В.П.Дущенко, И.М.Кучерук, А.Ф.Буляндра, П.В.Бережной, Р.С.Петрова, П.П.Сиднев (Киевский государственный пединститут мм.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  $\sqrt{1-57}$ .

Мы проводили исследования спектральных характеристик промышленных светлых и темных ИК-излучателей (ИК-лампы типа 3С, НИК-1000х х220 тр., ИК-лампы завода "Элпром" (Болгария), ИК-лампы завода VEB (ГДР); трубчатые электронагреватели отечественных заводов) с помощью 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  $(A_{RAX})$ для светлых и темных ИК-излучателей соответственно приходятся на длины волн (1,3) и (3,0) мкм; при этом примерно (5,5) регистрируемой спектрометром энергии для светлых ИК-излучателей в интервале (3,5) мкм — примерно (3,5)

Исследование полей облученности, отдельно взятых, и систем

светных и темных ИК-излучателей при различных напряжениях питания и расстояниях от облучаемой поверхности виполнено с помощью балансомера M-IO в совокупности с гольванометром ГСА-I  $\mathbb{Z}$ . Нами установлены эмпирические правила размещения ИК-излучателей, при которых обеспечиваются равномерные лучистые потоки на плосные поверхности материалов: для светлых излучателей при  $\mathbb{R} \ge 0.3$  м и при темных при  $\mathbb{R} \ge 0.15$  м эти правила соответственно имеют вид:  $\mathbb{R} = 1.75 \, \mathbb{L}$  м  $\mathbb{R} = 1.4 \, \mathbb{L}$ , где  $\mathbb{R}$  и  $\mathbb{L} = 1.25 \, \mathbb{L}$  м  $\mathbb{R} = 1.4 \, \mathbb{L}$ , где  $\mathbb{R}$  и  $\mathbb{L} = 1.4 \, \mathbb{L}$  повышаются к облучаемым поверхностям и между осями симметрии излучателей. Величина облученности и ее равномерность значительно повышаются при применении рефлекторов к темным ИК-излучателям и ограждений из полированного доралюминия.

Поскольку большинство капиллирно-пористых тел сильно рассемвает ИК-излучение диффузно и они почти непрозрачны даже при малых
толемнах, адсорбщионный спектральный анализ для исследования их
оптических свойств непригоден и основной спектрометрической характеристикой таких тел является спектр отражения, характер которого
определяется дисперсностыв, толемной 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 зеркальной 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 (7-0,7).

Для исследования кинетики процесса терморадиационной сушки влажных дисперсных тел выбраны типичные капиллярно-пористые тела с однородной и разнородной формами связи влаги: кварцевый песок и однородно-крупнопористый силикагель КСК-2 (рис.1): а — спектральные коэффициенты отражения — — — — спектральные коэффициенты пропускания — — — максимально увлажненных фракций силикагеля, полученых с помощью ИКС-14; в — пространственное распределение отраженного излучения, полученное на ИКС-12 с приставкой иПО-12.

Как видно из рис. I, а, коэффициенты 🍂 увеличиваются с увежичением дисперсности тела. Это можно объяснить тем, что при малых размерах частиц издучение испытывает сильное диффузное отражение в верхних слоях тела и отражений поток выходит наруку, проходя при этом через частицы малых размеров. При увеличении размера частиц коэффициенты  $\mathcal{J}_{\lambda}$  уменьваются вследствие того, что проникиее во внутрь тела излучение после диффузного рассеивания проходит больший путь в самих частицах и ослабляется сильнее. Полосы минимумов отражения на кривых  $\mathcal{J}_{\lambda} = f(\lambda)$ силикателя при  $\mathcal{G}_{\lambda} = 0.7$  около 1.5 и 3.0 мкм обусловлены тем, что у 2.92 мкм лежит основная валентиая полоса колебаний группы 0.0000, в 0.0000 — 0.00000 — 0.0000 — 0.00000 — 0.00000 — 0.00000 — 0.00000 — 0.00000 —

При максимальном вдагосодержании коэффициенты для различных фракций силикателя значительно меньме коэффициентов Д тех же фракций при ♀ = 0,7 и становятся соизмеримнии со значениями коэффициента для воды, начиная с Д ➤ 1,3 мкм ДЛ. Толдины слоев силикателей при исследовании коэффициентов Д - 10 мм.

