

ОБ ОБОБЩЕНИИ КИНЕТИКИ ТЕРМОРАДИАЦИОННОЙ СУШКИ

В.А. ТАРАПОН, А.Ф. БУЛЯНДРА, А.Г. ТАРАПОН

При изучении кинетики сушки методом физического моделирования приходится проводить большое количество трудоемких опытов. Поэтому разработка методов обобщения кинетики сушки представляет большую ценность.

В работе [1] было показано, что для любого энергетического режима сушки при одинаковых начальных влажностях u_0 остается приблизительно постоянной величина $N\tau$, соответствующая текущему влажностному $\bar{u}$, где N — скорость сушки в периоде постоянной скорости сушки; τ — текущее время сушки.

На основании этого положения можно построить обобщенную кривую сушки в координатах $\bar{u} - N\tau$ для определенного начального влажностного содержания u_0 по одной опытной кривой сушки. Из обобщенной кривой сушки может быть воссоздано семейство кривых сушки, соответствующих различным режимам энергоподвода. В этих же работах показано, что, кроме инвариантности величины $N\tau$ при данном u_0 материала, такими же свойствами обладают и величины τ/τ_q и $k\tau$, где τ_q — длительность процесса сушки при различных режимах; k — коэффициент сушки при различных режимах энергоподвода.

В работе [2] опытами по терморadiационной сушке съедобных сухарей показано, что метод обобщения кинетики сушки В.В. Красникова пригоден и в этом случае, и предложен способ ее обобщения, отличающийся от изложенного

тем, что обобщение производится по определяющему режимному параметру терморadiационной сушки — энергетической облученности E , т.е. все кривые кинетики сушки для различных режимов облученности можно свести в одну обобщенную кривую в координатах $\bar{u} - E\tau$.

Проведенные нами исследования по кинетике сушки картофельного крахмала [3] показали, что соотношение $E\tau = \text{const}$ достаточно хорошо выполняется как в периоде постоянной, так и в периоде падающей скорости сушки при различных толщинах материала.

На рис. 1а приведена обобщенная кривая сушки картофельного крахмала при $h=5$ мм, $u_0=50\%$, $E=3100, 4000, 5000, 5400$ Вт/м², а на рис. 1б — при $h=70$ мм, $u_0=50\%$, $E=3100, 5400$ Вт/м².

Исследования кинетики процесса терморadiационной сушки картофельного крахмала при различных толщинах слоя, и начальных влагосодержаниях [3] также показывают, что при толщинах до 25 мм с увеличением толщины практически пропорционально увеличивается время сушки до определенного влагосодержания как в периоде постоянной, так и в периоде падающей скорости сушки. При увеличении толщины материала до 45 мм эта пропорциональность сохраняется только в периоде постоянной скорости сушки, а при $h=70$ мм — только при сушке до $\bar{u}_0=30\%$.

На рис. 2 представлены обобщенные кривые сушки в координатах $\bar{u} - \frac{E}{h}$ для картофельного крахмала при облученности $E=3100$ Вт/м², толщинах $h=5, 10, 15, 25, 45, 70$ мм и начальных влагосодержаниях $u_0=12,5\%, 21\%$ и 50% . Как видно из рис. 2, точки, полученные опытным путем, в указанных пределах образуют обобщенные кривые.

На основании этого можно сделать вывод, что при терморadiационной сушке в исследованных нами пределах $\frac{\tau}{h} = \text{const}$, а следовательно, и $\frac{E\tau}{h} = \text{const}$.

На рис. 3 представлены обобщенные кривые сушки в координатах $\bar{u} - \frac{E\tau}{h}$ для начальных влагосодержаний $u_0=12,5\%, 21\%$ и 50% , построенные по данным опытов при толщине слоя $h=10$ мм и облученности $E=3100$ Вт/м² и для начальных влагосодержаний $u_0=40\%$ (толщина слоя $h=15$ мм, $E=3100$ Вт/м²) и $u_0=62\%$ ($h=15$ мм, $E=2300$ Вт/м²). На

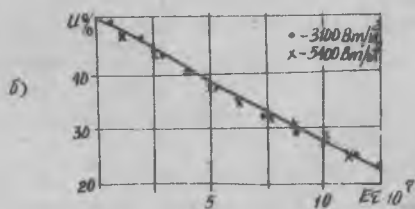
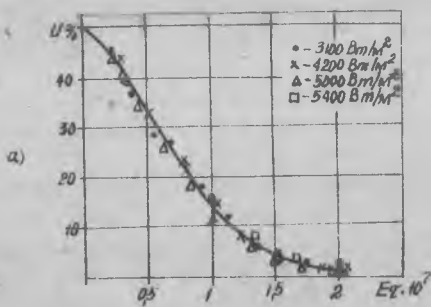


