

Министерство высшего и среднего специального образования СССР  
КИЕВСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

---

Аспирант А. Ф. БУЛЯНДРА

**Теплофизические основы  
расчета терморadiационных сушильных  
установок пищевой промышленности**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

КИЕВ — 1967

Министерство высшего и среднего специального образования УССР  
КИЕВСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

---

Аспирант А. Ф. БУЛЯНДРА

Теплофизические основы  
расчета терморadiационных сушильных  
установок пищевой промышленности

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

КИЕВ — 1967



## ВВЕДЕНИЕ

Принятые XXIII съездом КПСС директивы по пятилетнему плану развития народного хозяйства СССР на 1966—1970 гг. предусматривают дальнейшее ускорение роста производства предметов народного потребления, который немислим без дальнейшего повышения производительности труда и интенсификации технологических процессов.

В последнее время в пищевой промышленности для интенсификации сушки, выпечки, обжарки и других процессов тепловой обработки пищевых продуктов находит применение инфракрасное (ИК) излучение. Применение ИК излучения способствует значительной интенсификации процесса и обеспечивает высокое качество готовых изделий, позволяет внедрять поточные линии, регулировать и автоматизировать технологические процессы. Следовательно, этот метод подвода тепла представляет особый интерес и имеет широкие перспективы для внедрения.

Однако метод термообработки пищевых продуктов под воздействием ИК излучений является сравнительно новым и еще недостаточно изученным.

Как отмечается в решениях Первой и Второй Всесоюзных конференций по тепло- и массообмену, которые состоялись в 1961 и 1964 гг. в г. Минске, и Всесоюзной конференции по новым физическим методам обработки пищевых продуктов, состоявшейся в г. Киеве в 1964 г., для расширения области применения ИК излучений необходимо дальнейшее исследование оптических свойств материалов и спектральных характеристик ИК излучателей, кинетики внутреннего тепло- и массопереноса в этих материалах с учетом их особенностей, а также разработка научно обоснованной методики теплового расчета терморadiационных установок.

В последнее время значительные исследования по теории и практике нагрева ИК излучениями и применения этого метода при сушке и выпечке пищевых продуктов выполнены в МТИППе и КТИППе.

Результаты этих и других исследований обобщены в монографии проф. А. С. Гинзбурга «Инфракрасная техника в пищевой промышленности» («П. П.», М., 1966).

Целью данной работы является дальнейшее исследование спектральных и энергетических характеристик ИК излучателей, оптических свойств дисперсных пищевых продуктов, особенностей кинетики внутреннего тепло- и массопереноса в них под воздействием ИК излучений, а также совершенствующие методики теплового расчета терморрадиационных сушильных установок.

Для решения поставленной задачи в экспериментальной части работы нами применены современные методы исследования в области тепло- и массопереноса, теплофизики ИК излучения и инфракрасной спектроскопии.

Результаты комплексного исследования легли в основу предлагаемой диссертационной работы, изложенной на 168 стр. основного текста и состоящей из введения, пяти глав, выводов, списка использованной литературы и приложений.

I. В первой главе диссертационной работы приведен анализ современного состояния теории гигротермической обработки влажных дисперсных материалов под воздействием ИК излучений применительно к пищевым продуктам, которая разработана в фундаментальных работах советских ученых А. В. Лыкова, П. Д. Лебедева, А. С. Гинзбурга, Ю. А. Михайлова и др.

Общие законы и дифференциальные уравнения внутреннего тепло- и массопереноса в дисперсных материалах, разработанные акад. АН БССР А. В. Лыковым, позволяют провести математическое описание развития нестационарных полей температуры и влагосодержаний внутри влажных дисперсных пищевых продуктов под воздействием ИК излучений.

При поверхностном поглощении материалом ИК излучений, внутренний источник тепла можно ввести в граничные тепловые условия.

