

# ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ПРОЦЕССА СУШКИ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ ИНФРАКРАСНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

В. П. Душенко, И. М. Кучерук, А. Ф. Буляндра, В. М. Андриянов,  
Р. С. Петрова

*(Киевский педагогический институт им. А. М. Горького,  
Винницкий педагогический институт им. П. Островского,  
Киевский технологический институт пищевой промышленности)*

Чтобы использование инфракрасного (ИК) излучения было эффективным, в первую очередь необходимо согласовать спектральные характеристики ИК излучателей с оптическими свойствами обрабатываемых материалов [1, 2].

Для аналитического описания процессов внутреннего тепло- и массопереноса в капиллярно-пористых материалах при ИК терморадикационной сушке наряду с тепло- и массообменными характеристиками необходимо знать оптические свойства этих материалов, спектральные характеристики ИК излучателей, а также поля облученности, создаваемых ИК излучателями.

В связи с этим нами с помощью инфракрасного спектрометра ИКС-12 проведено исследование спектральных характеристик широко применяемых в технике сушки светлых и темных промышленных ИК излучателей [3].

Установлено, что при номинальных напряжениях питания максимумы спектральных интенсивностей величины излучения  $i_{\lambda_{max}}$  для светлых и темных ИК излучателей приходится соответственно примерно на длины волн 1,3 и 3,0—4,0 мкм; примерно 75% регистрируемой спектрометром энергии излучения светлых ИК излучателей приходится на область ИК спектра 1,9—2,0 мкм, для темных ИК излучателей на область ИК спектра 1,5—5,5 мкм приходится примерно 90% регистрируемой энергии излучения.

Поэтому наиболее целесообразно для сушки использовать ИК излучение, приходящееся на область спектра 1—5 мкм.

В качестве модельного капиллярно-пористого тела с разнородной формой связи влаги нами выбран однородносреднепористый силикагель КСС-4 дисперсности 0—0,25; 0,25—0,5; 0,5—1,0 мм.

Основные оптические свойства влажных дисперсных материалов описываются спектральными коэффициентами: отражения  $\rho_{\lambda}$ , пропускания  $\tau_{\lambda}$ , экстинкции ИК излучения  $K_{\lambda}$ , поглощения  $a_{\lambda}$ .

На рис. 1 представлены оптические характеристики силикагеля КСС-4. Исследование спектров отражения проведено методом зеркальной полусферы [6]. Спектральные коэффициенты пропускания получены с помощью инфракрасного спектрофотометра ИКС-14. Пространственное распределение отраженного излучения исследовано с помощью приставки ИПО-12 к спектрометру ИКС-12.

На рис. 1, а приведены коэффициенты отражения  $\rho_{\lambda}$  силикагеля КСС-4 различной дисперсности и влажности. Кривые 1—3 соответствуют дисперсности 0—0,25; 0,25—0,5; 0,5—1,0 мм в воздушно-сухом состоянии ( $\varphi = 0,7$ ).

Коэффициенты  $\rho_{\lambda}$  с увеличением дисперсности возрастают. Эт

можно объяснить тем, что при небольших размерах частиц излучение, падающее на исследуемый образец, испытывает значительное диффузное отражение в верхних слоях образца. Кроме того, излучение, проникающее во внутрь образца, при отражении от нижележащих слоев выходит наружу менее ослабленным, проходя при этом зерна малых размеров. При увеличении размера частиц коэффициенты уменьшаются.

