К 96 Р-Р 360/—

МИНИСТЕРСТВО ПРОСВЕЩЕНИЯ УССР

КИЕВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
им. А. М. ГОРЬКОГО

Аспирант И. М. КУЧЕРУК

КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ПРОЦЕССА СУШКИ ТИПИЧНЫХ ДИСПЕРСНЫХ ТЕЛ ИНФРАКРАСНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель — кандидат физико-математических наук,
доцент В. П. Дущенко

360 (Чуча)



76

НБ НПУ
імені М.П. Драгоманова
100313264

КИЕВ — 1967

МИНИСТЕРСТВО ПРОСВЕЩЕНИЯ УССР

КИЕВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
им. А. М. ГОРЬКОГО

Аспирант И. М. КУЧЕРУК

КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ПРОЦЕССА СУШКИ ТИПИЧНЫХ ДИСПЕРСНЫХ ТЕЛ ИНФРАКРАСНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель — кандидат физико-математических наук,
доцент В. П. Дущенко

КИЕВ — 1967

Киевский государственный педагогический институт им. А. М. Горького
Киев, Бульвар Шевченко, 22/24

Направляем Вам для ознакомления автореферат диссертации Кучерука И. М., представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

Работа выполнена на кафедре физики Киевского государственного педагогического института им. А. М. Горького.

Решением Ученого Совета физико-математического факультета Киевского государственного педагогического института им. А. М. Горького официальными оппонентами утверждены:

1. Доктор технических наук, профессор В. Н. Стабников.
2. Кандидат физико-математических наук, доцент М. В. Венедиктов.

Автореферат разослан « . . » . . . . . 1967 г.

Защита диссертации состоится « . . » . . . . 1967 г. в Киевском государственном педагогическом институте им. А. М. Горького (Киев, Бульвар Шевченко, 22/24).

Большинство материалов, подвергаемых сушке в различных отраслях народного хозяйства, представляют собой влажные дисперсные тела. В последнее время для сушки дисперсных тел находит широкое применение инфракрасное (ИК) излучение. При этом значительно интенсифицируется процесс внутреннего тепло- и массопереноса, сокращается длительность сушки при хороших качественных показателях обрабатываемых материалов.

В решениях Первой и Второй Всесоюзных конференций по тепло- и массообмену (г. Минск, 1961 и 1964 гг.), Сессии Научного Совета АН УССР по проблеме «Высокотемпературная теплофизика» (г. Киев, 1966 г.) и др. отмечается необходимость дальнейшего расширения исследований с целью повышения эффективности применения ИК излучения для процессов сушки.

Применение ИК излучения для сушки в большинстве случаев ведется без согласования спектральных характеристик ИК излучателей с оптическими свойствами обрабатываемых тел, что приводит к неэффективному использованию ИК излучателей.

Для эффективного использования ИК излучателей в процессах сушки влажных дисперсных тел необходимо, чтобы отношение мощности излучения в области спектра, для которого отражательная способность этих тел имеет минимальное значение, к мощности суммарного излучения было максимальным.

В литературе почти отсутствуют сведения об оптических свойствах дисперсных тел в ИК области спектра. Имеющиеся отрывочные сведения в большинстве случаев приводятся без указания основных физико-химических и других характеристик этих тел (дисперсность, влагосодержание и др.).

Значительные работы по исследованию оптических свойств дисперсных и других тел в связи с непосредственными задачами выбора оптимальных режимов сушки ИК излучением и некоторыми другими задачами выполнены А. С. Гинзбургом, В. В. Красниковым, Н. Г. Селюковым (МТИПП), Г. Д. Рабиновичем, Л. С. Слободкиным (ИТМО АН БССР),

а также Б. П. Козыревым, М. А. Кропоткиным, В. Зибером, В. А. Говисом и др.

Задачи обеспечения равномерности облученности влажных дисперсных тел (особенно термолабильных) при сушке ИК излучением, а также задачи аналитического описания кинетики процесса сушки, выбора оптимальных режимов сушки и расчета разного рода сушильных устройств с ИК излучателями требуют знания спектральных характеристик и полей облученности отдельно взятых и систем ИК излучателей для различных режимов их использования.

Литературные данные по этому вопросу имеют также отрывочный характер.

Проводятся широкие исследования процессов тепло- и массообмена в дисперсных телах при сушке ИК излучением, теория которых разработана в трудах акад. АН БССР А. В. Лыкова, Ю. А. Михайлова, П. Д. Лебедева, А. С. Гинзбурга, Г. Д. Рабиновича и др.

Однако, в настоящее время почти отсутствуют систематические комплексные теплофизические исследования, посвященные изучению кинетики процесса сушки ИК излучением типичных влажных дисперсных тел с однородной и разнородной формой связи влаги.

В большинстве случаев при исследовании кинетики процесса сушки влажных дисперсных тел ИК излучением совершенно упускается вопрос о необходимости согласования оптических свойств обрабатываемых тел со спектральными характеристиками ИК излучателей.

В связи с этим основными задачами диссертационной работы являются:

1. Исследование оптических свойств типичных дисперсных тел.

2. Дальнейшее исследование спектральных характеристик и полей облученности промышленных светлых и темных ИК излучателей.

3. Исследование кинетики процесса сушки влажных дисперсных тел (типичных капиллярнопористых и коллоидных капиллярнопористых тел) ИК излучением с учетом их оптических свойств и спектральных характеристик ИК излучателей.

При решении поставленных задач в экспериментальной части работы нами использованы современные методы исследования в области тепло- и массообмена и инфракрасной спектроскопии.