Для зонального расчета нестационарных полей температур и влагосодержаний в случае симметричного ИК нагрева неограниченной пластины толщиной  $2R$ , дифференциальные уравнения по А. В. Лыкову имеют вид:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\varepsilon \cdot r}{c} \cdot \frac{\partial u}{\partial \tau}; \quad (-R \leq x \leq R, \tau > 0)$$

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = a_m \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + a_m \cdot \delta \cdot \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}; \quad (-R \leq x \leq R, \tau < 0)$$

при начальных условиях:

$$t(x, 0) = t_0 = \text{const}; \quad u(x, 0) = u_0 = \text{const};$$

и граничных условиях:

$$E(1 - \rho) - \lambda \frac{\partial t(R, \tau)}{\partial x} - \alpha [t_{п.м}(R, \tau) - t_c(\tau)] = 0;$$

$$i_m(R, \tau) - \lambda_m \frac{\partial u(0, \tau)}{\partial x} = 0;$$

а также условиях симметрии полей температур и влагосодержаний:

$$\frac{\partial t(0, \tau)}{\partial x} = \frac{\partial u(0, \tau)}{\partial x} = 0;$$

Решение этой задачи для случая постоянства тепло- и массообменных коэффициентов и оптических свойств материала проведено методом Генри—Кранка—Смирнова, который позволяет решение данной системы дифференциальных уравнений свести к решению системы двух несвязанных дифференциальных уравнений типа теплопроводности. Решение последних наиболее удобно выполнить с помощью конечных интегральных  $\cos$  — преобразований Фурье.

Полученные решения могут быть использованы для анализа внутреннего тепло- и массопереноса в пищевых продуктах при сушке их под действием ИК излучений.

## II. Оптические свойства влажных дисперсных материалов в ИК области спектра

Эффективное использование ИК излучения требует согласования спектральных характеристик ИК излучателей с оптическими свойствами обрабатываемых материалов, т. е. необходимо, чтобы длина волны  $\lambda_{\max}$ , на которую приходится максимальное значение спектральной интенсивности величины излучения  $i_{\lambda \max}$  излучателя, приходилась на интервал длин волн, где обрабатываемый материал имеет минимальные значения коэффициента  $\rho_{\lambda}$  и максимальное значение коэффициента  $k_{\lambda}$ .

Значительная работа в этом направлении ведется в МТИППе (А. С. Гинзбург, В. В. Красников, Н. Г. Селюков).

Влажные пористые дисперсные пищевые продукты сильно рассеивают падающее ИК излучение и почти непрозрачны для него, поэтому определяющей оптической характеристикой для них является коэффициент отражения.

Нами проведено исследование зависимостей  $\rho_{\lambda} = f(\lambda)$  некоторых пористых дисперсных пищевых продуктов: нативного картофельного крахмала в воздушно сухом и максимально увлажненном состояниях, пшеничной муки высшего сорта, печенья и теста печенья сорта «Чайное» с помощью метода зеркальной полусферы, который позволяет измерять  $\rho_{\lambda}$  в широком интервале длин волн. Нами проводились также исследования зависимостей  $\rho_{\lambda} = f(\lambda)$  для типичных пористых дисперсных материалов (кварцевый песок, силикагели, некоторые глинистые материалы и др.).

Определение величин  $\rho_\lambda$  проведено с использованием инфракрасного спектрометра ИКС-12 в спектрометрических лабораториях МТИПП и Института физики АН УССР.