Наличие полос минимумов отражения на кривых  $\rho_a = f(\lambda)$  в гигроскопической области ( $\varphi = 0,7$ ,  $u = 38\%$ ) можно объяснить характер-

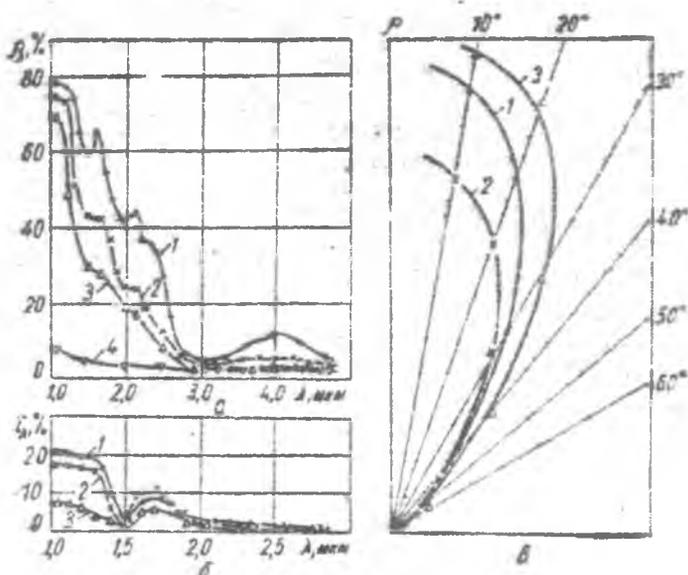


Рис. 1. Спектральные коэффициенты отражения (а) и пропускания (б) и пространственное распределение излучения, отраженного воздушно-сухим силикагелем КСС-4 при угле падения  $10^\circ$  (в).

ными полосами поглощения жидкой воды и влаги парообразного состояния.

Коэффициенты  $\rho_a$  силикагеля КСС-4 максимальной влагоемкости (кривая 4) мало зависят от степени дисперсности, становятся соизмеримыми с коэффициентами  $\rho_a$  для воды [7], начиная с длин волн  $\lambda \geq 1,5$  мкм, и значительно меньше коэффициента  $\rho_a$  силикагеля КСС-4 при  $\varphi = 0,7$ .

На рис. 1, б приведены коэффициенты  $\tau_a$  (кривые 1—3) для силикагеля КСС-4 дисперсности 0—0,25; 0,25—0,5; 0,5—1,0 мм при толщинах слоя соответственно 0,25; 0,508; 1,013 мм в области максимальных влагоемкостей. Коэффициенты  $\tau_a$  для максимально увлажненного силикагеля зависят от степени дисперсности и увеличиваются при увеличении размера зерен. Форма кривой  $\tau_a = f(\lambda)$  для силикагеля при максимальной влагоемкости аналогична форме кривой  $\tau_a = f(\lambda)$  для воды, что свидетельствует о доминирующей роли воды в пропускании ИК излучения максимально увлажненными поликапиллярно-пористыми материалами в области 1,0—2,5 мкм.

Как видно из рис. 1, в, пространственное распределение излучения, отраженного силикагелем дисперсности 0—0,25 мм при  $\varphi = 0,7$  в областях ИК спектра 0,9—2,5 мкм (кривая 1), 1,6—5,5 мкм (кривая 2) и для  $\lambda = 1,3$  мкм (кривая 3) имеет диффузный характер. Последнее указывает на необходимость применения в ИК сушильных установках отражений с большим коэффициентом отражения для повышения их к. п. д.

Исследование кинетики процесса сушки влажных дисперсных материалов ИК излучением проведено на специально сконструированной лабораторной установке, схема которой показана на рис. 2.

Установка состоит из блоков I термостатирования воздуха в сушильной камере и автоматического непрерывного взвешивания исследуемого образца в процессе сушки и записи массы на диаграммной ленте электронного потенциометра ЭПП-09М2 [4]. Непрерывная запись убыли массы осушаемых материалов осуществлялась фотоэлек-

