of the product, the heat flux density.

Постановка проблемы в общем виде. Инструментальной основой выполнения экспериментальных исследований процесса инфракрасной (ИК) сушки являются экспериментальные установки, включающие в себя системы управления режимами сушки, продукты сушки, методы и средства измерения физических величин. При выполнении эксперимента измерению подлежат: температура продукта сушки, температура воздуха в объеме сушильного устройства, относительная влажность воздуха в объеме устройства, масса продукта сушки, лучистый тепловой поток, падающий на поверхность лотка сушильной камеры [1]. Режим сушки задают временными зависимостями тепловой мощности, затрачиваемой на процесс сушки, и интенсивности воздухообмена устройства сушки.

Анализ последних публикаций. Для задания режима сушки используют стандартные средства автоматики, включающие в себя электронные выключатели, таймеры, реле времени и регуляторы [2]. Для контроля физических величин применяют системы измерения: первичные преобразователи физической величины; аналого-цифровые преобразователи (АЦП); преобразователи цифрового сигнала АЦП для передачи на регистрирующее устройство; компьютерные регистрирующие устройства; программное обеспечение регистрации экспериментальных данных [3].

Цель и задачи работы. Целью работы является разработка комплекса экспериментального оборудования и методик экспериментального исследования процессов тепло- и массопереноса в устройствах ИК-сушки. Для достижения поставленной цели в работе решены следующие задачи:

- разработана экспериментальная ИК-сушильная камера и системы задания режимов сушки;
- обосновано применение физической модели продукта сушки;
- разработаны системы и методики измерения температуры, влажности воздуха, массы продукта в процессе сушки и плотности тепловых потоков излучения.

Изложение основного материала исследования. Экспериментальная инфракрасная сушильная камера (рис. 1) имеет рабочий объем в виде параллелепипеда основанием 950x850 мм и высотой 2000 мм.

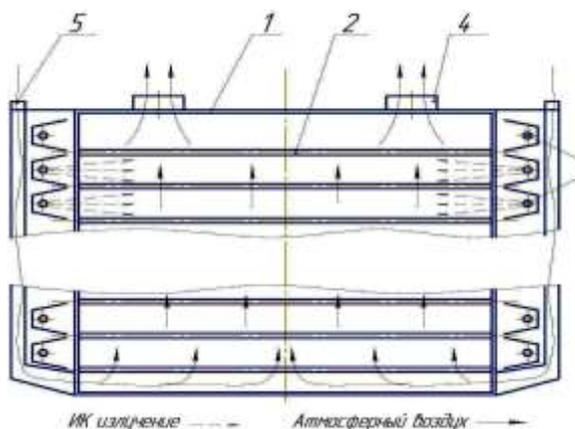


Рисунок 1 – Схема сушильной камеры КС-2: 1 – камера; 2 – лоток; 3 – ИК-излучатель; 4 – вентилятор; 5 – канал подачи воздуха с тканевым фильтром

В рабочий объем друг над другом на высоте 100...200 мм устанавливаются прямоугольные лотки с сетчатым основанием, на которых размещается продукт сушки. По бокам рабочего объема установлены ИК-излучатели, представляющие собой профилированные зеркально отражающие поверхности из листового алюминия толщиной 0,5 мм [4]. Источниками ИК излучения служат линейные газонаполненные лампы накаливания с рабочей температурой спирали 2500 К. Стенки камеры выполнены из стального листа с алюмоцинковым покрытием. Внутренние поверхности стенок покрыты теплоизоляцией – алюминиевой зеркально отражающей фольгой с нанесенным на нее вспененным полиэтиленом толщиной 3 мм. Воздух в нижнюю часть рабочего объема камеры поступает через отверстия в крыше камеры по вертикальным каналам. Система питания и управления камерой включает в себя источники излучения, вытяжной вентилятор, электронные выключатели (симисторные усилители мощности), тиристорные регуляторы мощности, контроллер. Система питания позволяет отдельно управлять включением-выключением каждого излучателя, а также плавно изменять частоту вращения вытяжного вентилятора. Контроллер позволяет с помощью встроенных таймера, позиционного регулятора и ПИ-регулятора устанавливать режимы сушки постоянного и периодического теплового облучения.

