

Б. М. Мисер

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ И ДИФфуЗИЯ
В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

Рига 1977

В.А.Тарапов, А.Ф.Буляндра,

В.П.Душанко

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ЭЛЕКТРОТЕПЛОВОЙ АНАЛОГИИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПРИ ГИДРОТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

При исследовании кинетики эффективных коэффициентов теплопроводности при терморadiационной сушке картофельного крахмала были сделаны допущения:

1. Система дифференциальных уравнений тепломассопереноса, являющаяся математической моделью процесса сушки, заменяется нелинейным уравнением теплопроводности.

2. При моделировании предполагается равномерное распределение влаги по толщине, а учитывается только изменение среднелогарифмического влагосодержания со временем, что обуславливает учет эффективными коэффициентами теплопроводности не только перенос тепла путем переноса массы, но и неравномерное по слою распределение влагосодержания.

Такой подход дает возможность определить изменение по слою эффективных коэффициентов теплопроводности во времени в зависимости от величины энергетической облученности, толщины слоя, начального влагосодержания, используя температурные поля в кривых сушки крахмала.

В этом случае уравнение процесса нестационарной теплопроводности будет иметь следующие крайние условия:

- 1) на облучаемой поверхности крахмала задан закон изменения температуры во времени (граничные условия первого рода);
- 2) на границе крахмала с подложкой граничные условия четвертого рода, т.е. выполняется равенство температур и тепловых потоков;
- 3) на наружной поверхности подложки граничные условия третьего рода;
- 4) начальные условия однородны.

Коэффициент теплообмена подложки α с окружающей средой неизвестен и определяется решением обратной задачи теплопроводности методом ЭП.

Была составлена электрическая модель процесса стационарной теплопроводности, которая наступает в конце сушки, когда поглощаемый поверхностью тепловой поток полностью не идет через подложку в окружающую среду.

При стационарном процессе известны коэффициент теплопроводности сухого крахмала, коэффициент теплопроводности подложки, температура на поверхности крахмала T_1 , на границе крахмала с подложкой T_2 , а также температура окружающей среды T_c . На границу модели (поверхность крахмала) задаем дотермический T_{1c} , соответствующий температуре поверхности T_1 ; на сопротивление R_{α} , моделирующее теплоотдачу подложки, задаем потенциал U_0 , соответствующий температуре окружающей среды. После чего изменяем значение переменного сопротивления R_{α} , пока значение потенциала U_2 на границе крахмала и подложка не будет соответствовать температуре T_2 .

Зная сопротивление R_{α} , определяют коэффициент теплоотдачи

$$\alpha = \frac{\lambda R}{R_{\alpha}}$$

где λ - коэффициент теплопроводности подложки, Вт/м·град;

R - сопротивление на единицу длины изотур, Ом;

R_{α} - сопротивление, моделирующее теплообмен подложки с окружающей средой, Ом.

На рис. I показана электрическая модель для исследования динамики послойных эффективных коэффициентов теплопроводности $\lambda_{\text{эф}}$ картофельного крахмала. Она состоит из R, C цепочки, моделирующей изменение температуры на границе модели, переменных сопротивлений $R_1 - R_n$ и емкостей $C_1 - C_n$, моделирующих соответственно $\lambda_{\text{эф}}$ и объемные теплоемкости $c\gamma$ крахмала, количество их зависит от толщины слоя. Сопротивления $R_{\text{под}1}, R_{\text{под}2}$ и емкость $C_{\text{под}}$ моделируют λ и $c\gamma$ подложки, сопротивление $R_{\text{ок}}$ моделирует отдачу тепла в окружающую среду, цепочки $R_r, C_r, R_{\text{ок}}, C_{\text{ок}}$ моделируют соответственно изменение температуры поверхности крахмала и окружающей среды.

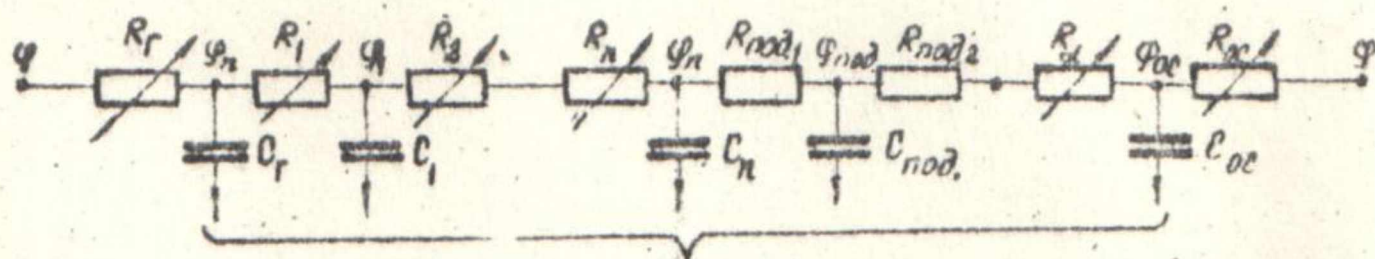


Рис. I. Электрическая модель нестационарной теплопроводности

Методика определения коэффициента $\lambda_{\text{эф}}$ картофельного крахмала подробно описана в литературе [1].