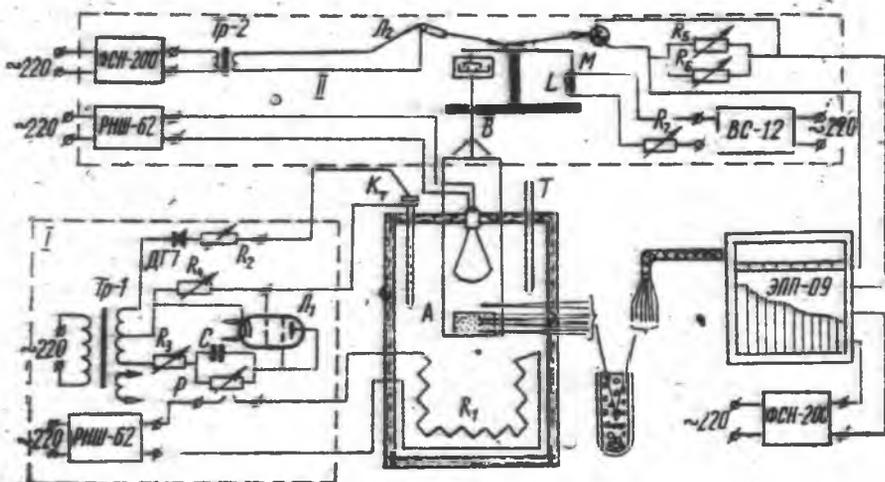


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для исследования кинетики процесса сушки.

трическими весами (блок II) [8] конструкция которых видоизменена. Чувствительность весов 20 мг/мм, точность взвешивания 0,5%. С помощью медь-константановых термопар послойно измеряли температуру исследуемого образца и воздуха над его поверхностью. Для выяснения влияния спектрального состава ИК излучения на кинетику процесса сушки влажных капиллярно-пористых материалов в зависимости от их оптических свойств проведены исследования сушки этих материалов различной дисперсности светлыми и темными ИК излучателями при одинаковой величине облученности.

Чтобы выяснить влияние степени дисперсности и глубины проникновения ИК излучения на кинетику процесса сушки, исследовали процесс сушки влажных капиллярно-пористых материалов при различных облученностях с постоянным спектральным составом излучения ИК излучателей.

На рис. 3 для силикагеля КСС-4 дисперсности 0—0,25 мкм представлены кривые сушки  $\bar{u} = f(\tau)$  (1), скорости сушки  $\frac{d\bar{u}}{d\tau} = f(\bar{u})$  (2),

изменения температуры воздуха в закрытой сушильной камере на расстоянии 10 мм от поверхности образца (3), поверхности материала (4), температурные кривые 5, 6, 7, 8 для слоев, отстоящих от поверхности образца на расстоянии соответственно 2, 4, 6, 8 мм, полученные при использовании светлых ИК излучателей.

Аналогичные кривые сушки этого же образца силикагеля темными ИК излучателями представлены на рис. 4. Облученность поверхности в обоих случаях составляла  $E = 3700$  вт/м<sup>2</sup>, толщина образца 17 мм.

Как видно из рис. 3 и 4, весь процесс сушки типичных поликапиллярно-пористых материалов при нагреве как светлыми, так и темными ИК излучателями состоит из периодов с постоянной и уменьшающейся скоростями сушки. Величина скорости сушки в первом периоде при на-

греве темными ИК излучателями в 2 раза больше, чем при нагреве светлыми ИК излучателями при одинаковых облученностях. Общее время сушки при этом сокращается примерно в 1,5 раза. Это может быть объяснено на основе анализа зависимостей  $q_\lambda = f(\lambda)$  и  $i_\lambda = f(\lambda)$  для светлых и темных ИК излучателей.

Влагосодержание поверхностного слоя капиллярно-пористых материалов при сушке ИК излучением в период постоянной скорости сушки