Физическая модель продукта сушки обеспечивает воспроизведение свойств продукта в начале сушки и позволяет существенно уменьшить стоимость экспериментальных исследований процессов переноса тепла и массы. Физическая модель представляет собой войлочные полосы и цилиндры, пропитанные водой или водным раствором желатина. Влага в структуре войлока удерживается адсорбцией и физико-механической связью. Коллоидную связь влаги моделируют растворы желатина [1]. Перед сушкой пыжи (пластины) выдерживаются в воде или растворе желатина в течение 30 минут. После этого для стекания остатков жидкости пыжи (пластины) выкладываются на сито, на котором находятся в течение 5...10 минут. Концентрация желатина в растворе составляет 0,5...1,5%. Для обоснования применения физической модели выполнены сравнительные сушки модели и продуктов питания: яблок, моркови, свеклы, виноградной выжимки. Различие в скорости сушки указанных продуктов и модели (рис. 2), не превышающее 10%, позволяет использовать физическую модель для экспериментального исследования таких характеристик процесса сушки как равномерность теплового воздействия на продукт сушки в рабочем объеме, оценка

влияния режимов сушки на энергетические затраты и др.

Система измерения температуры создана на базе контроллера Д-ИТ-8ТП-RST [2] и включает в себя: 8 термпар типа К (хромель-алюмель), изготовленных из проволоки диаметром 0,3 мм, покрытой кремнийорганической электроизоляцией, с неизолированным спаем; контроллер, адаптер RS485/USB, персональный компьютер и программное обеспечение для регистрации экспериментальных данных. Система обеспечивает измерение и регистрацию температуры в диапазоне $-40 \dots 300^\circ \text{C}$ с разрешающей способностью $0,1^\circ \text{C}$ при частоте регистрации 0,1 Гц. Для уменьшения методических погрешностей измерения температуры воздуха в рабочем объеме камеры измерительные преобразователи экранируются от излучения источников. Чувствительные элементы термопреобразователей выполнены в виде спиралей для снижения кондуктивного стока тепла от чувствительного элемента к элементам конструкции преобразователя.

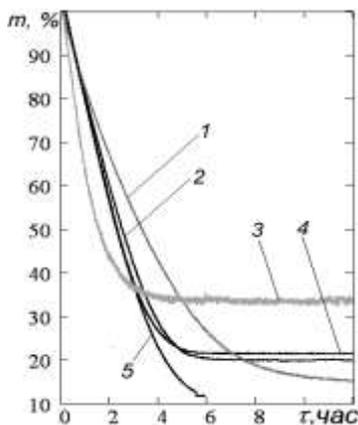


Рисунок 2 – Кривые сушки яблок (1), свеклы (2), пыжей с 1,5%-м раствором желатина (4), виноградной выжимки (3), моркови (5)

Система измерения относительной влажности и температуры воздуха построена на базе микропроцессорного преобразователя температуры и относительной влажности воздуха ДВ-05-RS [2]. Преобразователь измеряет влагосодержание и температуру воздуха, далее встроенный микропроцессор вычисляет значения относительной влажности воздуха и передает их на компьютер через адаптер RS485/USB. Преобразователь позволяет измерять значения

относительной влажности воздуха в диапазоне 0...100% (без конденсации) при температуре 0...85° С. Погрешность измерения влажности составляет 2%, температуры – 0,5%; разрешающая способность измерений – 0,1% влажности. Для измерения влажности в рабочем объеме ИК сушильной камеры преобразователь размещается в корпусе, выполненном из зеркально отражающего алюминия, для защиты от попадания на него потока излучения от источников.

Система непрерывного контроля массы продукта сушки включает в себя (рис. 3) механизм подвеса лотка, раму, 4 тензодатчика балочного типа, суммирующую коробку, контроллер тензодатчиков с возможностью передачи данных на компьютер. Тензодатчики крепятся на раме, которая состоит из двух балок соединенных резьбовыми стержнями. Регулируемые по высоте опоры рамы позволяют устанавливать ее на крыше сушильной камеры и позиционировать в горизонтальной плоскости. Через отверстия в крыше камеры тензодатчики тросами связаны с механизмом подвеса, назначение которого – нагружение тензодатчиков и защита их от разрушения в процессе загрузки камеры. Механизм подвеса в разгруженном состоянии позволяет лотку лежать на направляющих камеры. На тензодатчики при этом действует только масса тросов механизма подвеса. В процессе сушки механизм удерживает лоток во взвешенном состоянии. Длина тросов позволяет взвешивать любой лоток или группу лотков по высоте камеры. Контроллер тензодатчиков воспринимает их сигнал через суммирующую коробку, выполняет преобразования, отображает измеренное значение массы на цифровом индикаторе и передает на компьютер по протоколу RS-232. Предложенная система непрерывного контроля массы позволяет выполнять измерение массы в диапазоне 1...15000 г, с разрешающей способностью 1 г и погрешностью не более 5%.

