

В. П. Дуценко, А. Ф. Буляндра, В. А. Таракон, Ю. П. Луцик

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МЕТОДА ЭЛЕКТРОТЕПЛОВОЙ АНАЛОГИИ ДЛЯ РАСЧЕТА РЕЗУЛЬТИРУЮЩИХ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ, ПОГЛОЩАЕМЫХ КОЛЛОИДНЫМИ КАПИЛЛЯРНОПОРИСТЫМИ ТЕЛАМИ В ПРОЦЕССЕ СУШКИ

Приведены результаты экспериментального исследования кинетики эффективных коэффициентов теплопроводности и результирующих тепловых потоков при сушке картофельного крахмала.

Для инженерных расчетов сушильных установок и рациональной организации процессов сушки, а также для анализа процессов тепло- и массопереноса необходимо знать кинетику тепловых потоков $q(t)$, поглощенных материалом.

Прямое определение тепловых потоков требует создания специальных приемников лучистой энергии и знания кинетики изменения оптических свойств материалов, и в общем случае представляет большие экспериментальные трудности.

Поэтому значительный интерес представляет использование для этих целей метода электротепловой аналогии (ЭТА), который требует знания кинетики послойного изменения эффективных коэффициентов теплопроводности $\lambda_{эф}$.

Эта задача нами решалась при помощи электронинтегратора ЭИМП-3/66 с сеточной $R-C$ -моделью, выполненной из магазинов сопротивлений $R-33$, моделирующих $\lambda_{эф}$, и наборов пленочных неполярных емкостей типа МПГТ, моделирующих объемную теплоемкость c_v [1].

Для расчета $q(t)$ были использованы результаты проведенных опытов по исследованию терморadiационной сушки навозного картофельного крахмала при одностороннем нагреве «светлыми» ИК излучателями и естественной конвекции воздуха. Величина облученности на поверхности крахмала при этом составляла 4300 Вт/м^2 , толщина слоя засыпки 15 мм. Послойные температуры измерялись при помощи медно-константановых термпар, расположенных на различной глубине и фиксировались на диаграммной ленте автоматического потенциометра ЭПП-09М1. Регистрация убыли массы влажного крахмала и автоматическая запись осуществлялась с помощью специальных весов [2].

На рис. 1 представлены послойные температурные кривые сушки крахмала с начальным влагосодержанием $U_0 = 30\%$. На основе этих кривых по методике [3] были определены коэффициенты $\lambda_{эф}$, временные изменения которых по отдельным слоям засыпки представлены на рис. 2, а, б.

Как видно, изменение $\lambda_{эф}$ в процессе сушки имеет сложный характер, который обусловлен общими закономерностями внутреннего тепло-влагопереноса. Увеличение $\lambda_{эф}$ в слоях, близких к середине засыпки, сл

дует пояснить интенсивным развитием термодиффузного переноса влаги, который имеет место примерно в течение 30 мин сушки и достигает при этом глубин $x=9$ мм. Увеличение значений $\lambda_{\text{эф}}$ обусловлено также повышением температуры в слоях. В поверхностных слоях уменьшение $\lambda_{\text{эф}}$ следует, очевидно, увязывать с расположением зоны испарения.

Для $\tau > 30$ мин характер кривых $\lambda_{\text{эф}} = f(x)$ сильно изменяется. Резкое увеличение $\lambda_{\text{эф}}$ для $\tau > 30$ мин (рис. 2, а) мы объясняем тем, что кривые при $\tau > 30$ мин размещены практически горизонтально, т. е. для $x > 10$ мм температуры в слоях одинаковы. Вследствие того что $q = -\lambda \text{grad } t$ (при ограниченных значениях q), при сильном уменьшении $\text{grad } t$ значение $\lambda_{\text{эф}}$ резко увеличивается.

В поверхностных слоях значения $\lambda_{\text{эф}}$ будут значительно ниже. Значит, перенос влаги термодиффузией в этих слоях отсутствует, так как влага монослоя является не термоактивной [4]. Это приводит к исчезновению максимумов на кривых $\lambda_{\text{эф}} = f(x)$. Дальнейшее некоторое увеличение $\lambda_{\text{эф}}$ в поверхностных слоях связано с диффузионным переносом влаги к поверхности крахмала. Значительное уменьшение $\lambda_{\text{эф}}$ для нижних слоев крахмала в конце сушки, очевидно, связано с интенсивным испарением влаги этих слоев и переносом тепла молярным путем к поверхности тела по уже хорошо сформированной в объеме поровой структуре.