Исследованием ИК-спектров пропускания на ИКС-14 установлено, что силикатель с размерами зерен 0-0,25 мм при толщине слоя 0,25мм при  $\mathcal{P}=0.7$  в интервале длин волн I-5 мкм ИК-издучений не пропускает; при размерах зерен 0,25-0,5 и 0,5-1,0 мм и при толщинах слоев соответственно 0,508 и I,013 мм пропускание имеет место только в интервале I-2,5 мкм и коэффициент составляет 4-5%.

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

Рис. I, в подтверждает, что пространственное распределение отраженного излучения силикагелем различной дисперсности при ?-0,7 в житередле 0,75-2,5 мкм и для ? I,3 мкм вмеет диффузный характер. Аналогична картина и для кварцевого песка. Поэтому для повыжения к.п.д. терморадиационных сущильных установок необходимо применть ограждения с большим коэффициентом отражения.

На кривых  $\mathcal{D}_{\lambda} = f(\lambda)$  для тех же фракцый сухого и максимально увлажненного кварцевого песка отсутствуют полосы поглощения у $\lambda$  = 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 поглодении ИК-излучения. Знание оптических овойств материалов и величин облученности необходимо также для оналитического описания процессов внутреннего тепло- и массоперенноса в капиллярно-пористых телах при терморадиационной сушке.

Нами получени 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  $(T/I, F_0/=aF_0/I, F_0/=-\beta F_0-$  первый период сумки) в случае симметричного нагрева ИК-излучением с помощью интегральных преобразований Лапласа имеем следующие выражения для распределения потенциалов переноса тепла и массы:

$$T(X, F_0) = \alpha F_0 + \frac{1}{2} \left[ \alpha - \beta K_0^* - P_0(X) \right] (X^2 - 1) +$$

$$+ \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{i=1}^{\infty} C_{n_i} \cos \mu_n \partial_{\mu} X \exp \left( - \mu_n^2 F_0 \right) ;$$
(I)

$$\Theta(x,F_0) = -\beta F_0 - \frac{1}{2} \left[ \frac{P_0(x)}{K_0^n} (\hat{y}_1^2 + \hat{y}_2^2 - 1) + \beta (\hat{y}_1^2 + \hat{y}_2^2 - 1) + \frac{\alpha L}{K_0^n} (1 - \hat{y}_1^2) (1 - \hat{y}_2^2) \right] + \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{i=1}^{n} C_{m_i} \cos \mu_n \hat{y}_i X \exp(-\mu_n^2 F_0);$$
 (2)

$$C_{n_1} = -\frac{N_1 \cos N_n \mathcal{V}_b}{N_n^3 \mathcal{Y}(N_n)} \, \mathcal{C}_{n_2} = -\frac{N_2 \cos N_n \mathcal{V}_b}{N_n^3 \mathcal{Y}(N_n)} \, ; \qquad (3)$$

$$C_{m_4} = -\frac{M_1 \cos M_n v_2}{M_n^3 K_o^* y(M_n)}; \quad C_{m_2} = -\frac{M_2 \cos M_n v_2 + R_0(x) \cos M_n v_3 \cos M_n v_3}{M_n^3 K_o^*}$$
(4)

$$N_{4} = \frac{(1 - \hat{V}_{2}^{2}) \alpha - \beta K_{0}^{*} - P_{0}(X)}{\hat{v}_{1}^{2} - \hat{v}_{2}^{2}} ; N_{z} = \frac{-(1 - \hat{V}_{4}^{2}) \alpha + \beta K_{0}^{*} + P_{0}(X)}{\hat{v}_{4}^{2} - \hat{v}_{2}^{2}} ; (5)$$