Диссертация состоит из введения, четырех глав и общих выводов, изложенных на 144 страницах машинописного текста. Кроме того, диссертация содержит 61 рисунок, 18 таблиц и перечень использованной литературы.

I

В первой главе диссертации приведен анализ современного состояния теории внутреннего тепло- и массопереноса во влажных дисперсных телах в процессе сушки ИК излучением, которая разработана в фундаментальных работах советских ученых А. В. Лыкова, Ю. А. Михайлова, П. Д. Лебедева, А. С. Гинзбурга и др.

Исходя из системы дифференциальных уравнений тепло- и массопереноса во влажных дисперсных телах при сушке ИК излучением, предложенной А. В. Лыковым, нами получены решения задач по нахождению нестационарных полей потенциалов переноса тепла $T\ (X, \mathrm{Fo})$ и массы $\Theta(X, \mathrm{Fo})$ в неограниченной пластине при граничных условиях первого и второго рода.

Для зонального расчета нестационарных полей потенциалов переноса тепла и массы в неограниченной пластине при несимметричном ИК нагреве в случае проникновения ИК излучения на некоторую глубину система дифференциальных уравнений в безразмерной форме имеет вид:

$$\frac{\partial T(X_1\,\mathrm{Fo})}{\partial\,\mathrm{Fo}} = \frac{\partial^2 \mathrm{T}(X_1\,\mathrm{Fo})}{\partial X^2} - \varepsilon\,\mathrm{Ko}\,\frac{\partial\,\Theta(X_1\,\mathrm{Fo})}{\partial\,\mathrm{Fo}} + \mathrm{Po}(X)$$

$$(0 \leqslant X \leqslant 1,\ \mathrm{Fo} > 0) \qquad (1)$$

$$\frac{\partial\,\Theta(X_1\,\mathrm{Fo})}{\partial\,\mathrm{Fo}} = \mathrm{L}_u\,\frac{\partial^2\,\Theta(X_1\,\mathrm{Fo})}{\partial X^2} - \mathrm{Lu\,Pn}\,\frac{\partial^2\,\mathrm{T}_1(\mathrm{Fo})}{\partial X^2}$$

$$0 \leqslant X \leqslant 1,\ \mathrm{Fo} > 0) \qquad (2)$$

при начальных условиях

$$T(X,\ 0) = 0;\quad \Theta(X, 0) = 0 \qquad (3)$$

и граничных условиях

$$T(0, \mathrm{Fo}) = \mathrm{F}_1(\mathrm{Fo});\quad T(1, \mathrm{Fo}) = \mathrm{F}_2(\mathrm{Fo}) \qquad (4)$$

$$\Theta(0, \mathrm{Fo}) = \Psi_1(\mathrm{Fo});\quad \Theta(1, \mathrm{Fo}) = \Psi_2\,\mathrm{Fo}) \qquad (5)$$

При поверхностном поглощении ИК излучения дисперсными телами для симметричного ИК-терморадиационного нагрева неограниченной пластины толщиной $2l$ система дифференциальных уравнений для зонального расчета нестационарных полей потенциалов $T\ (X, \mathrm{Fo})$ и $\Theta(X, \mathrm{Fo})$ имеет вид:

$$\frac{\partial T\,(X, \mathrm{Fo})}{\partial \mathrm{Fo}} = \frac{d^2 T(X, \mathrm{Fo})}{\partial X^2} - \varepsilon \mathrm{Ko}\, \frac{\partial \Theta\,(X, \mathrm{Fo})}{\partial \mathrm{Fo}}; \qquad (6)$$

$$\frac{\partial \Theta\,(X, \mathrm{Fo})}{\partial \mathrm{Fo}} = \mathrm{Lu}\, \frac{\partial^2 \Theta(X, \mathrm{Fo})}{\partial X^2} - \mathrm{Lu}\, \mathrm{Pn}\, \frac{\partial T^2(X, \mathrm{Fo})}{\partial X^2} \qquad (7)$$

при начальных условиях (3) и граничных условиях:

$$\frac{\partial T\,(1, \mathrm{Fo})}{\partial X} = \mathrm{Ki}_q; \quad \frac{\partial \Theta\,(1, \mathrm{Fo})}{\partial X} = \mathrm{Ki}_m(\mathrm{Fo}) \qquad (8)$$

и условиях симметрии потенциалов $T\ (X, \mathrm{Fo})$ и $\Theta\,(X, \mathrm{Fo})$:

$$\frac{\partial T\,(0, \mathrm{Fo})}{\partial X} = \frac{\partial \Theta\,(0, \mathrm{Fo})}{\partial X} = 0 \qquad (9)$$

Для случая конвективно-ИК-терморадиационного нагрева решение системы дифференциальных уравнений (6, 7) проведено при начальных условиях (3) и граничных условиях:

$$\frac{\partial T\,(1, \mathrm{Fo})}{\partial X} = \mathrm{Ki}_q - \mathrm{Bi}_q\,(\mathrm{Fo}); \quad \frac{\partial \Theta\,(1, \mathrm{Fo})}{\partial X}\, \mathrm{Ki}_m(\mathrm{Fo}). \qquad (10)$$

и условиях симметрии (9).

Решение этих задач по нахождению нестационарных полей потенциалов переноса тепла и массы для случая постоянства тепло- и массообменных коэффициентов и оптических свойств дисперсных тел проведено методом Генри-Кранка-Смирнова, который позволяет систему взаимосвязанных дифференциальных уравнений свести к системе двух несвязанных дифференциальных уравнений типа теплопроводности. Решение последних выполнено с помощью конечных интегральных sin и cos — преобразований Фурье.