Рис. 1

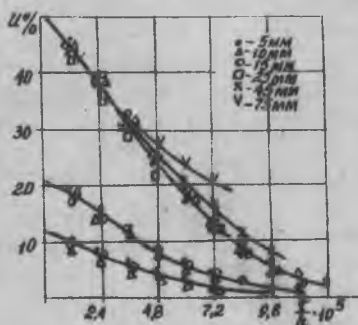


Рис. 2

этом же рисунке нанесены точки, полученные при других опытах, где толщина слоя изменялась от $h = 5$ мм до $h = 70$ мм, а облученность — от $E = 2300$ Вт/м² до $E = 5400$ Вт/м². Как видно, экспериментальные точки вполне удовлетворительно ложатся на обобщенные кривые.

Зависимость $\frac{E\tau}{h} = \text{const}$ в указанных пределах vyplняется и при сушке других пищевых продуктов. В качестве примера на рис. 4 приведена обобщенная кривая в координатах $\bar{u} - \frac{E\tau}{h}$ для сухарей "Детские" при $U_0 = 29\%$, облученности $E = 8800$ Вт/м² и толщинах $h = 10, 15, 20$ мм.

Предложенный способ обобщения учитывает толщину материала. Величина $\frac{E\tau}{h}$ при терморрадиационной сушке является, в исследованных пределах величиной постоянной и соответствует данному текущему влагосодержанию $\bar{u}$ при определенном начальном U_0 .

С целью выявления возможности получения кривых сушки с заданными U_{0x} по кривым сушки, полученным опытным путем при других различных U_0 , нами был построен график зависимости $\bar{u} = U_0 \cdot \tau$. Для этого по оси ординат откладывали текущее среднеинтегральное влагосодержание, а по оси абсцисс — начальное влагосодержание U_0 . Из обобщенных кривых сушки в координатах $\bar{u} - E\tau/h$ (рис. 3) для различных начальных влагосодержаний находили значения текущих влагосодержаний $\bar{u}$ для заданных значений τ и по ним строили графики в указанных выше координатах (рис. 5). Как видно из рисунка, зависимость $\bar{u} - U_0$ представляет собой семейство прямых с различными углами наклона для фиксированных значений τ , описываемых уравнением

$$\bar{u}_x = \bar{u}_1 + \frac{(U_{0x} - U_{01})(\bar{u}_2 - \bar{u}_1)}{(U_{02} - U_{01})}, \quad (1)$$

где U_{01} и U_{02} — начальные, а $\bar{u}_1$ и $\bar{u}_2$ — текущие влагосодержания для фиксированных значений τ , полученные опытным путем. Такая зависимость $\bar{u} = f(U, \tau)$ подтверждается расположением точек, соответствующих пяти начальным влагосодержаниям — 12,5%, 21%, 40%, 50%, 68% — на данной прямой для любого значения τ . Как видим из рис. 5 это справедливо как для периода постоянной ско-

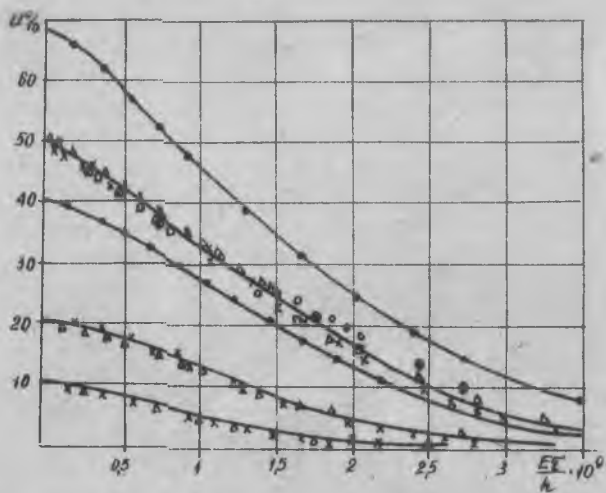


Рис. 3

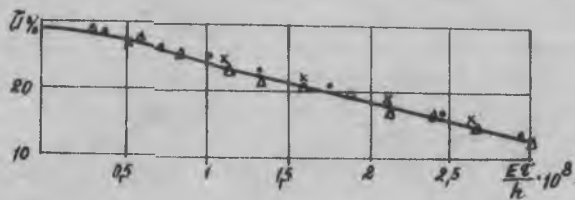


Рис. 4

Рости сушки, так и для периода падающей скорости сушки.

Таким образом, имея две экспериментальные кривые сушки с различными u_0 , мы можем получить кривые сушки для других начальных влагосодержаний.