Процесс решения повторяется на каждом этапе во времени до тех пор, пока изменения безразмерных значений потенциалов в каждой точке на модели будут соответствовать изменению температур, полученных экспериментально. Совпадения данных величин добиваются путем соответствующих изменений сопротивлений $R_1 - R_n$, моделирующих $\lambda_{\text{эф}}$.

На рис. 2 в качестве примера представлены результаты исследования послойного изменения $\lambda_{\text{эф}}$ в зависимости от величины облученности.

В поверхностном слое в процессе сушки величина $\lambda_{\text{эф}}$ уменьшается до значений 0,01-0,02 Вт/м·град и к концу сушки приближа-

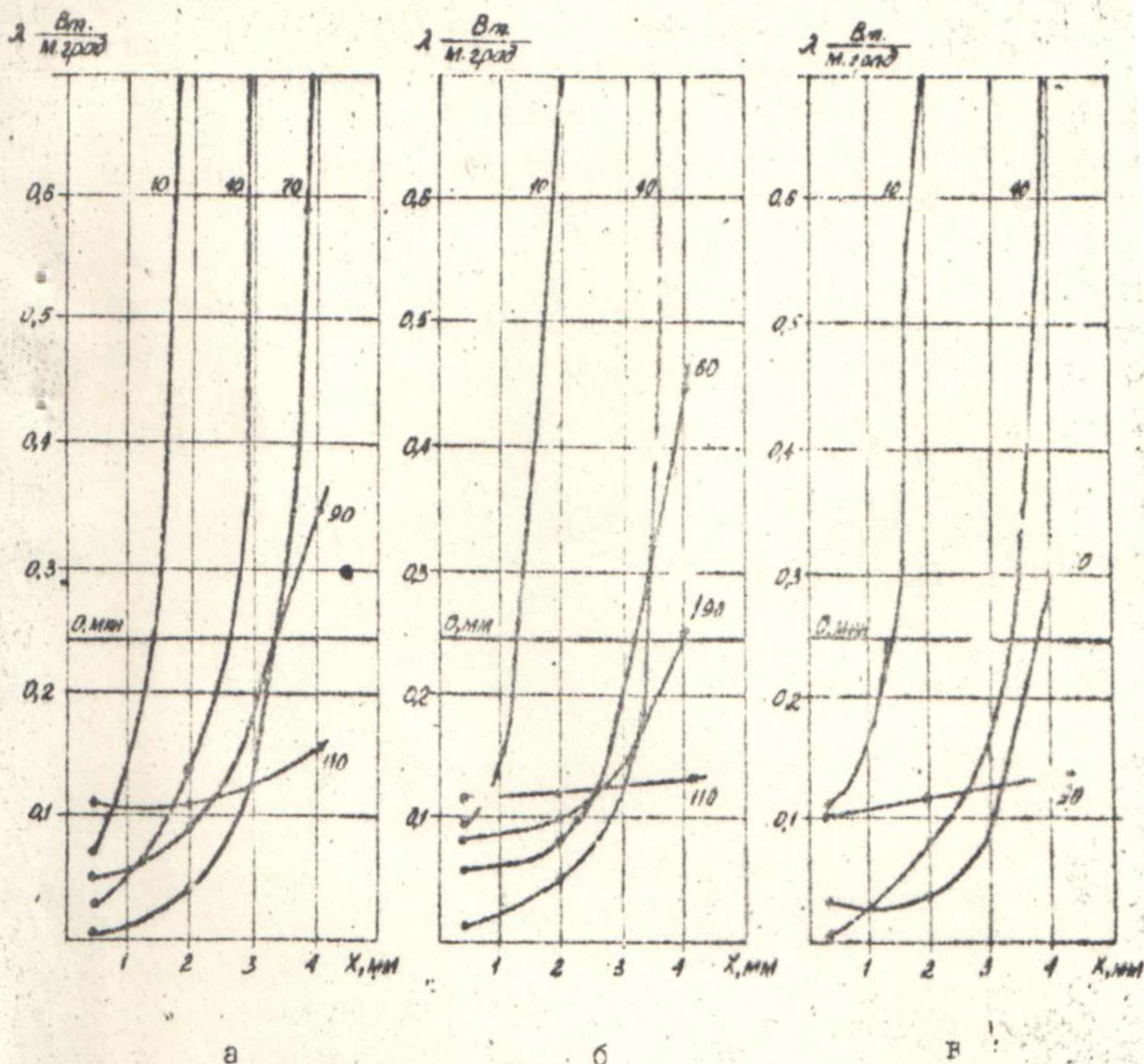


Рис.2. Динамика эффективных коэффициентов теплопроводности в процессе терморегуляционной сушки картофельного крахмала ($M_c=50\%$, $h=5$ мм, а) $E=3100$ Вт/м², б) $E=3500$ Вт/м², в) $E=4200$ Вт/м²).

жаются к коэффициенту теплопроводности сухого крахмала. "Меньшения $\lambda_{\text{эф}}$ в поверхностном слое можно объяснить затратами тепла на испарение. На основе закономерностей изменения $\lambda_{\text{эф}}$ по толщине и во времени можно сделать некоторые предположения о характере перемещения влаги в процессе сушки. Перенос тепла

внутри объема обусловлен, в основном, массопереносом, так как полученные значения $\lambda_{эф}$ стремятся к очень большим величинам по сравнению с λ_c . Поэтому в процессе сушки температура внутренних слоев крахмала по толщине одинакова и изменение ее со временем зависит от $\lambda_{эф}$ поверхностного слоя, от толщины слоя и величины облученности. По мере удаления влаги из крахмала зона внутренних слоев с большими значениями $\lambda_{эф}$ уменьшается, что можно объяснить углублением зоны испарения и уменьшением количества