Предполагая независимость критериев Pn, Ki_q, Ki_m от критерия Fo и постоянство коэффициентов тепло- и массопереноса для периода постоянной скорости сушки получено выражение скорости сушки $\frac{d\bar{u}}{d\tau}$ в следующем виде:

$$\frac{d\bar{u}}{d\tau} = \frac{\bar{a}u_0 \,\mathrm{Lu}\,\mathrm{Pn}\,E(1-\rho)}{\lambda t_0 l} +$$

$$+ \frac{a\,\mathrm{Lu}\,\mathrm{Ki}_m\left(\varepsilon\,\mathrm{Pn}\,\mathrm{Ko} - \sqrt{\left(\frac{1}{\mathrm{Lu}} + \varepsilon\,\mathrm{Pn}\,\mathrm{Ko} + 1\right)^2 - \frac{4}{\mathrm{Lu}}}\right)}{l^2\sqrt{\left(\frac{1}{\mathrm{Lu}} + \varepsilon\,\mathrm{Pn}\,\mathrm{Ko} + 1\right)^2 - \frac{4}{\mathrm{Lu}}}} \qquad (11)$$

Как видно из (11) величина $\frac{d\bar{u}}{d\tau}$ в периоде постоянной скорости сушки находится в линейной зависимости от величины облученности E при постоянстве спектрального состава ИК излучения, что и подтверждено нами опытным путем.

II

Во второй главе приводится обзор методов исследования спектральных характеристик и полей облученности ИК излучателей.

Исследование спектральных характеристик некоторых ИК излучателей выполнено А. С. Гинзбургом, В. В. Красниковым, Н. Г. Селюковым, А. М. Левиным и др.

Нами проведено исследование спектрального распределения энергии излучения некоторых типичных широко применяемых в технике ИК-терморадиационной сушки светлых ИК излучателей: ИК ламп марки ЗС-2, ЗС-3, НИК—$220\times1000_{\text{тр}}$, ИК лампы завода «Элпром» (г. Сливен, Болгария, 250 *вт*, 220 *в*), ИК лампы завода VEB (ГДР, 250 *вт*, 220 *в*), а также группы темных ИК излучателей: ТЭН ИР-1 (700 *вт*, 220 *в*) Горьковского завода, ТЭН-37 (1500 *вт*, 220 *в*) Московского завода, ЭТ (250 *вт*, 220 *в*), ЭТ (500 *вт*, 220 *в*), ЭТ (800 *вт*, 220 *в*) Миасского завода, ЭТ (0,4 *квт*, 220 *в*), ЭТ (0,8 *квт*, 220 *в*), ЭТ (0,9 *квт*, 220 *в*), ЭТ (1 *квт*, 220 *в*) Фастовского завода. Исследование спектров излучения ИК излучателей проведено с помощью инфракрасного спектрометра ИКС-12.

При этом установлено, что максимальная спектральная интенсивность величины излучения для исследованных светлых ИК излучателей при номинальных напряжениях питания приходится на интервал длин волн 1,3—1,4 *мкм;* для исследованных темных ИК излучателей — на 3—4 *мкм.*

При изменении напряжения питания от номинального до 80 *в* для светлых ИК излучателей (до 50 *в* для ИК лампы ЗС-2) и до 120 *в* для темных ИК излучателей λ_{max} смещается: для излучателей ЗС-2 — от 1,381 до 1,607 *мкм*, для ЗС-3 и НИК — $220 \times 1000_{тр}$ — от 1,316 до 1,562 *мкм*, для ИК лампы завода «VEB» — от 1,362 до 1,650 *мкм*, для ИК лампы завода «Элпром» — от 1,428 до 1,650 *мкм*, для ИР-1 — от 3,00 до 3,84 *мкм*, для ТЭН-37 — от 3,07 до 4,03 *мкм*, для группы ЭТ Фастовского завода примерно от 3,0 до 4,0 *мкм* и для группы ЭТ Миасского завода примерно от 3,8 до 4,7 *мкм*.

На кривых зависимости $i_\lambda = f(\lambda)$ наблюдаются полосы поглощения, которые обусловлены поглощением ИК излучения парами воды и углекислым газом атмосферы.

При обработке опытных данных установлено, что примерно 75% регистрируемой спектрометром энергии излучения светлых ИК излучателей приходится на область спектра 1,0—2,0 *хмкм*; 90% регистрируемой энергии излучения темных ИК излучателей приходится на 1,5—5,5 *мкм*. Суммарная интенсивность величины излучения светлых ИК излучателей при понижении напряжения питания от номинального до 80 *в* составляет примерно 6—10% таковой величины при номинальном напряжении питания; для темных ИК излучателей при 120 *в* суммарная интенсивность величины излучения составляет примерно 8—14% суммарной интенсивности величины излучения при номинальном напряжении питания.

Установлено также, что при понижении напряжения питания ИК излучателей терморадиационный коэффициент полезного действия светлых и темных ИК излучателей в областях спектра соответственно 0,7—2,6 и 1,5—5,5 *мкм* значительно понижается.

Яркостная температура излучающих элементов светлых ИК излучателей измерялась с помощью прецизионного пирометра ОП-48, температура темных ИК излучателей измерялась хромель-алюмелевой термопарой.

Путем обработки опытных данных показано, что исследуемые ИК излучатели качественно подчиняются закону Вина.