Для этого по фиксированным значениям временной функции находим по экспериментальным кривым значения $\bar{u}_1$ и $\bar{u}_2$, а по формуле (1) находим значения $\bar{u}_x$ для интересующего нас начального влагосодержания u_{0x} .

Таким образом, нами предложен метод обобщения двух кривых сушки с различным u_0 , полученных при любых режимных параметрах на все возможные режимы сушки данного материала с любым начальным влагосодержанием.

Очевидно, рассчитать кривую сушки с другими начальными влагосодержаниями, а также построить зависимость $\bar{u}$ от u_0 (которая будет иметь аналогичный характер) возможно, если опытные данные представлены кривыми в координатах $\bar{u} - \sqrt{\tau}$, $\bar{u} - \frac{\sqrt{\tau}}{k}$, $\bar{u} - N\sqrt{\tau}$ и др.

Такое обобщение возможно и для других коллоидных капиллярнопористых тел.

В качестве примера возьмем кривые терморационной сушки семян подсолнечника, приведенные в [4].

На рис. 6 показаны кривые сушки семян подсолнечника, полученные опытным путем (сплошная линия), и на них нанесены результаты (точки) расчета по формуле (1) каждой кривой сушки по двум другим. Из рисунка видно хорошее совпадение опытных данных с расчетными.

На рис. 7 показана зависимость $\bar{u} - (u_0\sqrt{\tau})$, построенная по кривым сушки семян подсолнечника (рис. 6). Все экспериментальные точки (полученные из кривых сушки) хорошо ложатся на соответствующие временные прямые.

Нами была исследована возможность применения метода обобщения кривых сушки также для материалов, имеющих другую структуру.

По данным работы [5] было проведено обобщение кривых сушки для силикагеля, как типичного поликапиллярнопористого тела. При этом, построенные нами графики подтверждают возможность такого обобщения и для этого вида

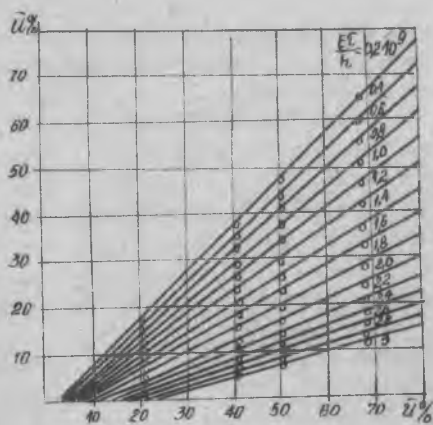


Рис. 5

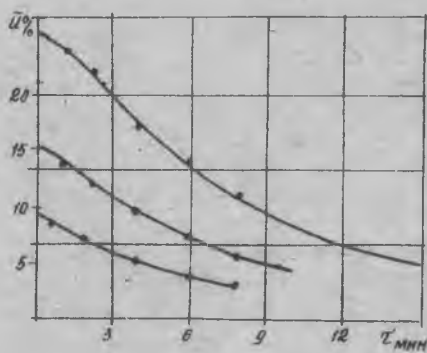


Рис. 6

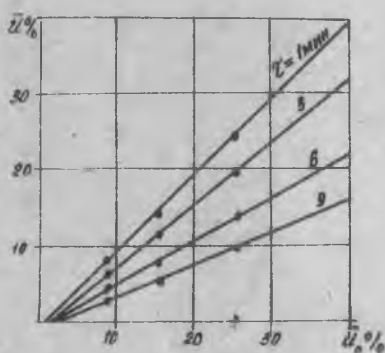


Рис. 7

материалов.

На рис. 8 показана зависимость $\bar{m} - (m_0 \tau)$ при терморadiационной сушке ткани (капиллярнопористое тело), построенная нами по кривым сушки, приведенным в [6]. Точки, соответствующие различным влагосодержаниям, и в этом случае хорошо ложатся на соответствующие временные прямые.

Все это говорит о том, что предложенный метод обобщения кривых сушки носит универсальный характер и представляет интерес с точки зрения управления и автоматического регулирования технологических процессов сушки.

Из анализа кривых сушки видно, что значения текущих влагосодержаний в периоде постоянной скорости сушки примерно пропорциональны начальным. Поэтому если сушка материала происходит в основной период постоянной скорости (как в случае сушки сухарей), то возможно с некоторой погрешностью по одной опытной кривой сушки рассчитать кривые сушки с другими начальными влагосодержаниями по формуле

$$\bar{u}_x = \frac{\bar{u} - u_0 x}{u_0} \quad (2)$$

На рис. 9 приведены кривые сушки, полученные опытным путем и рассчитанные по формуле (2), а также зависимости $\bar{u} - (u_0 \frac{E\tau}{h})$ для сухарей "Украинские".

