В.П. Дущенко, И.М. Кучерук, А.Ф. Буляндра, П.В. Берекной, Р.С. Петрова, П.И. Сиднев

(Киевский государственный пединститут им.А.М.Горького, Киевский технологический институт пищевой промышленности)

КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОРАДИАЦИОННОЙ СУШКИ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ ТЕЛ

Эффективное использование инфракрасных излучателей для терморадиационной сушки капиллярно-пористых тел требует в первую очередь согласования спектральных характеристик ИК-излучателей с оптическими свойствами обрабатываемых материалов /1-5/.

Мы проводили исследования спектральных характеристик промышленных светлых и темных ИК-излучателей (ИК-лампы типа 3С, НИК-1000х x220 тр., ИК-лампы завода "Элпром" (Болгария), ИК-лампы завода VEB (ГДР); трубчатые электронагреватели отечественных заводов) с помоцью спектрометра ИКС-12 в интервале длин волн 0,75-2,6 мкм для светлых и 1,5-5,5 мкм для темных излучателей [6, 7]. Установлено, что при номинальных напряжениях питания максимумы спектральных интенсивностей величины излучения Сдраждля светлых и темных ИК-излучателей соответственно приходятся на длины волн 1,3 и 3,0 мкм; при этом примерно 75% регистрируемой спектрометром энергии для светлых ИК-излучателей имеют место в интервале длин волн 1-2 мкм и для темных излучателей в интервале 1,5-5,5 мкм - примерно 90%.

Исследование полей облученности, отдельно взятых, и систем

светных и темных ИК-излучателей при различных наприжениях питания и расстояниях от облучаемой поверхности выполнено с помощью балансомера M-IO в совокупности с гальванометром ГСА-I /?/. Нами установлены ампирические правила размещения ИК-излучателей, при которых обеспечиваются равномерные лучистые потоки на плоскне поверхности материалов: для светлых излучателей при $R \ge 0.3$ м и при темных при $R \ge 0.15$ м эти правила соответственно имеют вид: \mathcal{L} = I.75 / и \mathcal{R} = I.4 /, где \mathcal{K} и / – расстояния от излучателя к облучаемым поверхностям и между осями симметрии изкучателей. Величина облученности и ее равномерность значительно повываются при применении рефлекторов к темным ИК-излучателям и ограждений вз пслированного доралюминия.

Коскольку больвинство капиллирно-пористых тел сильно рассемвает ИК-излучение диффузно и они почти непрозрачны даже при малых толщинах, адсорбционный спектральный анализ для исследования их оптических свойств непригоден и основной спектрометрической характеристикой таких тел является спектр отражения, характер которого определяется дисперсностью, толщиной слоя тела, оптическими свойствами компонентов системы и пр. Так как большая часть энергии светлых и темных ИК-излучателей приходится на интервал I-5 мкм, исследования оптических свойств материалов проведены в этом интерваде методом зеркадьной полусферы /87.

В связи с тем что спектральные коэффициенты диффузного отражения влажных дисперсных тел сильно зависят от их влагосодержания, мы изучали спектры диффузного отражения объектов исследования при их максимальном увлажнении и воздушно-сухом состоянии (/- 0,7).

Для исследования кинетики процесса терморадиационной сушки внажных дисперсных тел выбраны типичные капиллярно-пористые тела с однородной и разнородной формами связи влаги: кварцевый песок и однородно-крупнопористый силикагель КСК-2 (рис.I): з – спектраньные коэффициенты отражения $g_1 = f(4)$: б – спектральные коэффициенты пропускания $g_2 = f(4)$ максимально увлажненных фракций сиимкагеля, полученных с помощью ИКС-I4; в – пространственное распределение отраженного излучения, полученное на ИКС-I2 с приставкой ИПО-I2.

Как видно из рис. I, а, козффициенты \mathfrak{R} увеличиваются с увеличением дисперсности тела. Это можно объяснить тем, что при малых размерах частиц излучение испытывает сильное диффузное отражение в верхних слоях тела и отраженный поток выходит наруку, проходя при этом через частицы малых размеров. При увеличении размера частиц коэффициенты \mathcal{G}_{λ} уменьваются вследствие того, что проникшее во внутрь тела излучение после диффузного рассемвания проходит больший путь в самих частицах и ослабляется сильнее. Полосы минимумов отражения на кривых $\mathcal{G}_{\lambda} = f(\lambda)$ силикателя при $\mathcal{G} = 0.7$ около I,5 и 3.0 мкм обусловлени тем, что у 2.92 мкм лежит основная валентная полоса колебаний группы OH, в $\lambda = 1.5$ мкм соответствует полосе поглощения в спектре пропускания воды, которая имеется в порах силикателя вследствии капиллярной конденсации.