Исследование полей облученности, создаваемых отдельно взятыми и системами ИК излучателей при разных расстояниях h от излучателей до облучаемой поверхности и для фиксированных h при различных напряжениях питания выполнено с помощью балансомера М-10 в совокупности с гальванометром ГСА-1 и специального устройства с применением датчика теплового потока, разработанного в Институте тех-

нической теплофизики АН УССР. При этом темные ИК излучатели использовались с рефлекторами от ИР-1.

По полученным эмпирическим формулам эпюр облученности рассчитан терморадиационный коэффициент полезного действия светлых ИК излучателей, а также те наименьшие расстояния L между излучателями, при которых облученность от системы ИК излучателей будет равномерной.

При этом получены эмпирические правила размещения светлых и темных ИК излучателей, для получения равномерной облученности.

Облученность поверхности тел при сушке ИК излучением можно считать равномерной при условии, когда локальные облученности этой поверхности отличаются не более $\pm 5\%$ от среднего значения облученности всей облучаемой поверхности тела.

Для ячейки, состоящей из четырех ИК ламп типа ЗС, размещенных по вершинам квадрата, наилучшая равномерность облученности обеспечивается при условии, когда расстояние от вершины излучателя до облучаемой плоской поверхности в 1,75 раза больше осевого расстояния L между соседними излучателями, т. е. $h = 1{,}75\,L$, начиная с $h \geqslant 0{,}3$ *м*. Это правило применимо и к системе ИК излучателей, состоящей из таких ячеек.

Наиболее равномерная облученность создается системой темных ИК излучателей с рефлекторами от ИР-1 при условии, когда расстояние от облучаемой поверхности к излучателю составляет 1,4 расстояния между осями излучателей, т. е. $h = 1{,}4\,L$, начиная с $h \geqslant 0{,}15$ *м*.

III

В третьей главе приводятся анализ методов и результаты экспериментального исследования оптических свойств типичных дисперсных тел различной физико-химической природы и и пористой структуры.

Исходя из большого разнообразия дисперсных тел, нами выбраны объекты исследования, которые по своему физико-химическому строению, дифференциальным водоудерживающим свойствам и пористой структуре, являются наиболее характерными для основных типов дисперсных тел.

Как представитель грубопористого тела с однородной формой связи влаги взят речной кварцевый песок дисперсности 0—0,25; 0,25—0,5; 0,5—1,0 *мм*.

В качестве модельных поликапиллярнопористых тел с раз-

нородной формой связи влаги, обладающих развитой системой микрокапилляров нами выбраны однороднокрупнопористый силикагель КСК-2 и однороднореднепористый силикагель КСС-4 дисперсности 0—0,25; 0,25—0,5; 0,5—1,0 *мм*.

В качестве типичных коллоидных капиллярнопористых тел нами выбраны монотермитная с примесями каолинита и кварца огнеупорная Часовъярская глина и Пыжевский бентонит, как типичный монтмориллонитовый глинистый минерал.

Исследование дифференциальных водоудерживающих свойств и структурно-геометрических характеристик силикагелей КСК-2 и КСС-4 выполнено в лаборатории теплофизики КГПИ им. А. М. Горького В. П. Дущенко, М. С. Панченко, И. А. Романовским. Исследование дифференциальных водоудерживающих свойств этих глинистых минералов при различных температурах проводилось Ф. Д. Овчаренко, М. Ф. Казанским, В. П. Дущенко и Х. Б. Байджановым.

Обстоятельные исследования тепло- и массообменных коэффициентов дисперсных тел в зависимости от влагосодержания и температуры в связи с различием форм связи влаги выполнены М. Ф. Казанским, В. П. Дущенко, Х. Б. Байджановым и другими авторами.

Комплекс оптических свойств влажных тел определяется спектральным коэффициентом отражения ρ_λ, поглощения a_λ, излучения ε_λ, пропускания τ_λ, экстинции ИК излучения k_λ, коэффициентами отражения в данной области спектра ρ и другими величинами. Наиболее важными для эффективного выбора ИК излучателей при сушке влажных дисперсных тел являются коэффициенты ρ_λ, a_λ, τ_λ, k_λ.

Так как большинство дисперсных тел в значительной мере рассеивают излучение диффузно и почти непрозрачны даже при малых толщинах слоя, адсорбционный спектральный анализ для исследования их оптических характеристик непригоден.

Определяющей спектроскопической характеристикой таких тел является спектр отражения, т. е. зависимость коэффициента ρ_λ от длины волны λ ($\rho_\lambda = t(\lambda)$).

Определение коэффициентов ρ_λ объектов исследования в области ИК спектра 1,0—5,0 *мкм* нами проведено методом зеркальной полусферы в спектрометрической лаборатории МТИПП.

Установлено и объяснено увеличение коэффициентов ρ_λ кварцевого песка и силикагелей в области гигроскопического состояния ($\varphi = 0{,}7$) от увеличения степени дисперсности.

Кривые $\rho_\lambda = f(\lambda)$ для кварцевого песка ($\varphi = 0{,}7$) в области ИК спектра 1,0—5,0 *мкм* имеют значительный минимум, приходящийся примерно на длину волны $\lambda = 3{,}0$ *мкм*. Это обусловлено симметричными и антисимметричными валентными колебаниями характерных для свободных молекул воды, содержащейся в кварцевом песке.

