УДК 621.365.46

DOI: 10.31563/1684-7628-2018-47-3-84-88

В.М. Попов, В.А. Афонькина, В.Н. Левинский

ПРОБЛЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИНФРАКРАСНЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ ВЫСОКОВЛАЖНОГО СЫРЬЯ

Ключевые слова: высоковлажный; объемное тело; электромагнитное излучение; пленочный инфракрасный электронагреватель; цилиндр; плотность лучистого потока; интегральная чувствительность; оптический фокус.

Введение. Во многих отраслях промышленности и сельского хозяйства приходится сталкиваться с необходимостью снижения влажности различных продуктов и материалов. Применительно к сельскому хозяйству и перерабатывающим отраслям промышленности это связано с общей задачей повышения сохранности плодовоовощной и прочей сельскохозяйственной продукции, для чего в последние десятилетия были разработаны многочисленные технологии сушки различных продуктов.

Установки для сушки сельскохозяйственной продукции классифицируются по целому ряду признаков, одним из важнейших является признак по способу подвода тепла к влажному материалу. К этому признаку можно отнести сушилки: конвективные (высушиваемый материал омывается потоком предварительно нагретого сушильного агента), контактные (непосредственный контакт высушиваемого материала с нагреваемой поверхностью), радиационные (высушивание под действием инфракрасного излучения либо под действием электромагнитного поля высокой и сверхвысокой частот) [1].

Применительно к сушке высоковлажного биологического сырья, к которому относятся, как правило, объемные тела с содержанием влаги более 40 %, весьма перспективно использовать инфракрасное излучение. Основным пре-

имуществом ИК-сушки является то, что интенсивность испарения влаги по сравнению с конвективной или контактной сушкой может быть увеличена в несколько раз за счет подвода к сырью более значительных удельных потоков тепла. Однако по технологическим условиям сушки высоковлажного биологического сырья увеличить скорость пропорционально увеличению теплового потока невозможно, так как она определяется не скоростью подвода тепла к поверхности, а скоростью перемещения влаги внутри материала и способностью воды, содержащейся в сырье, максимально поглощать ИК-излучение, а также требуемым качеством сушки материала (сохранением вкусовых, питательных, биологических свойств и т. д.).

Цель исследования – создание инфракрасных сушильных установок для сушки высоковлажного биологического сырья с оптимизированными параметрами.

Задачи исследования: 1) выбрать наиболее рациональные параметры геометрии системы «облучатель – объект» для проектирования инфракрасных установок сушки объемного высоковлажного биологического сырья; 2) выбрать ИК-излучатель и его размещение в корпусе сушильной установки, при котором будет равномерное распределение энергии электромагнитного излучения.

Материалы и методы исследования. Вопросу проектирования инфракрасных сушильных установок исследователи всегда уделяли много внимания. Результаты таких исследований широко представлены в научных работах Меляковой О.А., Алтухова И. В., Попова В.М., Афонькиной В.А. и др. [2, 3, 4], однако данные исследования направлены на проектирование сушки тонких термолabileльных материалов; для толстых объемных тел расчеты сушильной установки не производились.

Важно помнить, что при проектировании сушильных установок для инфракрасной сушки под энергией понимается энергия электромагнитного излучения, которая в технологическом процессе проходит этапы генерации, распространения в пространстве и поглощения в объеме. Энергия электромагнитного излучения характеризуется различными параметрами, а именно во времени, по спектру, в пространстве, по поверхности.

Из классификации оптических электротехнологий Карпова В.Н. [5], сушка с.-х. продукции и материалов относится к технологическому процессу фотофизического действия, в которой оптическое излучение производит полезный нагрев с целью удаления влаги. Основными влияющими на биологический объект параметрами рассмотренной классификации являются поверхностная плотность потока излучения и спектральное распределение энергии потока.

Поверхностное облучение объекта осуществляется одним или несколькими источниками излучения, причем, исходя из требуемых значений облученности и ее равномерности распределения по поверхности объекта, выбирают наиболее рациональные параметры геометрии системы «облучатель – объект».

$$q_0 = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_s}} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] [\text{ккал/м}^2 \cdot \text{ч}]. \quad (2)$$

Выражение $\frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_s}} = C_{np}$ носит

название приведенного коэффициента лучеиспускания.

Так как $C_1 = \varepsilon_1 C_s$ и $C_2 = \varepsilon_2 C_s$, то

$$C_{np} = \frac{C_s}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad \text{или} \quad C_{np} = \varepsilon_{np} C_s.$$

Для двух концентрических бесконечно длинных цилиндров, имеющих поверхности лучистого теплообмена F_1 и F_2 , формула лучистого теплообмена имеет вид [5]:

Излучение элементарной площадки поверхности тела в окружающее пространство (в полусферу) определяется законом Стефана – Больцмана (рисунок 1).

Рисунок 1

Схема направленного излучения

Излучение той же элементарной площадки dF в определенном направлении φ равно:

$$dq_\varphi = dq_n d\Omega \cos \varphi dF = \frac{1}{\pi} C \left(\frac{T}{100} \right)^4 dF d\Omega \cos \varphi. \quad (1)$$

Здесь dq_φ – излучение по нормали, в π раз меньше излучения в полусфере; $d\Omega$ – элементарный телесный угол; φ – угол между направлением излучения и нормалью к излучающей площадке.