При максимальном вдагосодержания козффициенты у для различных фракций силикагеля значительно меньме козффициентов Я тех же фракций при 9 = 0,7 и становятся соизмеримнии со значениями козффициента Я для воды, начиная с 2 ≥ 1,3 мкм /97. Толдины слоев силикагелей при исследования козффициентов Я – 10 мм.

Исследованием ИК-спектров пропускания на ИКС-I4 установаено, что силикатель с размерами зерен 0-0,25 мм при толщине слоя 0,25мм при 9 = 0,7 в интервале длин волн I-5 мкм ИК-излучений не пропускает; при размерах зерен 0,25-0,5 и 0,5-I,0 мм и при толщинах словв соответственно 0,508 и I,0I3 мм пропускание имеет место только в интервале I-2,5 мкм и коэффициент составляет 4-5%.

Из рис. І, б сдедует, что коэффициенты \mathcal{C}_{λ} для максимально увлажненного силикагеля различной дисперсности также зависят от размера зерен и с увеличением последних коэффициент \mathcal{C}_{λ} увеличивеется. Ход кривой $\mathcal{C}_{\lambda} = f(\lambda)$ для максимально увлажненного силикагеля аналогичен ходу кривой $\mathcal{C}_{\lambda} = f(\lambda)$ для води.

Рис. І, в подтверждает, что пространственное распредедение отраженного излучения силикагелем различной дисперсности при 9=0,7 в интервале 0,75-2,5 мкм и для λ = I,3 мкм имеет диффузный характер. Аналогична картина и для кварцевого песка. Поэтому для повышения к.п.д. терморадиационных сущильных установок необходимо применять ограждения с большим коэффициентом отражения.

На кривых $f_2 = f(\lambda)$ для тех же фракций сухого и мансимально увлажненного кварцевого песка отсутствуют полосы поглощения у λ = = 1,5 мкм. Пропускание максимально увлажненного кварцевого песка в интервале 1-2,5 мкм составляет 3-4%, т.е. речь идет практически о полном поверхностном поглоценим ИК-излучения. Знание оптических овойств материалов и величин облученности необходимо также для оналитического описания процессов внутреннего тепло- и массопереноса в капиллярно-пористых телах при терморадиационной сушке.

Нами получены решения задач по нахождению нестационарных полей температуры и влагосодержания для неограниченной пластины при краевых условиях первого и второго рода в случае симметричного и несимметричного терморадиационного нагрева. Для краевых условий первого рода при линейном изменении потенциалов переноса на поверхности тела (T/I, F₀/ = d F₀ / θ/I, F₀/ = - β F₀ - первый период сушки) в случае симметричного нагрева ИК-излучением с помощью интегральных преобразований Лапласа имеем следующие выражения для распределения потенциалов переноса тепла и массы:

$$T(X, F_{o}) = dF_{o} + \frac{1}{2} \left[d - \beta K_{o}^{*} - P_{o}(X) \right] (X^{*} - 1) +$$

$$+ \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{i=1}^{\infty} C_{n_{i}} \cos \mathcal{M}_{n} \overline{\mathcal{V}}_{i} X \exp \left(- \mathcal{M}_{n}^{2} F_{o} \right) ;$$
(I)

$$\begin{aligned} \Theta(X,F_{o}) &= -\beta F_{o} - \frac{1}{2} \left[\frac{P_{o}(X)}{K_{o}^{n}} (\vartheta_{1}^{2} + \vartheta_{2}^{2} - 1) + \beta (\vartheta_{1}^{2} + \vartheta_{2}^{2} - 1) + \right. \\ &+ \frac{\alpha L}{K_{o}^{*}} \left(1 - \vartheta_{1}^{2} \right) (1 - \vartheta_{2}^{2}) \left] + \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{l=1}^{n} C_{m_{l}} \cos \beta l_{n} \vartheta_{l} X \exp(-\beta l_{n}^{2} F_{o}) \right]^{(2)} \end{aligned}$$