Величины  $\rho_\lambda$  получены по точкам через 0,1 мкм при различных раскрытиях щели монохроматора, что исключало инерцион-

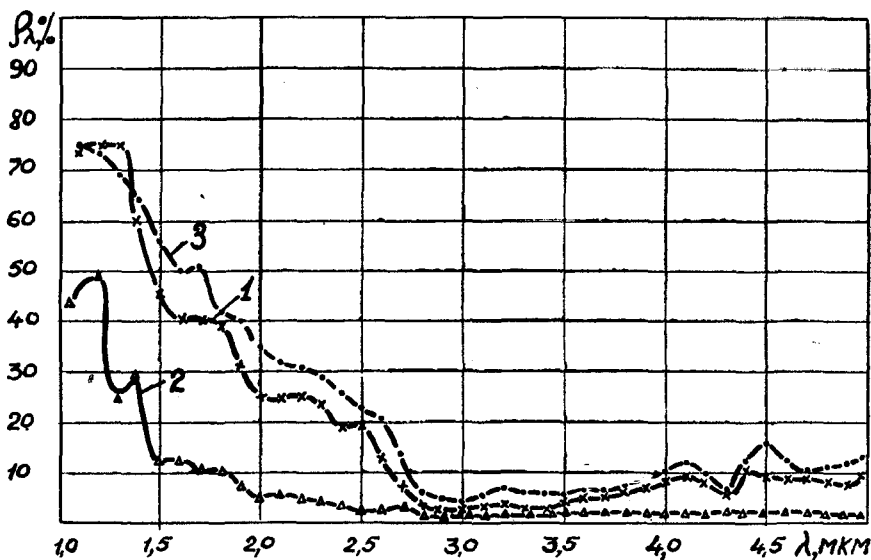


Рис. 1.

ность измерительной системы ИКС-12 и повышало точность измерений. Исследование оптических свойств влажных материалов проведено в области 1—5,5 мкм.

Исследованиями установлено, что коэффициенты  $\rho_\lambda$  воздушно сухого крахмала (рис. 1, кривая 1) значительно больше таковых для крахмала полной влагоемкости ( $W=80\%$ ) (кривая 2) в области ИК спектра до 2,5 мкм. При  $\lambda \geq 2,5$  мкм эти величины мало отличаются друг от друга. Коэффициенты  $\rho_\lambda$  пшеничной муки высшего сорта (кривая 3) мало отличаются от таковых воздушно сухого крахмала. Аналогичный характер имеют кривые  $\rho_\lambda = f(\lambda)$  и для других исследуемых материалов.

На всех кривых  $\rho_\lambda = f(\lambda)$  исследуемых материалов имеют место полосы минимумов отражения в областях около 3,0; 2,0 и 1,3 мкм. Сильное поглощение первой полосы обусловлено тем, что у 2,92 мкм лежит основная валентная полоса колебаний группы ОН. Полосы в областях около 2,0 и 1,3 мкм соответствуют полосам поглощения в спектре воды. Эти полосы являются более глубокими для влажных материалов.

Из рассмотрения зависимостей  $q_\lambda = f(\lambda)$  можно сделать вывод, что для терморadiационной обработки этих материалов необходимо, чтобы  $i_{\lambda \text{ макс}}$  ИК излучателей приходилась на область около 3 мкм, или, по крайней мере, на области около 2,0 или 1,3 мкм.

При терморadiационной обработке материалов значительная интенсификация процесса может быть достигнута за счет проникновения ИК излучений на некоторую глубину. Поэтому знание зависимости  $q_\lambda = f(\lambda)$  не является достаточной для выбора ИК излучателя. Для этого необходимо еще знание спектрального коэффициента пропускания материала  $\tau_\lambda$ .

Исследования по определению зависимостей  $\tau_\lambda = f(\lambda)$  различных материалов проводились М. Дерибере, Г. Д. Рабиновичем, Н. Б. Белостоцким, Л. К. Янсоном и др. Однако в работах этих авторов не учитывалась рассеянная радиация, что приводит к получению завышенных значений  $\tau_\lambda$ .

А. С. Гинзбург, В. В. Красников и Н. Г. Селюков сконструировали приставку к СФ-4 и ИКС-12, которая при определении величин  $\tau_\lambda$  и  $q_\lambda$  дает возможность учитывать рассеянную радиацию.