$$M_{4} = \frac{-(1-v_{4}^{2})(1-v_{2}^{2})d + \beta K_{o}^{*}(1-v_{4}^{2}) + P_{o}(x)(1-v_{4}^{2})}{v_{4}^{2} - v_{2}^{2}};$$
(6)

$$M_{2} = \frac{(4 - \mathcal{V}_{2}^{*})(1 - \mathcal{V}_{2}^{*})\alpha - \beta K_{0}^{*}(1 - \mathcal{V}_{2}^{*}) - P_{0}(x)(1 - \mathcal{V}_{2}^{*})}{\mathcal{V}_{2}^{*} - \mathcal{V}_{2}^{*}} ; \qquad (7)$$

$$y(\mathcal{M}_n) = \frac{2}{\mathcal{M}_n} \cos \mu_n v_4 - \cos \mu_n v_2 - \frac{v_2}{2} \sin \mathcal{M}_n v_4 \cos \mu_n v_2^{-} (8)$$
$$-\frac{v_2}{2} \sin \mathcal{M}_n v_2 \cos \mu_n v_4 ;$$

$$\lambda_{\ell} = \frac{1}{2} \left[ \left( 1 + K_{o}^{*} P_{n} + \frac{1}{Lu} \right) + \left( -1 \right)^{\ell} \sqrt{\left( 1 + K_{o}^{*} P_{n} + \frac{1}{Lu} \right)^{2} - \frac{4}{Lu}} \right]$$
(9)
$$\left( \hat{\epsilon} = 1, 2 \right).$$

Здесь  $\mathcal{H}_n$  - корни характеристического уравнения  $\cos \mathcal{M}_n \mathcal{V}_2 = 0$ .

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]
с использованием конечных интегральных (in = и cose-преобразований Фурье [137]. Выражения нестационарных полей потенциалов переноса тепла и массы при краевых условиях второго рода в случае симметричного нагрева имеют следующий вид:

$$T'(X,F_{o}) = \frac{V_{a}-1}{V_{a}^{2}-V_{a}^{2}} \left\{ \int_{0}^{1} \int_{0}^{1} \left[ m_{a} K_{i,a} + n_{a} K_{i,m}(\xi) \right] d\xi + \frac{2}{V_{a}^{2}} \int_{0}^{\infty} \cos \Re X \int_{0}^{1} \left[ m_{a} K_{i,a} + n_{a} K_{i,m}(\xi) \right] \exp \left[ -\frac{\Re^{2}P}{V_{a}^{2}} (F_{o}-\xi) \right] d\xi - \frac{2(V_{a}-1)}{V_{a}P_{o}} \int_{0}^{\infty} \cos \Re X \int_{0}^{\infty} x$$

$$\times \left[ m_{a} K_{i,a} + n_{a} K_{i,a}(\xi) \right] \exp \left[ -\frac{\Re^{2}P}{V_{a}^{2}} (F_{o}-\xi) \right] d\xi \right\} ;$$
(10)