испаряющей влаги. Причем скорость этого процесса зависит от величины облученности и толщины материала. Так, при $E = 3100 \text{ Вт/м}^2$, $U_c = 50\%$ и $h = 5 \text{ мм}$ время существования зоны с большими значениями $\lambda_{эф}$ составляет 80 мин, при $E = 4200 \text{ Вт/м}^2$ - 50 мин.

В конце сушки по всей толщине крахмала величина $\lambda_{эф}$ во всех слоях приближается к коэффициенту теплопроводности сухого крахмала.

При решении численной задачи данные по динамике температурных полей, полученные электромоделированием, качественно и количественно совпадали с данными, полученными опытным путем при сушке крахмала.

Это подтверждает предположение о распределении тепла во влажном материале в процессе сушки теплопроводностью с постоянными коэффициентами теплопроводности $\lambda_{эф}$, учитывающими массоперенос и неравномерное распределение влаги по толщине материала.

Зная величины $\lambda_{эф}$, можно рассчитать плотность тепловых потоков, воспринимаемых поверхностью материала по толщине:

$$q = \frac{(U_0 - U_1) \lambda_{эф} \Delta t_{max}}{R_1}$$

где U_0, U_1 - потенциалы в относительных единицах на границе модели и в первом узле;

R_1 - сопротивление между границей и первым узлом модели;

Δt_{max} - максимальная разность температуры в процессе тепловой обработки материала.

Кинетика плотности тепловых потоков при термостатической сушке картофельного крахмала определялась по параметрам электрической модели, полученным при решении обратной задачи. Такой подход дает возможность учитывать и ту часть теплового потока, воспринимаемого поверхностью крахмала, которая идет на нагрев подложки и теплоотдачу с подложки в окружающую среду.

На рис.3 показана кинетика тепловых потоков при сушке картофельного крахмала.