Нами проведены опыты по определению  $\tau_\lambda$  воздушно сухого и максимально увлажненного крахмала, муки пшеничной высшего сорта, теста и мякиша хлеба украинского, теста, мякиша и корки пряников «Северные» и др. в ИК области спектра от 0,7 до 5 мкм с помощью спектрометра ИКС-12.

Исследованиями установлено, что излучения с  $\lambda \geq 2,5$  мкм не проникают даже через самые тонкие слои образцов (крахмал 1 мм, мякиш пряника «Северные» — 2,5 мм, пряничное тесто — 1 мм, мука — 1 мм, тесто украинского хлеба — 1 мм).

Более коротковолновое ИК излучение ( $\lambda = 0,7 - 2,0$  мкм) проникает в исследуемые продукты на большие глубины. На рис. 2 представлены кривые относительной спектральной интенсивности пропускания коркой толщиной 1,2 мм — 1 и мякишем пряников «Северные» для толщин: 2—2,5; 3—3,5; 4—4,5; 5—6,0; 6—8,0; 7—10 мм.

Отметим, что для всех исследованных материалов с увеличением толщины образца длина волны, на которую приходится максимальное пропускание ИК излучения, смещается в сторону коротких длин волн. Это, очевидно, связано с тем, что коротковолновое излучение обладает большей энергией, что и обеспечивает его проникновение на большую глубину, несмотря на меньшую интенсивность излучения излучателя в этом интервале длин волн.

Анализ относительной спектральной интенсивности пропускания ИК излучения в зависимости от толщины образца показывает, что пряничное тесто обладает более низким пропусканием по сравнению с мякишем и поверхностным слоем. Макси-



мальная глубина проникновения ИК излучения для пшеничного теста составляет примерно 8—10 мм, а для мякиша 10—12 мм. Это объясняется уменьшением влагосодержания и изменением физических свойств структуры при переходе теста в мякиш. Кроме того, более мелкие по размерам поры теста ближе к мо-

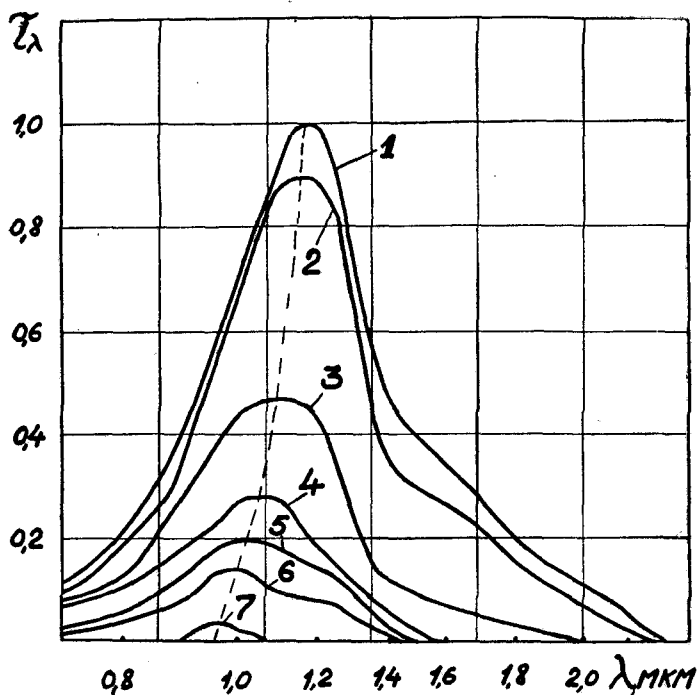


Рис. 2.

дели абсолютно черного тела и, следовательно, обладают большим поглощением нежели более крупные поры мякиша.

Анализ спектральных кривых пропускания воздушно сухого и максимально увлажненного картофельного крахмала показывает, что таковые больше для воздушно сухого крахмала. Это следует объяснить тем, что воздушно сухой крахмал сильно рассеивает ИК излучение (особенно коротковолновое).