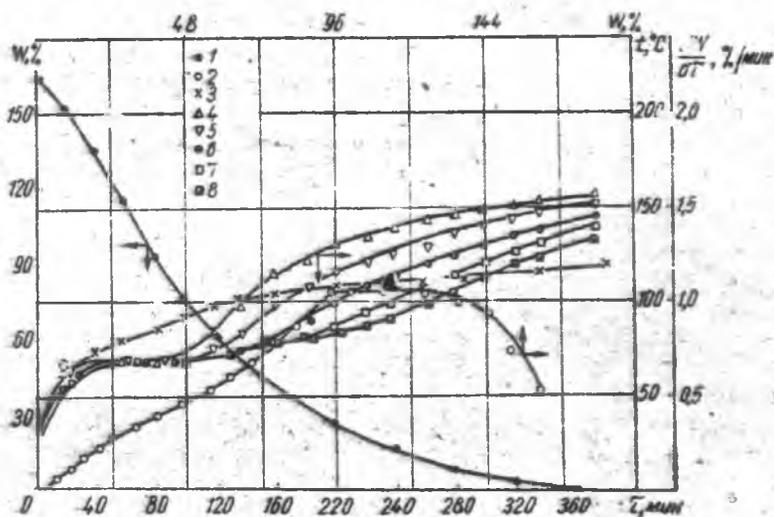


Рис. 3. Кривые кинетики сушки силикагеля КСС-4 дисперсности 0—0,25 мм светлыми ИК излучателями.

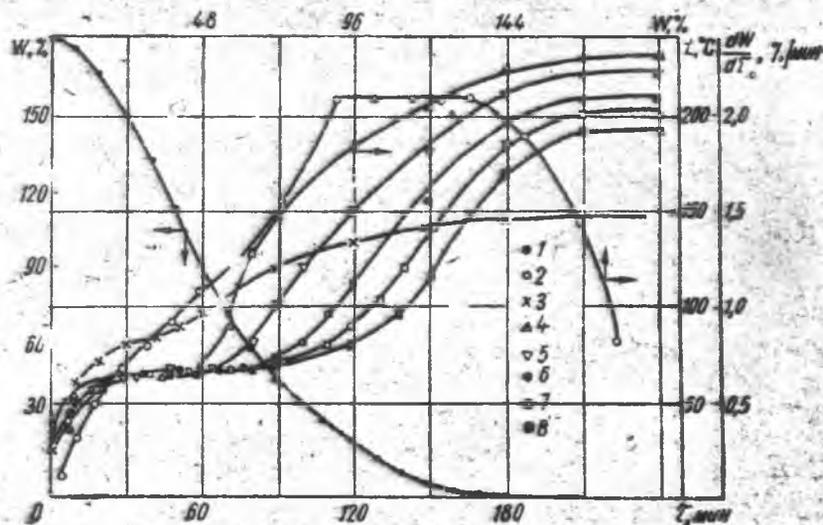


Рис. 4. Кривые кинетики сушки силикагеля КСС-4 дисперсности 0—0,25 мм темными ИК излучателями.

убывает примерно по линейному закону [9]. Это приводит к значительному увеличению коэффициента  $q_\lambda$  поверхностного слоя силикагелей в области спектра 1,0—2,5 мкм и незначительному изменению коэффициента  $q_\lambda$  в области 2,5—5,0 мкм (см. рис. 1, а). Последнее и приводит к увеличению скорости сушки в период постоянной скорости сушки при нагреве темными ИК излучателями.

Величина  $\frac{\bar{d}u}{d\tau}$  в период постоянной скорости сушки ИК излучением при постоянной облученности (для  $E=4900 \text{ вт/м}^2$ ) возрастает при увеличении степени дисперсности. При этом, по-видимому, значительную роль играет «термокапиллярное» передвижение влаги к поверхности образца через внутризерновые поры силикагелей. Испаряющаяся влага с менников внутризерновых пор поверхностного слоя пополняется за счет влаги межзерновых и внутризерновых пор глубоинных слоев [5].

Это находится в согласии с выводами Б. В. Дерягина, С. В. Нерпина и Н. В. Чураева [2, 11] о возрастании влияния пленочного движения влаги пористых материалов при увеличении их дисперсности.