$$C_{n_1} = -\frac{N_1 \cos M_n \mathcal{Y}_s}{M_n^s \mathcal{Y}(\mathcal{N}_n)}; \quad C_{n_2} = -\frac{N_2 \cos M_n \mathcal{Y}_1}{M_n^s \mathcal{Y}(\mathcal{N}_n)}; \quad (3)$$

$$C_{m_1} = -\frac{M_1 \cos M_n \vartheta_2}{M_n^3 K_o^* y(\mathcal{M}_n)}; \quad C_{m_2} = -\frac{M_2 \cos M_n \vartheta_2 + \mathcal{B}(x) \cos M_n \vartheta_1 \cos M_n \vartheta_0}{M_n^4 K_o^4}$$

$$N_{i} = \frac{(1 - \mathcal{V}_{z}^{2})\alpha - \beta K_{o}^{*} - P_{o}(X)}{\mathcal{V}_{1}^{2} - \mathcal{V}_{z}^{2}} \quad ; \quad N_{z} = \frac{-(1 - \mathcal{V}_{i}^{*})\alpha + \beta K_{o}^{*} + P_{o}(X)}{\mathcal{V}_{1}^{2} - \mathcal{V}_{z}^{2}} \quad ; \quad (5)$$

- 17 -

$$M_{q} = \frac{-(1-\hat{y}_{s}^{2})(1-\hat{y}_{z}^{2})d + \beta K_{o}^{*}(1-\hat{y}_{s}^{2}) + P_{o}(X)(1-\hat{y}_{s}^{2})}{\hat{y}_{1}^{2} - \hat{y}_{z}^{2}} \qquad (6)$$

T8 --

$$M_{2} = \frac{(1 - \mathcal{V}_{1}^{2})(1 - \mathcal{V}_{2}^{2})\alpha - \beta K_{0}^{*}(1 - \mathcal{V}_{2}^{2}) - P_{0}(x)(1 - \mathcal{V}_{2}^{2})}{\mathcal{V}_{1}^{2} - \mathcal{V}_{2}^{2}} \qquad (7)$$

$$Y(\mathcal{M}_n) = \frac{2}{\mathcal{M}_n} \cos \mu_n v_1 - \cos \mu_n v_2 - \frac{1}{2} \sin \mu_n v_1 \cos \mu_n v_2^{-}(8)$$
$$- \frac{1}{2} \sin \mu_n v_2 \cos \mu_n v_1 \quad ;$$

$$v_{i} = \frac{1}{2} \left[\left(1 + K_{o}^{*} P_{n} + \frac{1}{L_{u}} \right) + \left(-1 \right)^{i} \sqrt{\left(1 + K_{o}^{*} P_{n} + \frac{1}{L_{u}} \right)^{2} - \frac{4}{L_{u}}} \right]$$
(9)
($\dot{z} = 1, 2$).

Здесь M_n - корни характеристического уравнения соз $M_n y_2 = 0$.

Решение задачи по нахождению нестационарных полей потенциалов переноса тепла и массы для краевых условий первого рода при несимметричном нагреве и второго рода при симметричном нагреве ИК-излучением проведено методом Генри - Кранка - Смирнова /10-12/ о использованием конечных интегральных sin и cose-преобразований фурье /13/. Выражения нестационарных полей потенциалов переноса тепла и массы при краевых условиях второго рода в случае симметричного нагрева имеют следующий вид:

$$T(X, F_{0}) = \frac{V_{a}^{2} - 1}{V_{a}^{2} - \tilde{V}_{q}^{2}} \left\{ \frac{1}{\tilde{V}_{q}} \int_{0}^{\pi} \left[m_{q} K_{iq} + n_{q} K_{im}(\xi) \right] d\xi + \frac{2}{\tilde{V}_{q}} \sum_{Pai}^{\infty} \cos \Re P_{X} \int_{0}^{\pi} \left[m_{q} K_{iq} + n_{q} K_{im}(\xi) \right] \exp\left[-\frac{\Re^{2} \rho^{2}}{\tilde{V}_{q}^{2}} (F_{0} - \xi) \right] d\xi - \frac{1}{\tilde{V}_{q}^{2}} \int_{0}^{\pi} \left[m_{q} K_{iq} + n_{q} K_{im}(\xi) \right] - \frac{2(\tilde{V}_{q}^{2} - 1)}{\tilde{V}_{q}^{2}} \sum_{Pai}^{\pi} \cos \Re P_{X} \int_{0}^{\pi} x \qquad (10)$$