Наличие на кривых  $\tau_\lambda = f(\lambda)$  полос поглощения при  $\lambda = 1,3$  и  $1,9$  мкм необходимо увязывать с поглощением воды.

Для аналитического описания процессов внутреннего тепло- и массопереноса во влажных материалах и при расчетах терморрадиационных установок необходимо знание спектральных коэффициентов ослабления.

Величины  $k_\lambda$  для картофельного крахмала и пшеничной

муки высшего сорта рассчитаны без учета рассеянной радиации и приведены в виде таблиц в диссертации. Учет рассеянной радиации скажется (в сторону уменьшения) на численных значениях  $k_\lambda$ .

Пространственное распределение отраженной радиации, исследованное при помощи приставки ИПО-12, в интервале длин волн 0,9—2,5  $\mu\text{м}$  воздушно сухим крахмалом имеет характер близкий к диффузному отражению, а максимально увлажненным крахмалом и пшеничной мукой — направленный характер отражения.

### III. Спектральные и энергетические характеристики ИК излучателей

Широкое внедрение ИК излучения в практику термической обработки влажных материалов требует изучения спектральных характеристик ИК излучателей. Начало комплексного исследования спектральных характеристик ИК излучателей и оптических свойств пищевых продуктов положено в работах А. С. Гинзбурга, В. В. Красникова, Н. Г. Селюкова.

Нами проведено исследование спектральных характеристик «светлых» и «темных» ИК излучателей, которые находят широкое применение в пищевой промышленности. Исследования проводились с использованием инфракрасного спектрометра ИКС-12.

Одновременно проведено измерение яркостной температуры ( $T_{\text{ярк}}$ ) «светлых» ИК излучателей образцовым прецизионным пирометром ОП-48. Измерение температуры поверхности излучения «темных» ИК излучателей проводилось наперед проградуированной хромель-алюмелевой термопарой.

Исследование спектральных характеристик ИК излучателей проводилось при различных напряжениях питания через 20 в, начиная с номинального и кончая 80 в — для излучателей, рассчитанных на 220 в и 50 в — для излучателей, рассчитанных на номинальное напряжение питания 127 в.

Для исследования были выбраны следующие типы «светлых» излучателей: лампы ЗС-1 (127 в, 500 вт), ЗС-3 (220 в, 500 вт), кварцевый излучатель НИК—220×1000 тр, зеркальные лампы заводов «Элпром» (Болгария) (220 в, 375 в) и «ВЕВ» (ГДР) (220 в, 250 вт).

Все спектральные кривые  $i_\lambda = f(\lambda)$  сняты при одинаковом раскрытии входной щели монохроматора. На рис. 3 представлены зависимости  $i = f(\lambda)$  для излучателя ЗС-3. Для других типов «светлых» ИК излучателей характер кривых  $i_\lambda = f(\lambda)$  аналогичный. При номинальных напряжениях питания величины  $i_{\lambda \text{ max}}$  этих излучателей приходится на интервал длин волн 1,3—

1,4 мкм. При уменьшении напряжения питания от  $U_{ном}$  до 80 в  $\lambda_{max}$  смещается для излучателей ЗС-1, ЗС-3 и НИК примерно от 1,316 до 1,562 мкм, для лампы завода «Элиром» от 1,355 до 1,672 мкм, лампы завода «VEB» от 1,362 до 1,650 мкм.