$$\Theta(X,F_{o}) = \frac{V_{a}^{2}-1}{V_{a}^{2}-V_{a}^{2}} \left\{ \frac{P_{n}}{(V_{a}^{2}-V_{a}^{2})V_{a}^{2}} \int_{0}^{F_{o}} \left[ m_{i}K_{i,q} + n_{i}K_{i,m}(\xi) \right] d\xi + \frac{2P_{n}}{(V_{a}^{2}-1)V_{a}^{2}} \int_{P=1}^{\infty} \cos \mathcal{G}PX \int_{0}^{F_{o}} \left[ m_{i}K_{i,q} + n_{i}K_{i,m}(\xi) \right] \exp\left[ -\frac{\mathcal{G}^{2}P^{2}}{V_{a}^{2}} \left( F_{o} - \xi \right) \right] d\xi - \frac{1}{V_{a}^{2}} \int_{0}^{F_{o}} \left[ m_{a}K_{i,q} + n_{a}K_{i,m}(\xi) \right] d\xi - \frac{2}{V_{a}^{2}} \int_{P=1}^{\infty} \cos \mathcal{G}PX \int_{0}^{F_{o}} m_{a}K_{i,q} + \frac{1}{V_{a}^{2}} \left[ m_{a}K_{i,q} + n_{a}K_{i,m}(\xi) \right] d\xi - \frac{2}{V_{a}^{2}} \int_{P=1}^{\infty} \cos \mathcal{G}PX \int_{0}^{F_{o}} m_{a}K_{i,q} + \frac{1}{V_{a}^{2}} \left[ m_{a}K_{i,q} + n_{a}K_{i,m}(\xi) \right] d\xi + \frac{2}{V_{a}^{2}} \int_{0}^{\infty} \left[ m_{a}K_{i,q} + n_{a}K_{i,q}(\xi) \right] d\xi + \frac{2}{V_{a}^{2}} \int_{0}^{\infty} \left[ m_{a}K_{i,q} + n_{a}K_{i,q}(\xi) \right] d\xi + \frac{2}{V_{a}^{2}} \int_{0}^{\infty} \left[ m_{a}K_{i,q} + n_{a}K_{i,q}(\xi) \right] d\xi + \frac{2}{V_{a}^{2}} \int_{0}^{\infty} \left[ m_{a}K_{i,q} + n_{a}K_{i,q}(\xi) \right] d\xi + \frac{2}{V_{a}^{2}} \int_{0}^{\infty} \left[ m_{a}K_{i,q} + n_{a}K_{i,q}(\xi) \right] d\xi + \frac{2}{V_{a}^{2}} \int_{0}^{\infty} \left[ m_{a}K_{i,q} + n_{a}K_{i,q}(\xi) \right] d\xi + \frac{2}{V_{a}^{2}} \int_{0}^{\infty} \left[ m_{a}K_{i,q} + n_{a}K_{i,q}(\xi) \right] d\xi + \frac{2}{V_{a}^{2}} \int_{0}^{\infty} \left[ m_{a}K_{i,q} + n_{a}K_{i,q}(\xi) \right] d\xi + \frac{2}{V_{a}^{2}} \int_{0}^{\infty} \left[ m_{a}K_{i,q} + n_{a}K_{i,q}(\xi) \right] d\xi + \frac{2}{V_{a}^{2}} \int_{0}^{\infty} \left[ m_{a}K_{i,q} + n_{a}K_{i,q}(\xi) \right] d\xi + \frac{2}{V_{a}^{2}} \int_{0}^{\infty} \left[ m_{a}K_{i,q} + n_{a}K_{i,q}(\xi) \right] d\xi + \frac{2}{V_{a}^{2}} \int_{0}^{\infty} \left[ m_{a}K_{i,q} + n_{a}K_{i,q}(\xi) \right] d\xi + \frac{2}{V_{a}^{2}} \int_{0}^{\infty} \left[ m_{a}K_{i,q} + n_{a}K_{i,q}(\xi) \right] d\xi + \frac{2}{V_{a}^{2}} \int_{0}^{\infty} \left[ m_{a}K_{i,q} + n_{a}K_{i,q}(\xi) \right] d\xi + \frac{2}{V_{a}^{2}} \int_{0}^{\infty} \left[ m_{a}K_{i,q} + n_{a}K_{i,q}(\xi) \right] d\xi + \frac{2}{V_{a}^{2}} \int_{0}^{\infty} \left[ m_{a}K_{i,q} + n_{a}K_{i,q}(\xi) \right] d\xi + \frac{2}{V_{a}^{2}} \int_{0}^{\infty} \left[ m_{a}K_{i,q} + n_{a}K_{i,q}(\xi) \right] d\xi + \frac{2}{V_{a}^{2}} \int_{0}^{\infty} \left[ m_{a}K_{i,q} + m_{a}K_{i,q}(\xi) \right] d\xi + \frac{2}{V_{a}^{2}} \int_{0}^{\infty} \left[ m_{a}K_{i,q} + m_{a}K_{i,q}(\xi) \right] d\xi + \frac{2}{V_{a}^{2}} \int_{0}^{\infty} \left[ m_{a}K_{i,q} + m_{a}K_{i,q} \right] d\xi + \frac{2}{V_{a}^{2}} \int_{0}^{\infty} \left[ m_{a}K_{i,q} + m_{a}K_{i,$$

$$n_1 = \frac{V_1^2 - 1}{P_n}$$
;  $m_2 = \frac{P_n}{V_2^2 - 1}$ ;  $m_1 = n_2 = 1$ . (I2)