По полученным зависимостям $\bar{u} - (u_0 \tau)$, $\bar{u} - (u_0 E\tau)$, $\bar{u} - (u_0 \frac{E\tau}{h})$ можно легко рассчитать продолжительность сушки материала от любого начального влагосодержания u_0 до любого конечного влагосодержания $\bar{u}_k$ в период постоянной и падающей скорости с учетом переменного режима сушки, который характерен для действительных условий.

Действительно, в случае сушки семян подсолнечника (рис. 7) по заданным u_0 и $\bar{u}_k$ из графика непосредственно находим значение τ' (если интересующая нас точка находится между прямыми, значение τ' находим путем линейной интерполяции). Это время и будет временем сушки от u_0 до $\bar{u}_k$, если облученность и толщина слоя будут такими же, как и опытные.

В случае, если E_x и h_x отличны от $E_{оп}$ и $h_{оп}$,

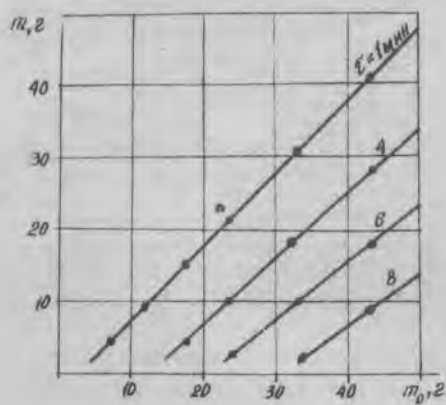


Рис. 8

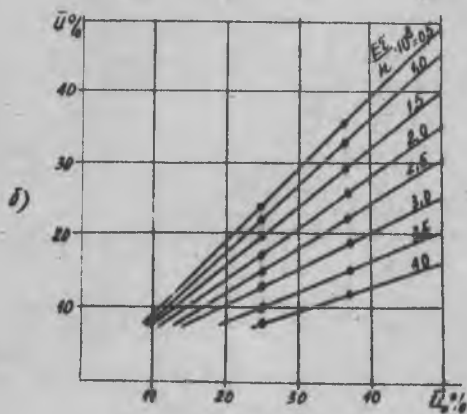
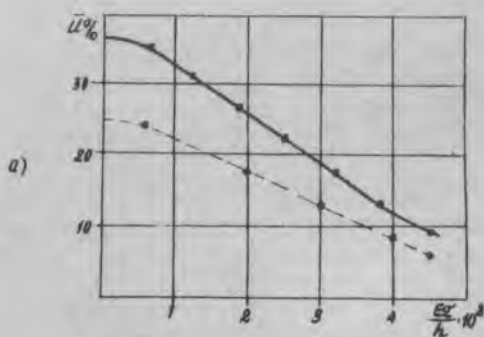


Рис. 9

время сушки в исследованных пределах рассчитывается по формуле

$$\tau_x = \frac{E_{on} \cdot h_x}{E_x \cdot h_{on}}$$

Аналогично можно рассчитать время и по обобщенным кривым $\bar{u} - E\tau$ и $\bar{u} - \frac{E\tau}{h}$; если обозначить $E\tau = \varphi$, а $\frac{E\tau}{h} = \frac{\varphi}{h}$, то соответственно $\tau_k = \frac{\varphi}{E_x}$ и $\tau_x = \frac{\varphi \cdot h_x}{E_x}$.

Таким образом, в исследованных пределах нами получены общие закономерности для нелинейных задач процессов терморadiационной сушки материалов, которые можно широко использовать при научных исследованиях и инженерных расчетах.

Л и т е р а т у р а

1. Красников В.В. Кондуктивная сушка. М., "Энергия", 1973.
2. Душенко В.П., Буляндра А.Ф., Вербицкий Б.И. Об обобщении кинетики терморadiационной сушки. - Изв. ВУЗов "Пищевая технология", 1973.
3. Тарапон В.А. Экспериментальное исследование кинетики и динамики терморadiационной сушки коллоидных капиллярно-пористых пищевых продуктов. - Настоящий сборник.
4. Гинзбург А.С. Инфракрасная техника в пищевой промышленности. М., "Пищевая промышленность", 1966.
5. Кучерук И.М. Комплексное исследование кинетики процесса сушки типичных дисперсных тел инфракрасным излучением. Автореф. канд. дисс. К., 1967.
6. Бархерт Р., Юбиц В. Техника инфракрасного нагрева. М.-Л., Госэнергоиздат, 1963.