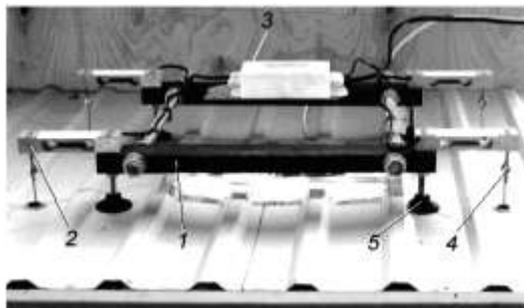


Рисунок 3 – Рама весов в сборе: 1 – рама; 2 – тензодатчик; 3 – суммирующая коробка; 4 – трос механизма подвеса; 5 – резьбовая опора

Система измерения тепловых потоков включает в себя 3 термоэлектрических биметаллических преобразователя теплового потока (ПТП); 2 термопары типа К; 8 канальный измеритель температуры Д-ИТ-8ТП-RST; преобразователь интерфейса RS-485/USB; персональный компьютер; универсальный цифровой мультиметр DT9208A; программы регистрации и представления данных; систему термостатирования ПТП. ПТП размерами 80x40x2 мм выполнены в виде вспомогательной стенки и содержат термоэлектрические чувствительные элементы [5]. Для определения температуры ПТП в его среднем сечении размещен термоэлектрический преобразователь типа К.

Система термостатирования ПТП позволяет поддерживать значения температур лицевой стенки ПТП и воздуха в камере близкими по величине, что практически устраняет конвективно-кондуктивный теплообмен поверхности ПТП с воздухом в камере. Полезный сигнал ПТП представлен практически полностью лучистым тепловым потоком от источников излучения. Система термостатирования состоит из теплообменника, циркуляционного насоса и накопительной емкости объемом 100 л. Для проведения теплотрического эксперимента температура воды в емкости уравнивается с температурой в помещении. Вода, прошедшая через теплообменник, выливается на поверхность воды в емкости. Значительные площадь испарения (около 0,12 м²) и объем воды обеспечивают быстрое охлаждение и постоянство температуры воды в емкости в течение эксперимента

Теплообменник обеспечивает равномерное охлаждение поверхностей закрепленных на нем ПТП. Теплообменник представляет собой полый корпус квадратного сечения с размерами 40x40x80 мм, изготовленный из алюминиевого сплава. В корпусе установлена сердцевина-дефлектор с ребрами для направления движения жидкости и трубки для подачи и удаления воды диаметром 10 мм. Сердцевина крепится в корпусе при помощи болтов. Конструкция теплообменника предложена Декушей Л.В. Три ПТП закреплены на гранях теплообменника (рис. 4) при помощи прозрачной клейкой ленты. Свободной гранью теплообменник установлен на деревянной пластине с захватами. С помощью захватов теплообменник устанавливается на направляющей балке с возможностью его перемещения вдоль балки.

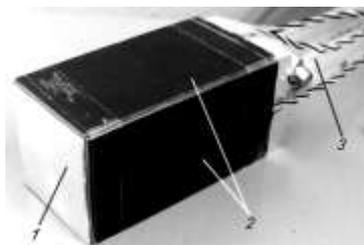


Рисунок 4 – Теплообменник в сборе с ПТП: 1 – теплообменник; 2 – ПТП; 3 – трубки для подвода-отвода охлаждающей воды

Направляющая балка выполнена из П-образного металлического профиля и позволяет устанавливать теплообменник с ПТП в плоскости лотка в 19-ти положениях по ширине и в 8-ми по глубине камеры. Для фиксации направляющей балки в плоскости лотка балка оснащена полозьями, устанавливаемыми на направляющие камеры. Последние предназначены для установки в камеру лотка с продуктом сушки. Таким образом, установленный ПТП имеет верхнюю поверхность, размещенную в сечении лотка (рис. 5).

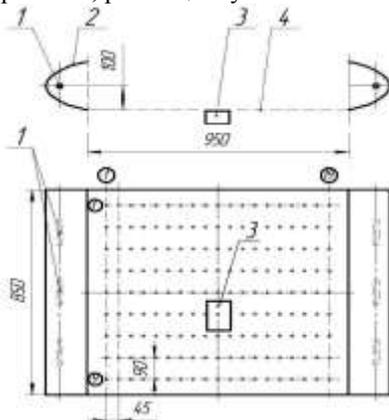


Рисунок 5 – Схема расположения ПТП в рабочем пространстве камеры при измерении тепловых потоков: 1 – лампа ИК; 2 – отражатель; 3 – теплообменник с ПТП; 4 – уровень поверхности лотка;

① – ⑨ ряды измерений, ⑦ – ⑲ – положения ПТП в рядах

В эксперименте измерению подлежат: тепловой поток, падающий на три грани теплообменника; температура ПТП; температура воздуха в камере; температура воды на выходе из теплообменника. В течение эксперимента с целью поддержания

температуры воздуха в камере близкой температуре в помещении и, соответственно, температуре охлаждающей жидкости двери камеры полностью открыты. Для уменьшения потерь излучения передняя часть рабочего пространства камеры закрывается экраном из алюминиевой зеркально отражающей фольги. Измерения выполняются в течение 5 минут в каждом положении ПТП. Значение теплового потока в определенном положении ПТП вычисляется как среднее выборочное из 20...30 зарегистрированных значений теплового потока.