$$\times \left[m_{a} K_{iq} + m_{q} K_{im}(\xi) \right] \exp\left[-\frac{\Re^{2} \rho}{\tilde{V}_{q}^{2}} (F_{0} - \xi) \right] d\xi - \frac{1}{\tilde{V}_{q}^{2}} \int_{0}^{\pi} \frac{1}{\tilde{V}_{q}^{2}} \left[m_{q} K_{iq} + n_{q} K_{im}(\xi) \right] - \frac{2(\tilde{V}_{q}^{2} - 1)}{\tilde{V}_{q}^{2}} \sum_{Pai}^{\pi} \cos \Re P_{X} \int_{0}^{\pi} x \qquad (10)$$

$$\begin{aligned} \theta(x,F_{o}) &= \frac{y_{a}^{*}-1}{y_{i}^{*}-y_{a}^{*}} \left\{ \frac{P_{n}}{(y_{a}^{*}-y_{i}^{*})y_{i}^{*}} \int_{0}^{F_{o}} \left[m_{i}K_{iq}+n_{i}K_{lm}(\xi) \right] d\xi + \\ &+ \frac{2P_{n}}{(y_{a}^{*}-1)y_{i}^{*}} \sum_{P=1}^{\infty} \cos \Re P x \int_{0}^{F_{o}} \left[m_{i}K_{iq}+n_{i}K_{iR}(\xi) \right] \exp \left[-\frac{\Re^{2}P^{2}}{y_{i}^{*}} \left[F_{o}-\xi \right] \right] d\xi - \\ &- \frac{4}{y_{a}^{*}} \int_{0}^{F_{o}} \left[m_{k}K_{iq}+n_{k}K_{im}(\xi) \right] d\xi - \frac{2}{y_{a}^{*}} \sum_{P=1}^{\infty} \cos \Re P x \int_{0}^{F_{o}} m_{k}K_{iq} + \quad (\text{II}) \\ &+ n_{k}K_{im}(\xi) \right] \exp \left[-\frac{\Re^{2}P^{2}}{y_{a}^{*}} \left(F_{o}-\xi \right) \right] d\xi \right\}; \end{aligned}$$

$$n_1 = \frac{V_1^2 - 1}{P_n}$$
; $m_2 = \frac{P_n}{V_2^2 - 1}$; $m_1 = n_2 = 1$. (12)

Предполагая независимость критериев Pn, Kig, Kim от критерия Fo и постоянство теплофизических коэффициентов для периода постоянной скорости сушки, получено выражение скорости сушки

$$\frac{d\bar{u}}{d\bar{c}} = \frac{au_{o}L_{u}P_{n}E(1-g)}{\lambda t_{o}\ell} + \frac{aL_{u}K_{im}(\epsilon P_{n}K_{o}-\sqrt{(\frac{1}{L_{u}}+\epsilon K_{o}P_{n}+1)^{a}-\frac{4}{L_{u}}}{\ell^{2}\sqrt{(\frac{4}{L_{u}}+\epsilon K_{o}P_{n}+1)^{a}+\frac{4}{L_{u}}}}$$
(13)

Обозначения теплофизических величин общепринятые в литературе по тепло- и массообмену.

Как видно из этого выражения, величина ционной сушке влажных дисперсных тел ИК-излучением находится в липойной зависимости от величины облученности при постоянстве спектрального состава ИК-излучения и оптических свойств тела.

Для исследования кинетики терморадиационной сушки капиллярноимеристых тел созданы экспериментальные установки, автоматически регистрирующие убыль веса и температуру в различных слоях тела при его нагреве светлыми и темными ИК-излучателями. В процессе опытов получены кривые сушки $\overline{u} = f(e)$, скорости сушки и поля температур. Величины найдены дискретным дифференцированием табулированной функции $\overline{u} = f(e)/(14)$.

На рис. 2 и 3 представлены кривые сушки кварцевого песка с размером зерен 0-0,25 им $u = f(\mathfrak{E})$ – I скорости сушки $\frac{du}{d\mathfrak{E}}$ – 2; температуры воздуха в закрытой сушильной камере – 3; температурные кривые: 4 – на поверхности и 5-8 – для слоев образца, отстоящих от погерхности на расстояниях соответственно 2, 4, 6 и 8 мм. Облученность поверхности в обоих случаях равна 3700 вт/м². Толщина образцов I7 мм. Из рисунков видно, что скорости сушки в периоде постоянной скорости сушки при нагреве темными ШК-излучателями примерно в I,8 раза больше этой величины при нагреве светлыми ИК-излучателями, а общее время сушки сокращается в два раза.