На кривых $\rho_\lambda = f(\lambda)$ для силикагелей КСК-2 и КСС-4 ($\varphi = 0{,}7$) наблюдаются полосы минимумов отражения в областях ИК спектра около 3,0; 1,5 и 2,0 *мкм*. В гигроскопическом состоянии силикагелей ($\varphi = 0{,}7$) влага микрокапилляров внутри зерен и межзернового пространства находится в жидком и парообразном состояниях. Наличие полос минимумов отражения на кривых $\rho_\lambda = f(\lambda)$ силикагелей ($\varphi = 0{,}7$) следует объяснять характерными полосами поглощения жидкой воды и влаги парообразного состояния. При $\varphi = 0{,}7$, как следует из изотерм сорбции, полученных при $t = 20°C$, влагосодержания силикагелей КСС-4 и КСК-2 соответственно равны —38,0 и 15,0%. Поэтому наблюдаемые полосы минимумов отражения на кривых $\rho_\lambda = f(\lambda)$ более значительны для силикагеля КСС-4.

Для длин волн $\lambda \geqslant 1{,}5$ *мкм* коэффициенты ρ_λ кварцевого песка и силикагелей КСК-2, КСС-4 максимальной влагоемкости мало зависят от степени дисперсности и соизмеримы с коэффициентом ρ_λ для воды.

При исследовании коэффициентов ρ_λ Пыжевского бентонита и Часовъярской глины при $\varphi = 0{,}7$ и в области максимальной влагоемкости установлено, что коэффициенты ρ_λ в гигроскопической области значительно больше коэффициентов ρ_λ этих тел при максимальной влагоемкости. Наличие полос минимумов отражения на кривых $\rho_\lambda = f(\lambda)$ для Пыжевского бентонита и Часовъярской глины в области около 3,0; 1,5; 2,0 *мкм* следует объяснять теми же причинами, что и для силикагелей. Более значительные минимумы отражения для Пыжевского бентонита по сравнению с минимумами отражения Часовъярской глины при $\varphi = 0{,}7$ находятся в прямой связи с гидрофильными свойствами этих тел.

С уменьшением влагосодержания коэффициент ρ_λ дисперсных тел значительно изменяется (увеличивается) в области спектра 1,0—2,5 *мкм*.

Путем графического интегрирования функциональных зависимостей $\rho_\lambda = f(\lambda)$ получены коэффициенты ρ объектов исследования для областей спектра 1,0—2,6; 1,5—5,0 и 1,0—5,0 *мкм* при $\varphi = 0{,}7$ и максимальной влагоемкости.

Из спектров отражения получены спектральные коэффициенты излучения ε_λ и поглощения a_λ объектов исследования.

Исследование спектральных коэффициентов пропускания проведено с помощью инфракрасного спектрофотометра ИКС-14.

Установлено, что кварцевый песок дисперсности 0,5—1,0 *мм* при толщине слоя $l = 1{,}013$ *мм* в воздушно сухом состоянии ($\varphi = 0{,}7$) при максимальной влагоемкости в области ИК спектра 1,0—5,0 *мкм* излучения не пропускает. Аналогичные результаты получены при $\varphi = 0{,}7$ для силикагелей КСК-2 и КСС-4 дисперсности 0—0,25 *мм* ($l = 0{,}25$ *мм*), а также для Пыжевского бентонита и Часовъярской глины дисперсности 0—0,001 *мм* ($l = 0{,}1$ *мм*).

Для кварцевого песка максимальной влагоемкости дисперсностей 0—0,25 и 0,25—0,5 *мм* при толщинах слоев соответственно 0,25 и 0,508 *мм* в области ИК спектра 1,0—2,5 *мкм* коэффициенты $\tau_\lambda = 2$—3%; для силикагелей КСК-2 и КСС-4 дисперсности 0,25—0,5 и 0,5—1,0 *мм* при $\varphi = 0{,}7$ и толщинах слоев соответственно 0,508 и 1,013 *мм* в области ИК спектра 1,0—2,5 *мкм* коэффициент $\tau_\lambda = 4$—5%.

Для силикагелей КСК-2 и КСС-4 при максимальных влагоемкостях в области ИК спектра 1,0—2,5 *мкм* общий ход зависимости $\tau_\lambda = f(\lambda)$ имеет вид аналогичный кривой $\tau_\lambda = f(\lambda)$ для воды; при уменьшении дисперсности коэффициенты τ_λ увеличиваются и в значительной мере определяются их пористостью.

На основе спектров пропускания, полученных с помощью спектрометра ИКС-12, допуская независимость, коэффициентов ρ_λ дисперсных тел от толщины образцов, проведен расчет коэффициентов экстинции k_λ объектов исследования при $\varphi = 0{,}7$ и максимальной влагоемкости.

Для расчета сушильных устройств с ИК излучателями необходимо также знание пространственного распределения отраженного ИК излучения дисперсными телами.

Изучение пространственного распределения отраженного излучения объектами исследования выполнено с помощью приставки ИПО-12 к спектрометру ИКС-12.

Установлено, что пространственное распределение отраженного излучения кварцевым песком дисперсности 0—0,25 *мм* в области спектра 0,9—2,5 и 1,5—5,0 *мкм*, а также Пыжевским бентонитом дисперсности 0—0,001 *мм* для $\lambda = 1{,}3$ *мкм* подчиняется закону косинусов с точностью $\pm 10\%$; т. е. имеет чисто диффузный характер. Для кварцевого песка

дисперсности 0,25—0,5; 0,5—1,0 *мм*, силикагелей КСК-2 и КСС-4 дисперсности 0—0,25; 0,25—0,5; 0,5—1,0 *мм*, а также Часовъярской глины дисперсности 0—0,001 *мм* и в виде сухой пластины пространственное распределение отраженного излучения имеет диффузный характер. Пространственное распределение отраженного излучения для Пыжевского бентонита в виде сухой пластины для $\lambda = 1{,}3$ *мкм*, в областях спектра 0,9—2,5; 1,6—5,0 *мкм* имеет направленный характер. Все эти исследования выполнены при $\varphi = 0{,}7$ и 20°С.