Для выделения из показаний ПТП только лучистой составляющей теплового потока, поступающей от излучателей, в эксперименте определено значение коэффициента теплообмена α на поверхности ПТП. Для этого выполнена регистрация показаний ПТП при его фиксированном положении в средней части рабочего объема камеры в течение времени, соответствующего, времени выполнения теплотемрического эксперимента. Изменение теплового потока, регистрируемое ПТП, соответствует конвективно-кондуктивно-лучистому потоку тепла от окружающего воздуха и стенок камеры. Лучистый тепловой поток от источников излучения в течение эксперимента постоянный. Численное значение коэффициента теплообмена определяется по результатам двух измерений теплового потока и температуры поверхности ПТП по зависимости:

$$\alpha = \frac{q_1 - q_2}{T_{n1} - T_{n2}} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{n2}^4 + T_{n1}^4) - (T_{n2}^4 + T_{n1}^4), \quad (1)$$

где q_1 и q_2 – значения плотности теплового потока, измеренные при температуре поверхности ПТП T_{n1} и T_{n2} ; ε – степень черноты системы излучатель-приемник; $\sigma = 5,68 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) – постоянная Стефана-Больцмана.

Определенные в эксперименте значения α для ПТП на левой, правой и верхней гранях теплообменника, составили соответственно: $\alpha_1 = 3,56 \pm 0,12$ Вт/(м²·К); $\alpha_2 = 3,46 \pm 0,10$ Вт/(м²·К); $\alpha_3 = 1,5 \pm 0,08$ Вт/(м²·К) при доверительной вероятности 95%. Величины α_1 и α_2 определяют теплоотдачу на вертикальной стенке и могут быть усреднены значением $\alpha = 3,51 \pm 0,18$ Вт/(м²·К).

Выводы. Созданный экспериментальный комплекс позволяет исследовать процессы теплопереноса и массопереноса в инфракрасных сушильных камерах, исследовать кинетику инфракрасной сушки продуктов питания, оптимизировать режимы сушки постоянного и периодического теплового облучения.

Список литературы

1. Лыков А. В. Теория сушки / А. В. Лыков. – М. : Энергия, 1968. – 472 с.
2. Каталог продукции АОЗТ "Тера" [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <<http://www.ao-tera.com.ua/list/ru/products.html>>
3. Денисенко В. В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием / В. В. Денисенко. – М. : Горячая линия; Телеком, 2009. – 608 с.
4. Завалий А. А. Влияние формы отражающих поверхностей на равномерность облучения продукта сушки в инфракрасной сушильной камере / А. А. Завалий, И. В. Янович // Пищевая наука и технология. – 2010. – № 4 (13). – С. 91–95.
5. Приборы для теплофизических измерений : Каталог. – К. : ИТТФ НАН Украины, 2008. – 67 с.

Получено 30.03.2012. ХГУПТ, Харьков.

© А.А. Завалий, И.В. Янович, 2012.

УДК 532.529

Р.Л. Якобчук, канд. техн. наук (*НУХТ, Київ*)

В.Л. Яровий, канд. техн. наук (*НУХТ, Київ*)

ВПЛИВ КОНСТРУКТИВНИХ ЧИННИКІВ ВІДЦЕНТРОВО-ПНЕВМАТИЧНОЇ ФОРСУНКИ НА ДИСПЕРСІЙНІСТЬ ФАКЕЛА РОЗПИЛЕННЯ ПИВНИХ ДРІЖДЖІВ

Проведено аналіз чинників, які впливають на процес розпилення дріжджової суспензії, встановлено залежність медіального діаметра краплин пивних дріжджів від швидкості газорідної суміші у відцентрово-пневматичній форсунці та розподілення краплин дріжджів у факелі форсунки.

Проведен анализ факторов, влияющих на процесс распыления дрожжевой суспензии, установлена зависимость медіального диаметра капель пивных дрожжей от скорости газожидкостной смеси в центробежно-пневматической форсунке и распределение капель дрожжей в факеле форсунки.

An analysis of factors influencing the process of spraying a suspension of yeast, established the dependence of the medial diameter of the drops of brewer's yeast on the speed of gas-liquid mixture in a centrifugal-pneumatic nozzle and the distribution of the drops of yeast in the facula injector.

Постановка проблеми у загальному вигляді. Для розв'язання задач, пов'язаних із динамікою руху двофазних дисперсних систем та тепломасобміном у цих системах, необхідно знати дисперсний склад