При ИК сушке различных фракций силикагелей светлыми ИК излучателями ( $E \geq 9550 \text{ вт/м}^2$ ) наблюдается увеличение скорости сушки в период постоянной скорости сушки при уменьшении степени дисперсности силикагеля. Это можно объяснить возрастанием коэффициента пропускания максимально увлажненных силикагелей в области спектра 1,0—2,5 мкм (см. рис. 1, б) с увеличением размера их зерен. Увеличение коэффициента пропускания приводит к значительному объемному прогреву глубоинных слоев силикагелей и, как следствие, к увеличению коэффициента диффузии влаги, что и обуславливает при этом увеличение скорости сушки.

В период постоянной скорости сушки ИК излучением температура поверхностного слоя образцов силикагеля в наших опытах была на 2—4 градуса ниже температуры нижележащих слоев. Последнее, по-видимому, можно объяснить значительным прогревом глубоинных слоев силикагеля вследствие проникновения ИК излучения в максимально увлажненные силикагели, а также охлаждением поверхностного слоя за счет интенсивного испарения влаги с поверхности образца.

Значительная интенсификация при сушке капиллярно-пористых материалов также осуществляется за счет переноса энтальпии во внутрь образца при термодиффузии влаги.

Принимая место нахождения зоны сухого и влажного участков материала (место нахождения зоны испарения) в моменты ответвления послонных температурных кривых от группы температурных кривых нижележащих слоев во втором периоде сушки, можно установить закон углубления зоны испарения. Таким путем установлено, что углубление зоны испарения в силикагелях, как в типичных поликапиллярно-пористых материалах, происходит по параболическому закону.

Для расчета длительности ИК сушки поликапиллярно-пористых материалов нами использован метод расчета по приближенному уравнению кривой скорости сушки

В период постоянной скорости сушки уравнение скорости сушки может быть представлено в виде

$$\frac{\bar{d}u}{d\tau} = kE (\bar{u}_1 \leq \bar{u} \leq \bar{u}_0). \quad (1)$$

Кривая скорости сушки в период уменьшающейся скорости сушки описывается двумя эмпирическими формулами

$$\frac{\bar{d}u}{d\tau} = a\bar{u} + b \quad (\bar{u}_2 \leq \bar{u} \leq \bar{u}_1); \quad (2)$$

$$\frac{\bar{d}u}{d\tau} = \frac{i}{c\bar{u} + d} \quad (0 \leq \bar{u} \leq \bar{u}_2), \quad (3)$$

где  $k, a, b, c, d$  — коэффициенты, зависящие от степени дисперсности, величины облученности и спектральных характеристик ИК излучателей;  $\bar{u}_1, \bar{u}_2$  — влагосодержания, соответствующие первой и второй критиче-

ским точкам кривой скорости сушки. Расчет коэффициентов проведен методом наименьших квадратов.

Максимальная погрешность аппроксимации скорости сушки эмпирическими формулами (1) — (3) не превышает  $\pm 5\%$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гинзбург А. С., Красников В. В., Селюков Н. Г. — В кн.: Тепло- и массоперенос, 5. «Энергия», М.—Л., 1966.
2. Гинзбург А. С. Инфракрасная техника в пищевой промышленности. «Пищевая промышленность», М., 1966.
3. Душенко В. П. и др. — В кн.: Пищевая промышленность, 4. «Техника», К., 1966.
4. Душенко В. П., Панченко М. С., Бельдид В. В. — Изв. вузов. Пищевая технология, 1966, 5.
5. Дерягин Б. Э., Нерпин С. В., Чураев Н. В. — В кн.: Физика, химия, биология и минералогия почв СССР. «Недра», М., 1964.
6. Кропоткин М. А., Казырев Б. П. — Изв. вузов. Физика, 1965, 3, 27.
7. Кисловский Л. Д. — Оптика и спектроскопия, 1959, 7.
8. Казацкий М. Ф. — Коллоидный журнал, 1957, 19.
9. Лебедев П. Д. Сушка инфракрасными лучами. Госэнергоиздат, М.—Л., 1955.
10. Нерпин С. В., Чураев Н. В. — ИФЖ, 8, 20.
11. Чураев Н. В. — Коллоидный журнал, 1965, 27.