Предполагая независимость критериев Pn, Kiq, Kim от критерия  $F_o$  и постоянство теплофизических коэффициентов для периода постоянной скорости сушки, получено выражение скорости сушки

$$\frac{d\bar{u}}{d\bar{\varepsilon}} = \frac{\alpha u_o L_u P_n E(1-9)}{\lambda t_o \ell} + \frac{\alpha L_u K_{im} (\epsilon P_n K_o - \sqrt{(\frac{1}{L_u} + \epsilon K_o P_n + 1)^2 - \frac{4}{L_u}}}{\ell^2 \sqrt{(\frac{4}{L_u} + \epsilon K_o P_n + 1)^2 + \frac{4}{L_u}}}$$
(13)

Обозначения теплофизических величин общепринятые в литерату-

Как видно из этого выражения, величина при терморадиационной 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 капиллярнопаршетых 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  $\overline{u} = f(\mathcal{E})$ , скорости сушки и поля температур. Величины найдены дискретным дифреренцированием табулированной функции u = f(2)/147.

на рис. 2 и 3 представлены кривые сушки кварцевого песка с размером зерен 0-0,25 им  $\overline{u} = f(\mathcal{E})$  — I скорости сушки  $\frac{\partial u}{\partial \mathcal{E}}$ 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 17 мм. Из рисунков видно, что скорости сушки в периоде постоянной скорости сушки при нагреве темными ИК-излучателями примерно в 1,8 раза больше этой величины при нагреве светлыми ИК-излучателями, а общее время сушки сокращается в два раза.

Такое значительное возрастание величины общего времени сушки при нагреве темными ИК-излучателями по сравнению со светими можно объяснить зависимостью  $\Omega = f(\lambda)$  кварцевого песка и спектральным распределением энергии в спектре излучателей.

Методом гаммаскопии узкого 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 1.0-2.5 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 при сушке последними.

На рис. 4,5 приведены аналогичные кривые при тех же условиях оушки для силикателя КСК-2 с размером зерен 0-0,25 мм и толщине олоя 17 мм. Анализ этих кривых позволяет также установить значительное влияние согласования онтических свойств капиллярно-пористых тел со спектральными характеристиками ИК-излучателей на кинети-

ку и длительность процесса терморадиационной сушки.

## Условные обозначения

Ф - относительная влажность воздуха;

интенсивность отраженного излучения;

угол диффузного отражения;

а, β - постоянные величины;

X – безразмерная координата;

Е - облученность;

🗜 - коэффициент отражения излучения.

## литература

- 1. Лыков А. В. Изв. АН СССР, ОТН, 1949, 9, 1320.
- 2. 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. — В кн.: 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. и др. ИФМ, 1966, 9, 296.
- 8. Кропоткин М. А., Козырев Б. П. Изв. вузов. Физика, 1965, 3, 27.
- 9. К и с л о в с к и й Л. Д. Оптика и спектроскопия, 1959, 7, 3II.
- IO. 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.
- ГЗ. Т р а н т е р К. Дж. Интегральные преобразования в математической физике. М., Гостехиздат, 1957.
- 14. Ланцов К. Практические методы прикладного анализа. М., 1961.

