

664.661:664.655

О КИНЕТИКЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ И ТЕПЛОВОГО ПОТОКА ПРИ ИНФРАКРАСНОЙ СУШКЕ СУХАРЕЙ

В. П. ДУЩЕНКО, А. Ф. БУЛЯНДРА, В. А. ТАРАПОН, Б. И. ВЕРБИЦКИЙ, А. С. ОСТРИК, В. Х. ЧЕБОТАРЕВ

Киевский технологический институт пищевой промышленности

Для рациональной организации многих технологических процессов пищевой промышленности необходимо знание кинетики поглощаемых тепловых потоков $q(\tau)$ и эффективных коэффициентов теплопроводности $\lambda_{эф} = f(x)$. Аналитический расчет $q(\tau)$ вызывает большие затруднения и для практических расчетов не может быть применен. В связи с этим нами использован наиболее эффективный, на наш взгляд, метод электротепловой аналогии [1].

Послойное изменение эффективных коэффициентов теплопроводности $\lambda_{эф} = f(x)$ и тепловых потоков $q(\tau)$ исследовалось при помощи электроинтегратора ЭИИП-3/66 с сеточной R-C моделью, состоящей из

магазинов сопротивлений R-33, моделирующих $\lambda_{эф}$, и конденсаторов типа МПГТ, моделирующих объемную теплоемкость c_V .

Зависимости $q(\tau)$ и $\lambda_{эф} = f(x)$ определялись нами при терморадационной сушке слобных сухарей при различных величинах облученности.

На рис. 1 а, б показаны результаты исследования кинетики сушки слобных сухарей «Московские» в лабораторных условиях при двустороннем нагреве «светлыми» ИК-излучателями. Величина облученности в этом опыте составляла 5000 Вт/м^2 с каждой стороны. Толщина сухарей 15 мм, начальное влагосодержание $\bar{W} = 38,7\%$. Температура различных слоев сухаря измерялась с помощью медь-константановых термопар и фиксирова-

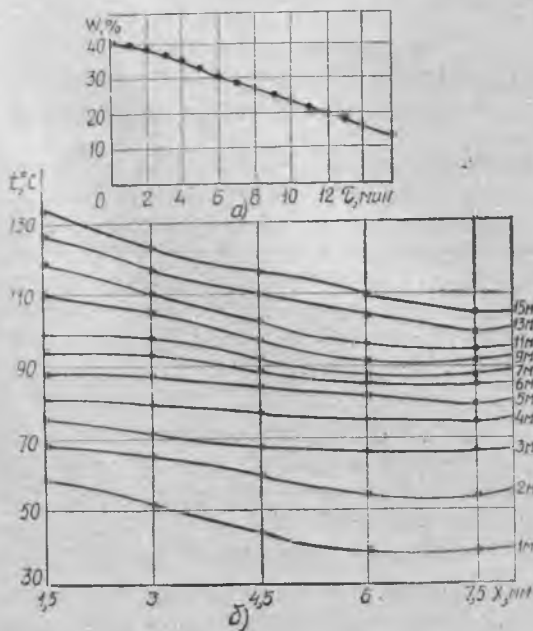


Рис. 1. а — кривая сушки, б — температурное поле.

лась на диаграммной ленте автоматического потенциометра ЭПП-09М1. Учитывая симметричность задачи, приводим температурные кривые до центра объекта исследования. В связи со сложностью и значительными погрешностями определения температуры поверхностных слоев температура на глубине 1,5 мм принималась за температуру поверхности.

Регистрация убыли веса и автоматическая запись осуществлялись с помощью фотовесов и того же потенциометра [2]. Температурные поля, полученные при термораднационной сушке слобных сухарей, использовались для задания начальных и граничных условий. Связь между относительным потенциалом и температурой следующая:

$$\varphi = \frac{t - t_{\min}}{t_{\max} - t_{\min}}, \quad (1)$$

где t_{\min} — минимальная температура при сушке, °С;

t_{\max} — максимальная температура, °С;

t — температура в данный момент времени, °С.