Формула (1) известна под названием закона Ламберта.

На основании вышеизложенных законов излучения можно получить расчетные формулы лучистого теплообмена между отдельными телами.

Лучистый теплообмен между двумя телами с бесконечно большими плоскопараллельными поверхностями, имеющими температуры T_1 и T_2 (в °К) и коэффициенты лучеиспускания C_1 и C_2 , выражается формулой

$$q = \frac{C_s F_1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \quad (3)$$

где C_s – коэффициент лучеиспускания для черного тела; F_1 – площадь внутреннего цилиндра; F_2 – площадь внешнего цилиндра; ε_1 – степень черноты внутреннего цилиндра; ε_2 – степень черноты внешнего цилиндра; T_1 – температура поверхности внутреннего цилиндра; T_2 – температура поверхности внешнего цилиндра.

Эта формула может быть применена в случае лучистого теплообмена двух тел, когда одно тело охватывает другое, причем F_1 всегда должно быть меньшей поверхностью [6].

Рисунок 2

Пленочный инфракрасный электронагреватель НЭП

Для проектирования инфракрасных сушильных установок данное выражение (3) имеет место в том случае, если на стенках внутреннего и внешнего цилиндров расположить плоский ИК-излучатель, который смог бы принять форму цилиндра. В этом случае расположенный между цилиндрами объект при заданном значении об-

лученности нагревателя получил равномерное распределение энергии электромагнитного излучения. Это станет наиболее рациональными параметрами геометрии системы «облучатель – объект» при проектировании инфракрасных установок для объемного высоковлажного биологического сырья.

Применение данного выражения для проектирования инфракрасных сушильных установок стало возможным с появлением пленочных инфракрасных электронагревателей (рисунок 2) [7].

Для подтверждения сказанного проведены эксперименты, в которых определялось влияние геометрической формы пленочного электронагревателя на изменение плотности лучистого потока с использованием оптического инфракрасного датчика; принцип его действия основан на оценке вольтовой интегральной чувствительности продукта [8].

В процессе опытов рассмотрены три геометрические формы пленочного электронагревателя (рисунок 3):

Рисунок 3

Геометрические формы пленочного электронагревателя

Рисунок 4

Зависимость интегральной чувствительности от высоты расположения оптического инфракрасного датчика при различных геометрических формах пленочного электронагревателя

Для *первой геометрической формы* оптический инфракрасный датчик устанавливался на разной высоте от плоскости пленочного нагревателя.

Для *второй геометрической формы*, 1/2 цилиндра по длине изгиба НЭП, с радиусом 0,25 м оптический инфракрасный датчик устанавливался в оптическом фокусе [9], равном радиусу геометрической формы, а также на высоте выше и ниже оптического фокуса.

Для *третьей геометрической формы*, 1/2 цилиндра по ширине изгиба НЭП, с радиусом 0,08 м оптический инфракрасный датчик устанавливался в оптическом фокусе, равном радиусу геометрической формы, а также на высоте выше и ниже оптического фокуса.

Результаты и их обсуждение. По результатам изменения интегральной чувствительности в зависимости от высоты расположения оптического инфракрасного датчика при различных геометрических формах пленочного электронагревателя построен график зависимости (рисунок 4).

Как видно из графика, у плоской геометрической формы НЭП пик интегральной чувствительности наступил на высоте 0,15 м от плоскости до оптического датчика, ниже он практически не изменялся, а выше – уменьшался.

Рассматривая вторую геометрическую форму, мы видим, что в оптическом фокусе (0,25 м) и при высоте датчика ниже оптического фокуса замечается линейная стабильность интегральной чувствительности, а выше оптического фокуса – небольшой ее спад, однако в сравнении с первой геометрической фигурой результаты данной формы выше.

Третья геометрическая форма показала самые высокие показатели, а именно, в оптическом фокусе (0,08 м) и ниже его мы получили самый высокий показатель интегральной чувствительности, на 20–30 % больший, чем у первой и второй геометрических форм.

Вывод. При проектировании сушильной установки высоковлажного сырья в конструкции необходимо использовать корпус цилиндра, как наиболее рациональный параметр геометрии системы «облучатель – объект», это следует из выражения (3) для двух концентрических бесконечно длинных цилиндров. На стенке цилиндра следует разместить гибкий пленочный инфракрасный нагреватель, это подтверждено экспериментами, где определялось влияние геометрической формы пленочного электронагревателя на изменение плотности лучистого потока.