Такое значительное возрастание величины и сокращение общего времени сушки при нагреве темными ИК-излучателями по сравнению со светлыми можно объяснить зависимостью S = 1/2 кварцевого песка и спектральным распределением энергии в спектре излучателей.

Методом гаммаскопии уэкого пучка установлено, что влагосодержание поверхностного слоя кварцевого песка при терморадиационной сушке в периоде постоянной скорости сушки уменьшается по линейному закону, что приводит к значительному увеличению отражательной способности поверхности кварцевого песка в интервале длин волн I, 0-2,5 мкм и малому изменению его в интервале 2,5-5,0 мкм. При этом поглощение кварцевым песком излучения светлых ИК-излучателей будет значительно меньше, чем темных при той же величине облученности, что и приводит к увеличению

На рис. 4,5 приведены аналогичные кривые при тех же условиях сушки для силикагеля КСК-2 с размером зерен 0-0,25 мм и толщине слоя 17 мм. Анализ этих кривых позволяет также установить значительное влияние согласования оптических свойств капиллярно-пористых тел со спектральными характеристиками ИК-излучателей на кинетику и длительность процесса терморадиационной сушки.

- 20 -

- 21 -Условные обозначения

относительная влажность воздуха;

- интенсивность отраженного излучения;

угол диффузного отражения;

a, β - постоянные величины;

🕺 - безразмерная координата;

Е - облученность;

Р - коэффициент отражения излучения.

Литература

1. Лыков А. В. - Изв. АН СССР, ОТН, 1949, 9, 1320.

- Гинзбург А.С. Инфракрасная техника в пищевой промышленности. М., "Пищевая промышленность", 1966.
- 8. Рабинович Г. Д., Слободкин Л. С. Терморадиационная и конвективная сушка лакокрассчных покрытий. Минск, "Наука и техника", 1966.
- 4. Лебедев П. Д. Сушка инфракрасными лучами, М.-Л., Госэнергоиздат, 1954.
- 5. Гинзбург А.С., Красников В.В., Селюков Н.Г. — Вкн.: Тепло- и массоперенос. Т.5. М.-Л., "Энергия", 1966.
- 6. Дущенко В. П. и др. В кн.: Пищевая промышленность, вып. 4. К., "Техника", 1966.

7. Дущенко В. П. идр. - ИФЖ, 1966, <u>9</u>, 296.

- 8. Кропоткин М. А., Козырев Б. П. Изв. вузов. Физика, 1965, 3, 27.
- 9. Кисловский Л. Д. Оптика и спектроскопия, 1959, <u>7</u>, 311.
- 10. Henry P.S. Proc. society. Ser A, 1939, 171, 945, 215.
- II. Crank J. The mathematics of diffusion. Oxford, 1956.

12. Смирнов М. С. - ИФЖ, 1961, 4, 9, 40.

- 13. Трантер К. Дж. Интегральные преобразования в математической физике. М., Гостехиздат, 1957.
- 14. Ланцош К. Практические методы прикладного анализа. М., 1961.

4



Рис.І. Основные оптические характеристики силикагеля КСК-2: а - коэффициенты P_{1} (%): І-З соответственно фракций О-0,25; 0,25-0,5; 0,5-I,0 мм в воздушносухом состоянии ($\varphi = 0,7$); 4 - фракции О-0,25 мм при максимальном увлажнении; 6 - коэффициенты C_{1} (%): І-З соответственно фракций 0,5-I,0; 0,25-0,5; О-0,25 мм при максимальном увлажнении; в - пространственное распределение отраженного излучения і $\rho = f(U)$ ($\varphi = 0,7$): І - фракция 0-0,25 мм для A = I,3 мкм; 2 - фракции 0-0,25 мм в интервале 0,7-2,5 мкм; З - фракции 0,5-I,0 мм в интервале 0,7-2,5 мкм.

- 22 -





- 28 -



Рис.З. Кривые кинетики сушки кварцевого песка темными излучателями (системы двух излучателей ИР-I).



Рис.4. Кривые кинстики сушки силикагеля КСК-2 светлыми излучателями.

1 25 -

- 24

ŧ.



Рис.5. Кривые кинетики сушки силикателя КСК-2 темныли излучателями.

1 ----