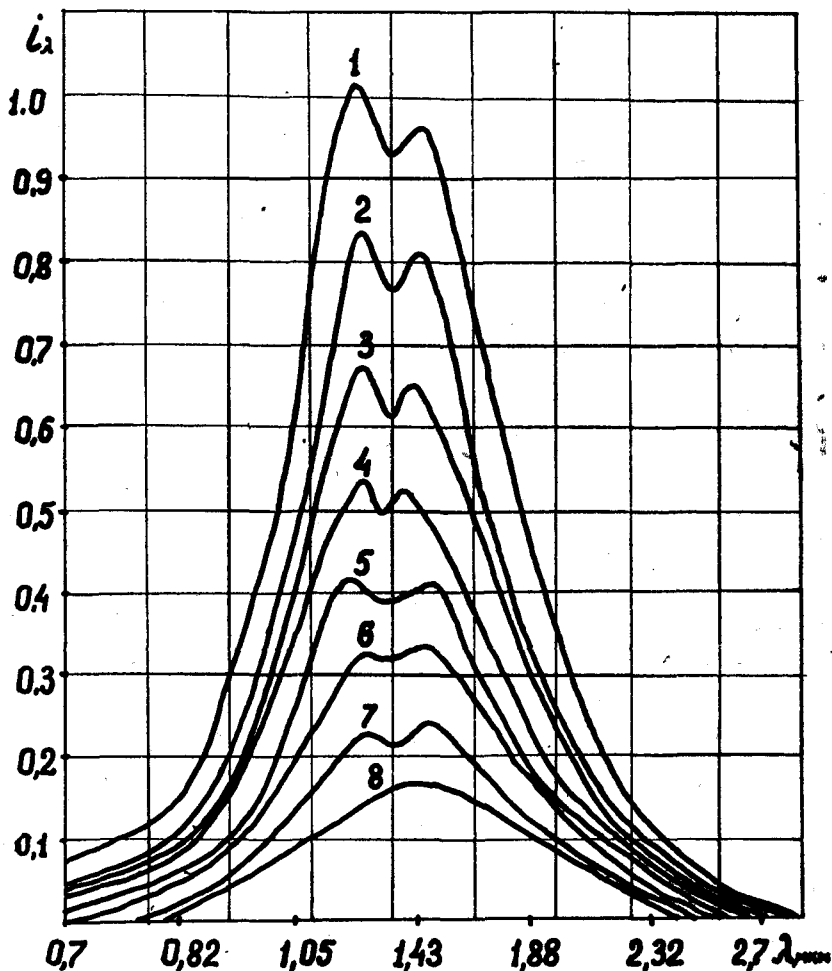


Рис. 3.

Полная энергия излучения в интервале длин волн 0,76—2,60 мкм при  $U_{п} = 80$  в составляет для: а) ЗС-1, ЗС-3—13%, б) НИК—10%; в) болгарской лампы—8%; г) лампы Берлинского завода—6% от полной энергии излучения при номинальном напряжении питания.

В результате обработки опытных данных найдено, что для всех исследованных «светлых» ИК излучателей на интервал длин волн 1—2 мкм приходится примерно 80% всей лучистой энергии, регистрируемой спектрометром ИКС-12 при номинальном напряжении питания.

Яркостная температура светлых ИК излучателей при номинальном напряжении питания составляет для: ЗС-1 — 2280, ЗС-3 — 2470, НИК — 2130, лампы завода «ВЕВ» — 2040, лампы завода «Элпром» — 2100° К. С понижением напряжения питания  $T_{\text{ярк}}$  всех исследованных «светлых» излучателей уменьшается примерно по линейному закону.

Нами проведено также исследование спектральных характеристик группы «темных» ИК излучателей, выпускаемых Миасским, Горьковским, Московским и Фастовским заводами.

Исследованиями установлено, что  $i_{\lambda_{\text{max}}}$  этих излучателей приходится примерно на интервал длин волн  $\lambda_{\text{max}} = 2,9—4,0$  мкм. Основная энергия излучения этих излучателей приходится на интервал длин волн 1,5—5,5 мкм. На длины волн, не принадлежащие этому интервалу, приходится примерно 10% энергии, регистрируемой спектрометром ИКС-12 при номинальном напряжении питания.