IV

Для выяснения влияния спектрального состава ИК излучения на кинетику процесса сушки типичных влажных дисперсных тел с учетом их оптических свойств нами проведены исследования кинетики процесса сушки этих тел различной степени дисперсности светлыми и темными ИК излучателями при одинаковой величине облученности.

Для выяснения влияния степени дисперсности, внутризерновой пористости, а также глубины проникновения ИК излучения на кинетику процесса сушки нами также проведено исследование кинетики процесса сушки этих тел при различных облученностях с постоянным спектральным составом излучения ИК излучателей. При этом использованы светлые ИК излучатели, выбор которых обусловлен тем, что наиболее сильная зависимость оптических свойств дисперсных тел от влагосодержания и степени дисперсности проявляется в области спектра 1,0—2,5 *мкм*.

Исследование кинетики процесса сушки влажных дисперсных тел ИК излучением проведено на специально сконструированных лабораторных установках, которые обеспечивали возможность проведения исследований кинетики процесса сушки при ИК — терморадиационном, конвективно-ИК-терморадиационном и конвективном (с постоянной температурой окружающей среды $t_c = 110$°С) способах подвода тепла.

Непрерывная запись убыли массы сушимых тел осуществлялась на ЭПП-09М2 с помощью фотоэлектрических весов, предложенных М. Ф. Казанским. Чувствительность весов составляла 20 *мг/мм*, точность взвешивания — $\pm 0{,}5\%$.

Исследуемые образцы помещались в специальной цилиндрической кювете (внутренний диаметр 100 *мм*, высота 17 *мм*).

Медь — константановые термопары, используемые для регистрации температурного поля внутри тела и над поверх-

ностью образца, размещались на специальной стойке строго параллельно поверхности облучения образцов. Расстояния между горячими спаями термопар были равны 2 *мм*.

Процесс сушки проводился от максимальной влагоемкости до постоянной массы образцов.

По опытным данным, записанным на диаграммной ленте потенциометра ЭПП-09М2, строились кривые зависимости $\bar{u} = f(\tau)$, $t = f(\tau)$ воздуха в сушильной камере и слоев образца. Кривые скорости сушки $\frac{d\bar{u}}{d\tau} = f(\bar{u})$ строились по точкам, полученным путем дискретного дифференцирования табулированной функции $\bar{u} = f(\tau)$.

При обработке опытных данных по сушке капиллярнопористых тел ИК излучением установлено, что весь процесс сушки кварцевого песка и силикагелей КСК-2 и КСС-4 различной дисперсности как светлыми, так и темными ИК излучателями делится на два периода: периоды постоянной и падающей скорости сушки.

При этом величина $\frac{d\bar{u}}{d\tau}$ в периоде постоянной скорости сушки при нагреве темными ИК излучателями для кварцевого песка и силикагелей различной дисперсности примерно в 1,5—1,8 раза больше величины $\frac{d\bar{u}}{d\tau}$ в периоде постоянной скорости сушки при нагреве светлыми ИК излучателями одинаковой облученности ($E = 3700$ *вт/м*^{2}, сушильная камера закрыта). Общее время сушки темными ИК излучателями при этом сокращается примерно в 1,5—2 раза.

Такое значительное увеличение скорости сушки в периоде постоянной скорости сушки и сокращение общего времени сушки темными ИК излучателями объяснено на основе анализа зависимости спектральных коэффициентов отражения $\rho_\lambda = f(\lambda)$ при влагосодержаниях максимальной влагоемкости и гигроскопического состояния этих дисперсных тел и распределения энергии в спектре излучения светлых и темных ИК излучателей $i_\lambda = f(\lambda)$.

Величина $\frac{d\bar{u}}{d\tau}$ в периоде постоянной скорости сушки при ИК — терморадиационной, конвективно-ИК-терморадиационной ($E = 4900$ *вт/м*^{2}, $t_c = 110°C$) с использованием светлых ИК излучателей и конвективной сушке ($t_c = 110°C$) при прочих равных условиях увеличивается с увеличением степени

дисперсности кварцевого песка и внутризерновой пористости силикагелей.

При сушке светлыми ИК излучателями силикагелей различной дисперсности ($E \geqslant 9550$ *вт/м²*) величина $\frac{d\bar{u}}{d\tau}$ в периоде постоянной скорости сушки увеличивается с уменьшением степени дисперсности. Последнее объяснено на основе зависимости $\tau_\lambda = f(\lambda)$ для максимально увлажненных силикагелей от их степени дисперсности.

На основе анализа температурных кривых слоев образцов капиллярнопористых тел в периоде падающей скорости сушки ИК излучением установлено, что углубление зоны испарения в кварцевом песке происходит по линейному закону, в силикагелях — по параболическому.

Получены эмпирические формулы зависимости $\frac{d\bar{u}}{d\tau} = f(\bar{u})$ для периода постоянной и падающей скорости сушки для кварцевого песка и силикагелей при ИК-терморадиационной сушке. Максимальная погрешность аппроксимации скорости сушки эмпирическими формулами не превышает $\pm 5\%$.

При сушке ИК излучением типичных коллоидных капиллярнопористых тел установлено, что процесс сушки Пыжевского бентонита также делится на два периода сушки: периоды постоянной и падающей скорости сушки.