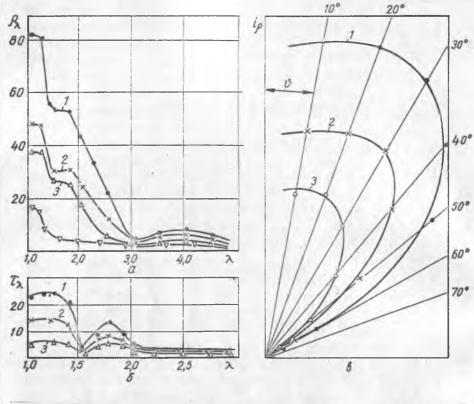


Рис.І. Основные оптические характеристики силикагеля КСК-2: а - коэффициенты  $\rho$  (%): І-З соответственно фракций 0-0,25; 0,25-0,5; 0,5-І,0 мм в воздушносухом состоянии ( $\varphi$  = 0,7); 4 - фракции 0-0,25 мм при максимальном увлажнении; 6 - коэффициенты  $\rho$  (%): І-З соответственно фракций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

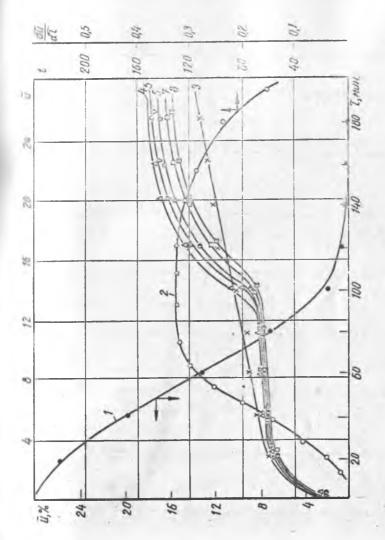


Рис.2. Кривые кинстики сушки кварцевого песка светиная ванучательни (дампа 30-3).



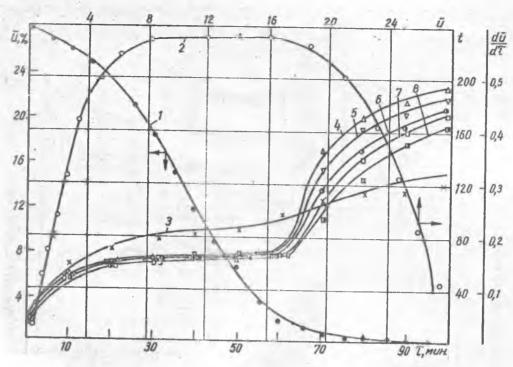


Рис.3. Кривые кинетики сушки кварцевого песка темными излучателями (системы двух излучателей NP-I).

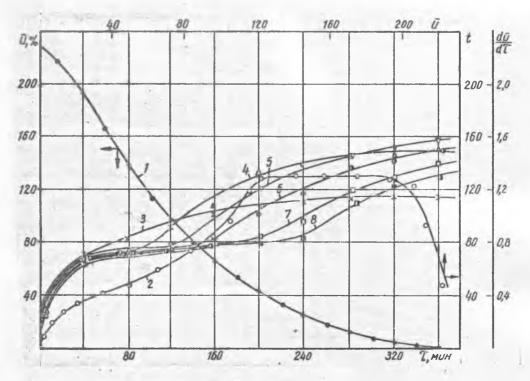


Рис.4. Кривые кинетики сушки силикателя КСК-2 светлыми излучателями.

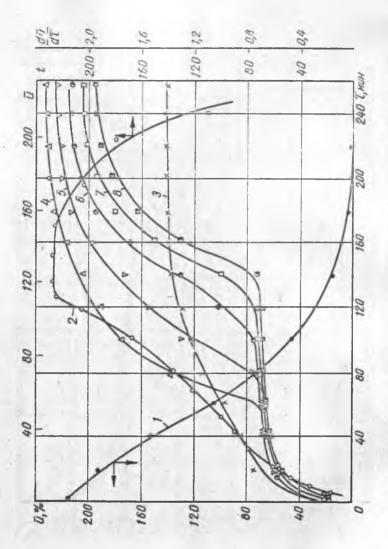


Рис.5. Кривие кинетики сушки силикагеля КСК-2 темным излучателями.