Полученные результаты по исследованию кинетики $\lambda_{\text{эф}}$ использованы для расчета зависимостей $q(\tau)$. Тепловой поток, идущий на нагрев материала $q_1(\tau)$, реализуется эквивалентным током в модели процесса. Связь между величинами q_1 и I выражается следующей зависимостью:

$$q_1 = \frac{\lambda_{\text{эф}} R \Delta t_{\text{max}}}{U} \quad (1)$$

Методика определения $q_1(\tau)$ такова. Длительность сушки разбивается на интервалы времени Δt , соответствующие Δt при снятии температур-

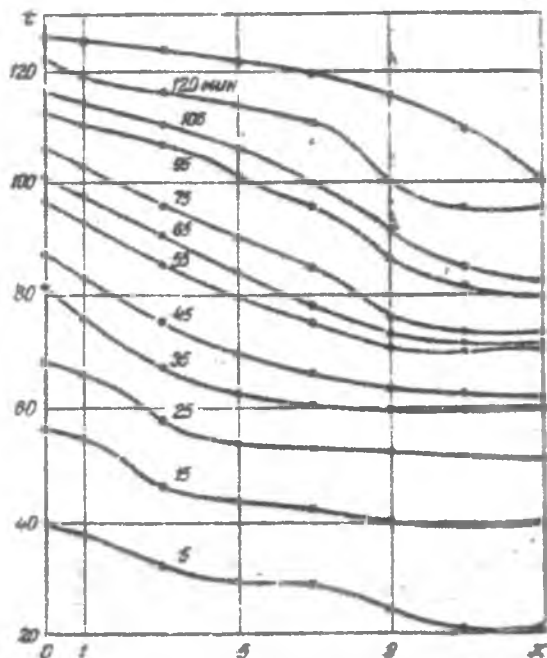


Рис. 1. Температурное поле при термораднационной сушке крахмала. t , °C; x , мм.

ного поля материала. Для каждого интервала Δt для отдельных слоев тела на модели набирались сопротивления, соответствующие значениям $\lambda_{\text{эф}}$. При помощи специального устройства для задания граничных условий второго рода через ограничивающее сопротивление $R_{\text{г.у-II}}$ подавался ток на границу модели. Варьируя величины $R_{\text{г.у-II}}$ добивались такого значения тока через модель, чтобы температура на границе изменялась по известному закону для данного интервала времени.

Величины токов рассчитывались по формуле

$$I = \frac{U_{\text{г.у}} \cdot \frac{U}{2}}{R_{\text{г.у-II}}} \quad (2)$$

В нашем случае $U_{\text{г.у}} = 290$ в. Напряжения питания модели равно 25 в. Зная величины I , по формуле (1) рассчитывались тепловые потоки $q_i(\tau)$ для каждого момента времени.