Эффективные коэффициенты теплопроводности $\lambda_{эф} = f(x)$ определялись следующим образом. В начальный момент времени с помощью делителя напряжения на электроемкостях модели устанавливались потенциалы $\varphi = 0$, соответствующие начальной температуре сухарей. Величины сопротивлений R , моделирующих $\lambda_{эф}$, устанавливались одинаковыми и рассчитывались по формуле [1]:

$$R = \frac{c\gamma l^2}{\alpha \cdot \lambda \cdot cn^2}, \quad (2)$$

где $c\gamma$ — объемная теплоемкость, Дж/град·м³;

l — условная единица длины модели;

α — масштаб времени;

λ — коэффициент теплопроводности, Вт/м·град;

C — электроемкость, Ф;

n — количество узлов на условную единицу длины модели.

Затем на декадном и реохордном сопротивлениях электроинтегратора поочередно устанавливались безразмерные потенциалы, соответствующие температуре слоев при $\tau = 1$ мин.

Изменяя сопротивления R , добивались равенства потенциалов на декаде и реохорде с потенциалами в соответствующих точках модели. После этого с помощью делителя напряжения на электроемкости модели подавались потенциалы, соответствующие температуре слоев при $\tau = 1$ мин, а на декадном и реохордном сопротивлениях выставлялись поочередно относительные потенциалы для $\tau = 2$ мин и, меняя сопротивления R , добивались равенства потенциалов на декаде и реохорде и в требуемых узлах модели, и т. д.

Зная величины сопротивлений R по формуле (2), рассчитывались послонные $\lambda_{эф}$. Определение $\lambda_{эф} = f(x)$ решалось с той же дискретностью по времени, что и на рис. 1 б, т. е. через 1 мин. Так как в процессе сушки сухарей объемная теплоемкость $c\gamma$ менялась, соответственно изменялись и величины электроемкости модели C .

Результаты исследований $\lambda_{эф}$ при сушке сухарей «Московских» представлены на рис. 2. Как видно, зависимости $\lambda_{эф} = f(x)$ носят сложный характер. Это объясняется сложным процессом миграции влаги во время сушки.

В начале сушки величины $\lambda_{эф} = f(x)$ значительно возрастали как в поверхностных, так и в центральных слоях. Так, уже на 2-й минуте на

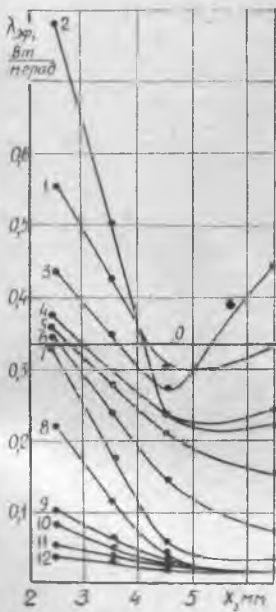


Рис. 2. Кинстика изменения $\lambda_{эф}$. 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 — соответственно на 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11-й минуте от начала сушки. 12 — на 12, 13, 14, 15-й минуте от начала сушки.

глубине 2,5 мм $\lambda_{эф}$ увеличивается примерно в 2,5 раза. Объясняется это тем, что инфракрасные лучи поглощаются в основном поверхностным слоем продукта. При этом температура поверхности резко возрастает, что приводит к интенсивному испарению влаги с поверхности. Миграция влаги в поверхностный слой за счет создавшегося градиента влагосодержания и вызывает увеличение $\lambda_{эф}$.

Резкий рост температуры на поверхности материала приводит к созданию значительного градиента температуры и при высоком влагосодержании в начальный период сушки ($W=38 \div 35\%$, рис. 1 а) приводит к возникновению явления термодиффузии, что хорошо видно из рис. 2 (кривая 3).

Интенсивный прогрев слобных сухарей по всей толщине приводит к тому, что явление термодиффузии сказывается незначительное время. Так, уже после 3-й минуты с уменьшением влагосодержания величины $\lambda_{эф}$ уменьшаются по всей толщине сухаря и в конце сушки становятся примерно одинаковыми.