Библиографический список

1. Атаназевич, В.И. Сушка пищевых продуктов [Текст]: справочник / В.И. Атаназевич. М.: Дели, 2000. 296 с.
2. Попов В.М., Проблемы проектирования и эксплуатации электротехнологических установок [Текст] / В.М. Попов, В.А. Афонькина // Достижения науки – агропромышленному производству. Материалы пятьдесят второй международной научно-технической конференции. Челябинск: ФГБОУ ВПО ЧГАА, 2013. С. 227–232.
3. Алтухов, И.В. Экспериментальная ИК-установка для сушки плодов и овощей [Текст] / И.В. Алтухов, В.Д. Очиров, В.А. Федотов // Вестник ИРГСХА. Иркутск: Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского, 2017. С. 90–96.
4. Мелякова, О.А. Энергоэкономичные режимы сушки овощей в конвективно-радиационной сушилке [Текст]: дис. ... канд. тех. наук: 05.20.00 / О.А. Мелякова. Тюмень: 2001.
5. Карпов, В.Н. Энергосбережение в оптических электротехнологиях АПК [Текст] / В.Н. Карпов, С.А. Ракутько // Прикладная теория и частные методики. 2009. С. 8–13.
6. Некрасова, Н.М. Промышленные электротермические установки [Текст] / Н.М. Некрасова, Л.С. Кацевич, И.П. Евтюкова // Государственное энергетическое издательство. 1961. С. 26.
7. Попов, В.М. К вопросу об инфракрасной сушке томатов [Текст] / В.М. Попов, В.А. Афонькина, В.Н. Левинский // Достижения науки – агропромышленному производству. Материалы пятьдесят пятой международной научно-технической конференции. Челябинск: ФГБОУ ВО Южно-Уральский ГАУ, 2016. С. 267–274.
8. Афонькина, В.А. Инфракрасная сушка термолабильного сырья на примере зеленых культур [Текст]: дис. ... канд. тех. наук: 05.20.02: защищена 20.02.15: утв. 05.06.15 / В.А. Афонькина. Челябинск: ЧГАА, 2015. 73 с.
9. Кривченко, И.В. Введение в оптику. Тема 14 [Текст] / И.В. Кривченко // Физика 9 класс. М., 2015. 150 с.

Сведения об авторах

1. **Попов Виталий Матвеевич**, доктор технических наук, доцент кафедры энергообеспечения и автоматизации технологических процессов, ФГБОУ ВО Южно-Уральский ГАУ, 457100, Челябинская область, г. Троицк, ул. Гагарина, 13, e-mail: ntc-es@mail.ru.

2. **Афонькина Валентина Александровна**, кандидат технических наук, доцент кафедры энергообеспечения и автоматизации технологических процессов, ФГБОУ ВО Южно-Уральский ГАУ, 457100, Челябинская область, г. Троицк, ул. Гагарина, 13, e-mail: afva82@mail.ru.

3. **Левинский Василий Николаевич**, соискатель, учебный мастер кафедры энергообеспечения и автоматизации технологических процессов, ФГБОУ ВО Южно-Уральский ГАУ, 457100, Челябинская область, г. Троицк, ул. Гагарина, 13, e-mail: lv_74rus@mail.ru.

В статье обозначена проблема проектирования инфракрасных сушильных установок для сушки высоковлажного биологического объемного сырья. Рассмотрены классификации оптических электротехнологий, их параметры и признаки, предложены наиболее рациональные параметры геометрии системы «облучатель – объект» при проектировании инфракрасных установок

для объемного высоковлажного биологического сырья, а именно выражение лучистого теплообмена для двух цилиндров при условии расположения плоского ИК-излучателя на стенках внешнего и внутреннего цилиндров. Приведены результаты эксперимента в виде графика зависимости интегральной чувствительности от высоты расположения оптического инфракрасного датчика.

V. Popov, V. Afonkin, V. Levinsky

PROBLEMS OF DESIGNING OF INFRARCRIES FOR HIGH-SCIENTIFIC RAW MATERIALS

Key words: *high-moisture; volumetric body; electromagnetic radiation; film electric heater; cylinder; radiant flux density; integrated sensitivity; optical focus.*

Authors' personal details

1. **Popov Vitaly**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of Energy Supply and Automation of Technological Processes, South Ural State Agrarian University, 457100, Chelyabinsk Region, Troitsk, Gagarin st., 13, e-mail: ntc-es@mail.ru.

2. **Afonkina Valentina**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Energy Supply and Automation of Technological Processes, South Ural State Agrarian University, 457100, Chelyabinsk Region, Troitsk, Gagarin st., 13, e-mail: afva82@mail.ru.

3. **Levinsky Vasily**, the competitor, the educational master of the Department of Energy supply and automation of technological processes, South Ural State Agrarian University, 457100, Chelyabinsk region, Troitsk, Gagarin st., 13, e-mail: lv_74rus@mail.ru.

The article outlines the problem of designing infrared drying plants for drying high-moisture biological bulk material. The classifications of optical electrotechnologies, their parameters and characteristics are considered, as a result of which the most rational parameters of the geometry of the irradiator-object system are proposed in the design of infrared installa-

tions for volumetric high-moisture biological raw materials, namely, the expression of radiant heat transfer for two cylinders provided that a plane IR emitter Walls of the outer and inner cylinders. The experimental results are presented in the form of a graph of the dependence of the integral sensitivity on the height of the location of the optical infrared sensor.

© Попов В.М., Афонькина В.А., Левинский В.Н.