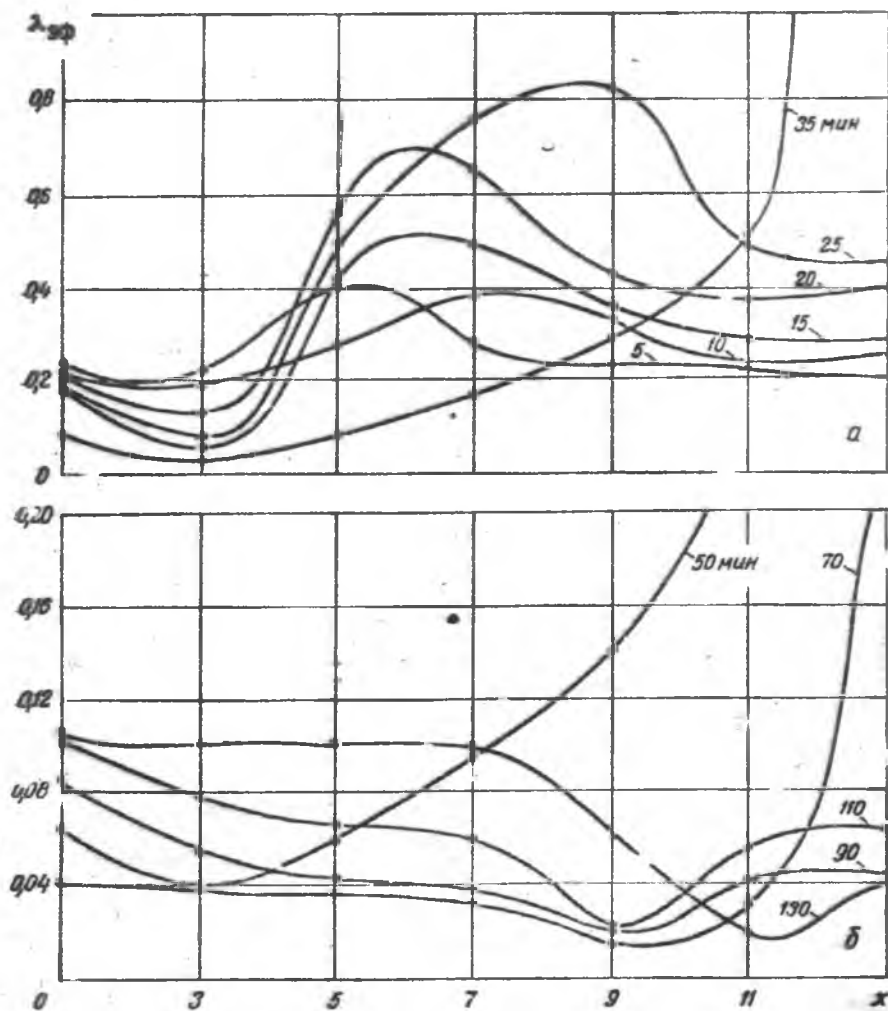


Рис. 2. Кинетика периодического изменения эффективных коэффициентов теплопроводности $\lambda_{\text{эф}}$ (вт/м град) при сушке крахмала: а — τ от 5 до 35 мин; б — τ от 50 до 130 мин

Исходя из кривой сушки (рис. 3, кривая 1) и примерного учета зависимостей теплопотока испарения от форм связи [5], рассчитывался тепловой поток, идущий на испарение, $q_2(\tau)$.

Как видно из рис. 3, в начальный период наблюдается некоторый рост $q(\tau)$, что можно объяснить неустановившимся распределением полей влагосодержания в период прогрева крахмала. В период постоянной скорости сушки тепловой поток почти не изменяется, а затем падает. Это объясняется увеличением отражательной способности крахмала с уменьшением влагосодержания и повышением температуры поверхности, а также приближением объема тела к стационарному режиму.

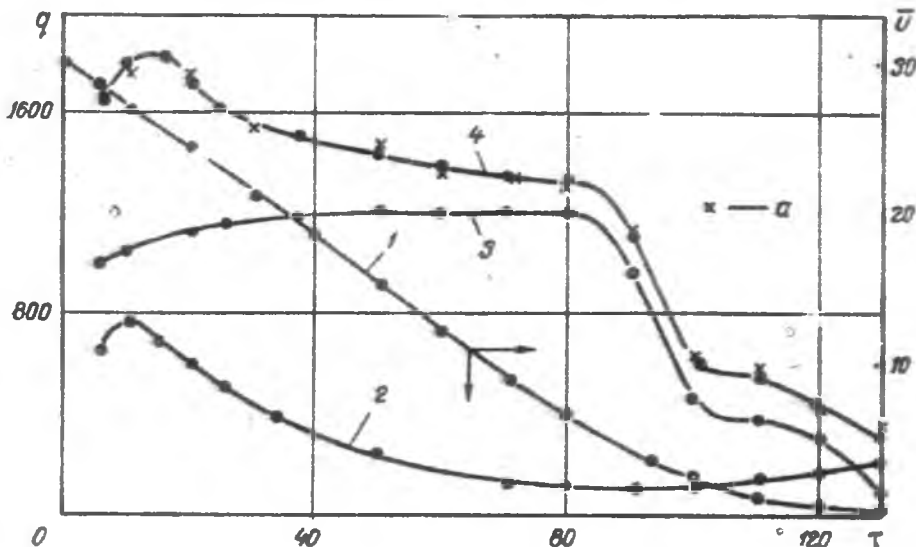


Рис. 3. Кинетика сушки крахмала (1) и поглощаемый тепловой поток q , Вт/м^2 , идущий на нагрев (2) и испарение (3); 4—результрующий тепловой поток (сплошная кривая—с использованием метода ЭТА, а — по методике А. В. Лыкова)