Зная величины $\lambda_{эф}$, можно определить тепловые потоки $q_n = (\tau)$, идущие на нагрев материала при его тепловой обработке. Связь между тепловым потоком и эквивалентным током в модели следующая. [1]:

$$\bar{q}_n = \frac{I \lambda R \Delta t_{max}}{U} \quad (3)$$

где I — величина тока в модели, A ;

R — сопротивление на единицу длины модели, $Ом/м$;

Δt_{max} — максимальная разность температуры при гигротермической обработке материала, $^{\circ}C$;

U — напряжение питания модели, B .

Величины токов определялись из соотношения:

$$I = \frac{(\varphi_0 - \varphi_1) U}{R_1} \quad (4)$$

где φ_0, φ_1 — потенциалы в относительных единицах на границе модели и в первом узле;

R_1 — сопротивление между границей и первым узлом модели, $Ом$.

Зная убыль массы и зависимость удельной теплоты парообразования от влагосодержания [3], определяли тепловой поток, идущий на

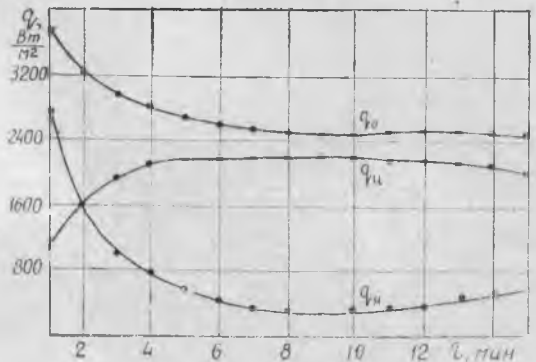


Рис. 3. Тепловые потоки, $Вт/м^2$: q_n — на нагрев $q_{и}$ — на испарение, q_o — общий.

испарение влаги $q_u(\tau)$. Затем рассчитывали общий тепловой поток, поглощаемый сухарями:

$$q_{\text{общ}} = q_u + q_n.$$

Полученные значения тепловых потоков приведены на рис. 3.

Как видно, максимальное значение $q_{\text{общ}}(\tau)$ приходится на начальный период сушки. Объясняется это значительной поглощательной способностью сухарей при больших влагосодержаниях в начале сушки, а также незначительной температурой поверхности. Так как сушка сухарей в основном происходит в периоде постоянной скорости сушки, то, начиная примерно с 4-й минуты, период прогрета прекращается и величина $q_{\text{общ}}(\tau)$ становится примерно постоянной. Это также подтверждается ходом кривых $q_u(\tau)$ и $q_n(\tau)$. В начале сушки большая часть тепла идет на нагрев материала, в периоде постоянной скорости сушки — на испарение.

Знание кинетики поглощаемых тепловых потоков $q(\tau)$ позволяет прогнозировать наиболее эффективные с технологической точки зрения режимы сушки и может быть использовано при тепловых расчетах сушильных установок.

ВЫВОДЫ

1. Для определения кинетики эффективных коэффициентов теплопроводности и поглощенных тепловых потоков в процессе гигротермической обработки капиллярно-пористых тел можно использовать аналоговые методы, в частности, электронинтегратор ЭИНП-3/66.

2. Зависимости $\lambda_{эф} = f(x)$ носят сложный характер, что говорит о сложном процессе миграции влаги, и значительно зависят от влагосодержания и температуры материала.

3. Величина поглощенного поверхностью сухаря теплового потока максимальна в начальный период сушки, затем уменьшается и примерно одинакова в периоде постоянной скорости сушки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тарапон А. Г. Моделирование нестационарных полей на интеграторах ЭИНП ИМ АН УССР, 1970.
2. Лисовенко А. Т., Михелев А. Я. Инж.-физ. ж., 4, № 9, 1961.
3. Дущенко В. П., Панченко М. С., Бельдид В. В. Изв. вузов СССР, Пищевая технология, № 5, 145, 1966.