При изменении напряжения питания от номинального до 120 в исследуемых излучателей  $\lambda_{\text{max}}$  изменяется для: ТЭНа Горьковского завода ИР-1 (700 вт,  $\sigma_{\text{T}} = 9,43$  вт/см<sup>2</sup>) от 3,0 до 3,84 мкм; ТЭНов Миасского завода ЭТ (200 вт,  $\sigma_{\text{T}} = 4$  вт/см<sup>2</sup>) от 3,8 до 4,55 мкм, ЭТ (400 вт,  $\sigma_{\text{T}} = 4,2$  вт/см<sup>2</sup>) от 3,57 до 4,45 мкм, ЭТ (800 вт,  $\sigma_{\text{T}} = 4$  вт/см<sup>2</sup>) от 3,60 до 4,54 мкм; ТЭНов Фастовского завода ЭТ (400 вт,  $\sigma_{\text{T}} = 8,7$  вт/см<sup>2</sup>) от 3,10 до 3,84 мкм, ЭТ (700 вт,  $\sigma_{\text{T}} = 6,1$  вт/см<sup>2</sup>) от 2,90 до 3,90 мкм, ЭТ (1000 вт,  $\sigma_{\text{T}} = 9,2$  вт/см<sup>2</sup>) от 3,0 до 4,9 мкм, ТЭНа Московского завода ТЭН-37 (1500 вт,  $\sigma_{\text{T}} = 14,7$  вт/см<sup>2</sup>) от 3,07 до 4,03 мкм.

Полная энергия излучения всех исследованных «темных» излучателей в интервале длин волн 1,5—5,5 мкм при напряжении  $U_{\text{п}} = 120$  в составляет примерно 8—12% от таковой величины при напряжении  $U_{\text{ном}}$ .

На всех кривых  $i_{\lambda} = f(\lambda)$  наблюдаются значительные полосы поглощения при  $\lambda \approx 2,9$  и  $\lambda \approx 4,2$  мкм, что объясняется поглощением ИК лучей парами воды и углекислым газом атмосферы.

Обработка опытных данных показывает, что при изменении напряжения питания исследуемых излучателей температура их поверхности изменяется по линейному закону с различными коэффициентами пропорциональности. При напряжении  $U_{\text{ном}}$  температура их поверхности находится в пределах 350—650° С.

Для расчета и конструирования терморadiационных установок необходимо знание энергетических характеристик (полей облученности) промышленных ИК излучателей.

Исследование полей облученности, создаваемых ИК излучателями, можно производить при помощи различных приборов с чувствительными термоэлектрическими приемниками лучистой энергии.

Наиболее часто для этих целей применяются радиометр А. Н. Бойко, балансомер и пиранометр Ю. Д. Янишевского.

Данные, полученные нами при исследовании полей облученности лампы ЗС-2 с помощью балансомера М-10 при термостатировании холодных спаев и прибора ИТТФ АН УССР, совпадают между собой и данными, полученными П. Д. Лебедевым при помощи радиометра А. Н. Бойко.

Нами получены эпюры облученности при различных расстояниях  $H$  от излучателей и различных напряжениях питания следующих «светлых» ИК излучателей: зеркальные лампы ЗС-1, ЗС-2, ЗС-3, лампы заводов «Элпром» и «VEB», а также кварцевого излучателя НИК—220×1000 тр.

На рис. 4 представлены эпюры облученности лампы ЗС-3 при расстояниях  $H$  в м: 1 — 0,1; 2 — 0,2; 3 — 0,3; 4 — 0,4; 5 — 0,5; 6 — 0,6; 7 — 0,7; 8 — 0,3 и  $l=0$ . Как видно, равномерное поле облученности лампой ЗС-3 создается начиная с  $H \geq 0,5$  м. Для других типов излучателей эпюры облученности имеют аналогичный характер.