При этом величина $\frac{d\bar{u}}{d\tau}$ в периоде постоянной скорости сушки при нагреве темными ИК излучателями примерно в 2 раза больше по сравнению с нагревом светлыми ИК излучателями; общее время сушки сокращается в 2 раза при нагреве темными ИК излучателями ($E = 3700$ *вт/м²*). Последнее объясняется как и для капиллярнопористых тел значительным увеличением коэффициента ρ_λ в области ИК спектра 1,0—2,5 *мкм* при уменьшении влагосодержания поверхностного слоя.

Значительная интенсификация процесса сушки Пыжевского бентонита темными ИК излучателями также, как и при сушке типичных капиллярнопористых тел, достигается также и за счет увеличения коэффициента диффузии влаги a_m и переносом энтальпии во внутрь образца при термодиффузии влаги.

Экспериментальными исследованиями подтверждена справедливость соотношения (11) для Пыжевского бентонита.

По температурным кривым слоев образца Пыжевского бентонита установлено, что углубление зоны испарения происходит по параболическому закону.

Процесс сушки Часовъярской глины ИК излучением происходит в два периода: периоды возрастающей и падающей скорости сушки.

Наибольшая величина $\frac{d\bar{u}}{d\tau}$ при нагреве темными ИК излучателями примерно в 2 раза больше максимальной величины $\frac{d\bar{u}}{d\tau}$ при нагреве светлыми ИК излучателями, создающих одинаковую облученность; общее время сушки темными ИК излучателями сокращается в 2 раза.

На основе анализа кривых скорости сушки и температурных кривых при сушке капиллярнопористых и коллоидных капиллярнопористых тел ИК излучением установлено значительное влияние оптических свойств влажных дисперсных тел и спектральных характеристик ИК излучателей на кинетику и длительность процесса ИК-терморадиационной сушки.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Проведено решение задач по нахождению нестационарных полей потенциалов переноса тепла и массы во влажных дисперсных телах для краевых условий первого рода при несимметричном нагреве и второго рода при симметричном нагреве ИК излучением. Для решения задач использованы метод Генри-Кранка-Смирнова и конечные интегральные sin — и cos — преобразования Фурье. Анализ решения позволяет получить линейную зависимость скорости сушки от величины облученности в периоде постоянной скорости сушки.

2. Исследованиями спектрального распределения энергии излучения установлено, что максимальная спектральная интенсивность величины излучения при номинальных напряжениях питания для светлых и темных ИК излучателей приходится соответственно примерно на длины волн 1,3 и 3,0—4,0 *мкм*. Также показано, что примерно 75% энергии светлых ИК излучателей, регистрируемой спектрометром ИКС-12, приходится на область спектра 1,0—2,0 *мкм* и 90% энергии излучения темных ИК излучателей, регистрируемой с помощью ИКС-12, приходится на область спектра 1,5—5,5 *мкм*.

3. Проведено экспериментальное исследование полей облученности, создаваемых отдельно взятыми светлыми и темными

ИК излучателями, для различных расстояний h ИК излучателей от плоской поверхности при номинальных напряжениях питания, а также при фиксированных величинах h для различных напряжений питания. При этом установлено, что для ячейки, состоящей из четырех ИК ламп типа ЗС, расположенных по вершинам квадрата, наилучшая равномерность облученности обеспечивается при условии, когда расстояние от вершины излучателя до поверхности тела в 1,75 раза больше осевого расстояния между соседними излучателями L, начиная с $h \geqslant 0{,}3$ *м*; для системы темных ИК излучателей с рефлекторами от ИР-1 наилучшая равномерность облученности обеспечивается при условии, когда $h = 1{,}4\,L$, начиная с $h \geqslant 0{,}15$ *м*.

4. Исследованиями спектральных коэффициентов отражения ρ_λ типичных дисперсных тел установлено, что коэффициенты ρ_λ в значительной мере зависят от степени дисперсности, внутризерновой пористости и влагосодержания. На кривых зависимости $\rho_\lambda = f(\lambda)$ в области ИК спектра 1,0—5,0 *мкм* при $\varphi = 0{,}7$ и $t = 20°C$ наблюдаются полосы минимумов отражения для кварцевого песка около 3,0 *мкм*, для силикагелей КСК-2, КСС-4, Пыжевского бентонита и Часовъярской глины около 1,5; 2,0; 3,0 *мкм*. При максимальной влагоемкости капиллярно-пористых тел коэффициент ρ_λ, начиная с длин волн $\lambda \geqslant 1{,}5$ *мкм*, мало зависит от степени дисперсности, становится соизмерим с коэффициентом ρ_λ для воды и значительно меньше коэффициента ρ_λ этих тел при $\varphi = 0{,}7$.

5. Спектральные коэффициенты пропускания τ_λ также зависят от степени дисперсности, внутризерновой пористости и влагосодержания. Установлено, что ход зависимости $\tau_\lambda = f(\lambda)$ силикагелей при максимальной влагоемкости аналогичен ходу зависимости $\tau_\lambda = f(\lambda)$ для воды и с уменьшением дисперсности коэффициент τ_λ увеличивается.

6. Установлено значительное влияние степени дисперсности, внутризерновой пористости, а также глубины проникновения ИК излучения в образец на кинетику процесса сушки влажных дисперсных тел ИК излучением.

7. Экспериментально подтверждена полученная аналитическим путем линейная зависимость величины $\frac{d\bar{u}}{d\tau}$ в периоде постоянной скорости сушки от величины облученности при постоянстве спектрального состава ИК излучения.