Результрующий тепловой поток также может быть рассчитан по методике А. В. Лыкова [4], использующей обобщенную переменную Rb . Результаты этих исследований представлены на кривой 4 (рис. 3) экспериментальными точками. Как видно, результаты, полученные по обоим методам, дают хорошее совпадение и расхождение не превышает в среднем 3—5%. Однако, на наш взгляд, метод ЭТА дает более богатую информацию, является достаточно эффективным, точным и простым в обслуживании.

Обозначения

$q(\tau)$ — результирующий тепловой поток, Вт/м^2 ; $\lambda_{\text{эф}}$ — эффективный коэффициент теплопроводности крахмала, $\text{Вт/м} \cdot \text{град}$; I — величина тока в модели, а; R — сопротивление на единицу длины модели, ом ; Δt_{max} — максимальная разность температуры в процессе сушки, $^{\circ}\text{C}$; $\Delta \tau$ — интервалы времени при сушке, мин ; $U_{r,y}$ — напряжение источника для задания граничных условий второго рода, в; U — напряжение питания модели, в; $q_1(\tau)$ — тепловой поток, идущий на нагрев, Вт/м^2 ; $q_2(\tau)$ — тепловой поток, идущий на испарение, Вт/м^2 ; U_0 — начальное влагосодержание, %; $\bar{U}$ — среднеинтегральное влагосодержание, %.

Nomenclature

$q(\tau)$, net heat flux, W/m^2 ; $\lambda_{\text{эф}}$, effective thermal conductivity of starch, $\text{W/m} \cdot \text{deg}$; I , current strength in model, A; R , resistance per unit length of model, Ohm; Δt_{max} , maximum temperature difference in drying, $^{\circ}\text{C}$; $\Delta \tau$, time interval in drying, min; $U_{r,y}$, voltage of

source for prescription of boundary conditions of the second kind, V ; U , supply pressure of model, V ; $q_1(\tau)$, heat flux for heating, W/m^2 ; $q_2(\tau)$, heat flux for evaporation, W/m^2 ; U_0 , initial moisture content, %; $\bar{U}$, integral mean moisture content, %.

Summary

The results of investigation into the kinetics of effective thermal conductivities and absorbed heat fluxes in thermoradiative drying of potato starch are presented. The models with the electrointegrator ЭИМП-3/66 have been used for investigations.

Figure Captions

Fig. 1. Temperature field in thermoradiative drying of starch; t , $^{\circ}C$, τ , mm

Fig. 2. Kinetics of layer by layer variation of effective thermal conductivity λ_{ef} ($W/m \cdot deg$) in starch drying: a , τ between 5 and 35 min; b , τ between 50 and 130 min.

Fig. 3. Kinetics of starch drying (1) and absorbed heat flux q , W/m^2 for heating (2) and evaporation (3); 4, net heat flux (solid curves, with the use of ETA method a , by A. V. Luikov's methods).

Литература

1. Тарапон А. Г. Моделирование нестационарных полей на интеграторах ЭИМП ИМ АН УССР, 1970.
2. Лисовенко А. Т., Михелев А. Я. ИФЖ, 4, № 9, 1961.
3. Дущенко В. П., Буляндра А. Ф., Лисовенко А. Т., Тарапон В. А., Вербицкий Б. И. Харчова промисловість, № 15, 1972.
4. Луков А. В. Теория сушки. М., «Энергия», 1968.
5. Дущенко В. П., Панченко М. С., Бельдир В. В. Известия вузов, Пищевая технология, № 5, 1966.

[1.X 1974 г.]

Киевский технологический институт
пищевой промышленности