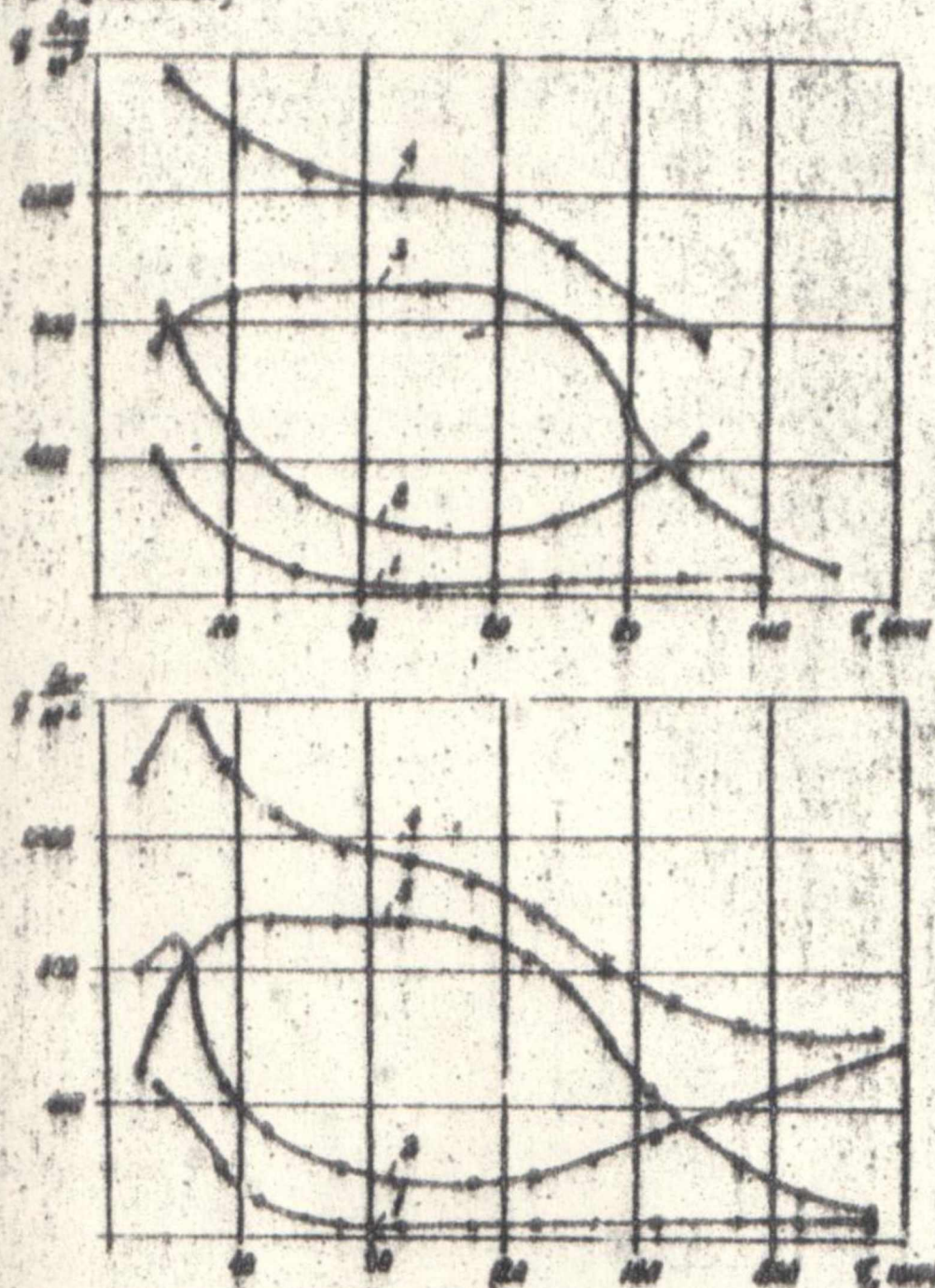


Рис.3. Кинетика плотности тепловых потоков при термостатической сушке картофельного крахмала при $\varepsilon = 3100 \text{ Вт/м}^2$, $U_p = 50\%$, а) $l = 5 \text{ мм}$, б) $l = 10 \text{ мм}$.

- где 1 - тепловой поток, идущий на нагрев картофельного крахмала;
2 - тепловой поток, идущий на нагрев крахмала, подложки и отдаваемый в окружающую среду;
3 - тепловой поток, идущий на испарение;
4 - тепловой поток, поглощаемый поверхностью крахмала.

В начальный период сушки за счет испарения и термостифузии происходит обезвоживание поверхностного слоя, что приводит к увеличению коэффициента отражения ρ . По мере прогрева крахмала, увеличивается подвод влаги к поверхности, что вызывает уменьшение ρ и объясняет некоторый рост теплового потока в период прогрева.

Этот период тем продолжительнее, чем выше начальное влагосодержание и больше толщина слоя. На рис.3а этот период не показан, так как длится менее 10 мин. После чего с уменьшением влагосодержания поверхностных слоев за счет испарения влаги поток q незначительно уменьшается и остается примерно одинаковым в периоде постоянной скорости сушки.

В периоде падающей скорости сушки тепловой поток, воспринимаемый поверхностью, падает. Общая тенденция уменьшения теплового потока в процессе терморадикационной сушки объясняется увеличением коэффициента отражения, а также увеличением температуры поверхности с уменьшением влагосодержания.

Литература

1. Гущенко В.П., Булындра А.Ф., Таранов В.А., Луцких Ю.П. Об использовании метода электротепловой аналогии для расчета разфальтирующих тепловых потоков, поглощаемых коллоидными капиллярно-пористыми телами в процессе сушки. - "Инженерно-физический журнал", вып.28, 1975, №6, с.1040-1044.