8. Исследованиями кинетики процесса сушки влажных дисперсных тел ИК излучением установлено значительное влияние согласования оптических свойств дисперсных тел со

спектральными характеристиками ИК излучателей. Так, при одинаковой облученности скорость сушки объектов исследования $\frac{d\bar{u}}{d\tau}$ в периоде постоянной скорости сушки при нагреве темными ИК излучателями в 1,5—2,0 раза больше величины $\frac{d\bar{u}}{d\tau}$ при нагреве светлыми ИК излучателями; общее время сушки τ при этом сокращается в 1,5—2,0 раза при нагреве темными ИК излучателями.

Основные результаты работы доложены на Сессии Научного Совета АН УССР по проблеме «Высокотемпературная теплофизика» (10—12.XI 1966 г., Киев), на межвузовской конференции по вопросам использования новых физических методов в пищевой промышленности (13—15VI 1957 г., Москва), на Третьей научной конференции молодых математиков Украины, организованной Институтом математики АН УССР (1—4.IV 1966 г., Киев), на научных конференциях Киевского государственного педагогического института им. А. М. Горького (1966, 1967 гг.) и излагаются в принятом на III-е Всесоюзное совещание по тепло- и массообмену (АН БССР, Минск, май, 1968 г.) докладе, а также опубликованы в следующих печатных работах:

1. В. П. Дущенко, И. М. Кучерук, П. В. Бережной, А. Ф. Буляндра. Исследование полей облученности некоторых «светлых» ИК источников, ИФЖ, 9, 3, 297, 1966.

2. В. П. Дущенко, А. Ф. Буляндра, И. М. Кучерук, О. К. Рыбальченко. Некоторые спектральные характеристики «светлых» инфракрасных излучателей. Сообщение I. Сб. «Пищевая промышленность», 4, 1966.

3. В. П. Дущенко, А. Ф. Буляндра, И. М. Кучерук, О. К. Рыбальченко. Некоторые спектральные характеристики «светлых» инфракрасных излучателей. Сообщение II. Сб. «Пищевая промышленность», 4, 1966.

4. В. П. Дущенко, А. Ф. Буляндра, И. М. Кучерук. Некоторые вопросы аналитического и экспериментального исследования процесса сушки инфракрасными лучами некоторых пищевых продуктов. Тезисы работ межвузовской конференции по новым физическим методам в пищевой промышленности, М., 1967.

5. В. П. Дущенко, И. М. Кучерук. Нестационарные поля потенциалов переноса тепла и массы в дисперсных средах под воздействием ИК излучения. Сб. «Аналитические методы решения задач переноса тепла и вещества». «Наукова думка», К., 1967.

6. В. П. Дущенко, А. Ф. Буляндра, И. М. Кучерук. Исследование спектральных и энергетических характеристик некоторых «темных» инфракрасных излучателей. «Электротермия». 1967.

7. В. П. Дущенко. І. М. Кучерук. Аналітичний опис внутрішнього тепло- і масопереносу в капілярнопористих тілах під дією інфрачервоних променів. Тези доповідей звітно-наукової конференції КДПІ ім. Горького, 1966.

8. В. П. Дущенко, И. М. Кучерук, А. Ф. Буляндра. Исследование спектральных характеристик некоторых капиллярнопористых

тел в ИК области длин волн 1—5 *мкм*. Сб. «Теплофизические характеристики» (в печати).

9. В. П. Дущенко, А. Ф. Буляндра, И. М. Кучерук. Исследование оптических характеристик некоторых пищевых продуктов. Изв. ВУЗов. Пищевая технология, 4, 152, 1967.

10. В. П. Дущенко, И. М. Кучерук, А. Ф. Буляндра, В. П. Бережной, Р. С. Петрова, П. П. Сиднев. Комплексное исследование терморадиационной сушки капиллярнопористых тел. Труды 3-го Всесоюзного совещания по тепло- и массообмену. Минск (в печати).

11. І. М. Кучерук, О. Ф. Буляндра, В. П. Дущенко. Дослідження деяких спектральних характеристик силікагелів еталонного ряду в інтервалі хвиль 1—5 *мкм*. Тези доповідей звітно-наукової конференції КДПІ ім. Горького, 1967.

12. І. М. Кучерук, В. П. Дущенко, П. П. Сіднєв. Дослідження кінетики сушіння капілярнопористих тіл інфрачервоними променями. Тези доповідей звітно-наукової конференції КДПІ ім. Горького, 1967.

ОБОЗНАЧЕНИЯ

X — безразмерная координата;
Fo — критерий Фурье;
ε — коэффициент фазовых превращений;
Ko — критерий Коссовича;
Po(X) — модифицированный критерий Померянцева;
Lu и Pn — критерий Лыкова и Поснова;
Ki_q и Ki_m(Fo) — теплообменный и массообменный критерии Кирпичева;
Bi_q(Fo) — теплообменный критерий Био;
a — коэффициент температуропроводности, *м/сек*^{2};
u, t — влагосодержание и температура тела; индекс «о» относится к начальному состоянию;
E — облученность, *вт/м*^{2};
ρ — коэффициент отражения, %;
λ — коэффициент теплопроводности, *вт/м. град*;
$i\lambda$ — спектральная интенсивность величины излучения;
φ — относительная влажность воздуха;
t_c — температура окружающей среды.

БФ 15421. Подписано к печати 7.X 1967 г. Формат бумаги 60×84¹/₁₆.
Объем 1,25 печ. л. Заказ 2203/2. Тираж 200.

Киев, тип. № 3, цех 2