Эпюры облученности позволяют рассчитать энергетический к.п.д. излучателя. Для этого необходимо определить объем тела, полученного вращением кривой  $E=f(H, l)$  при  $H=\text{const}$  вокруг оси  $E$ , выраженный в  $вт$  и разделить на потребляемую мощность. Рассчитанный таким образом к.п.д. излучателя ЗС-3 равен 78,5%.

Нами также проведено исследование энергетических характеристик «темных» ИК излучателей (ТЭНов). Исследование полей облученности ТЭНов проведено с использованием рефлекторов от ИР-1, что приводит к значительному концентрированию лучистого потока.

Большое значение при проектировании терморadiационных установок, особенно, для обработки термолабильных материалов, имеет создание равномерности полей облученности.

В промышленных терморadiационных установках ламповые ИК излучатели чаще всего размещают по вершинам квадратов или равносторонних треугольников. Поэтому большой практический интерес представляет изучение полей облученности, создаваемых такими системами ИК излучателей.

Нами исследовались поля облученности, создаваемые четырьмя излучателями типа ЗС в ограждении из полированного дюралюминия, представляющего в сечении квадрат и без ограждения при  $H=0,2-0,8$  м и различных расстояниях  $L$  между осями симметрии излучателей, расположенных в вершинах квадрата.

С увеличением  $H$  равномерность облученности, создаваемой системой «светлых» ИК излучателей, улучшается, но величина облученности при этом уменьшается. Так, при изменении  $H$  от 0,3 до 0,5 м при отсутствии ограждения  $E$  при  $l=0$  уменьшается примерно в 2,6 раза.

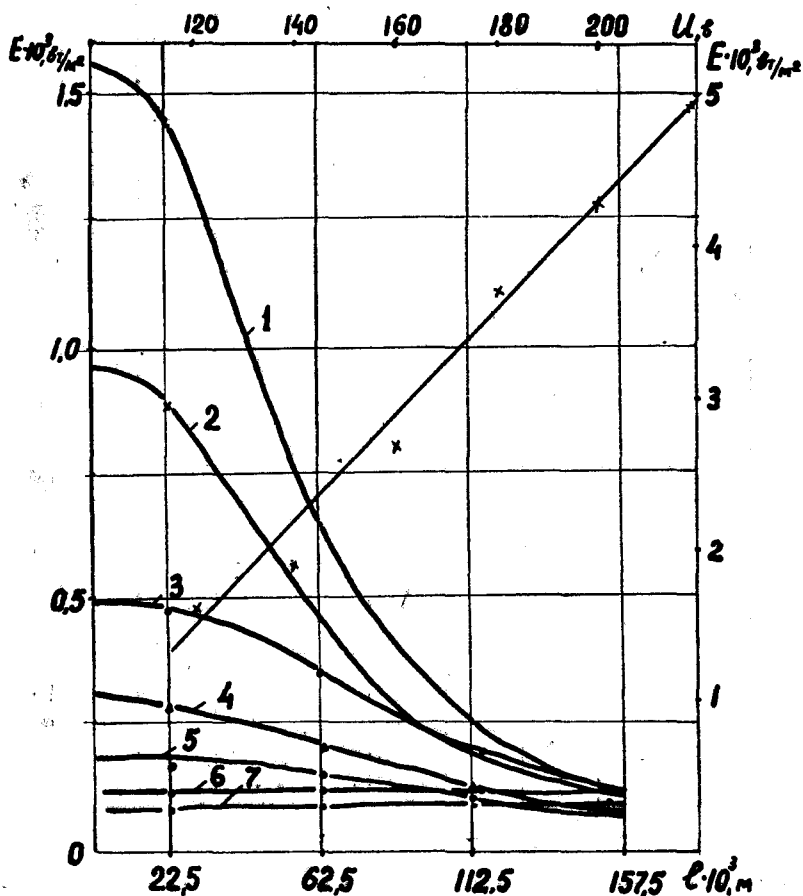
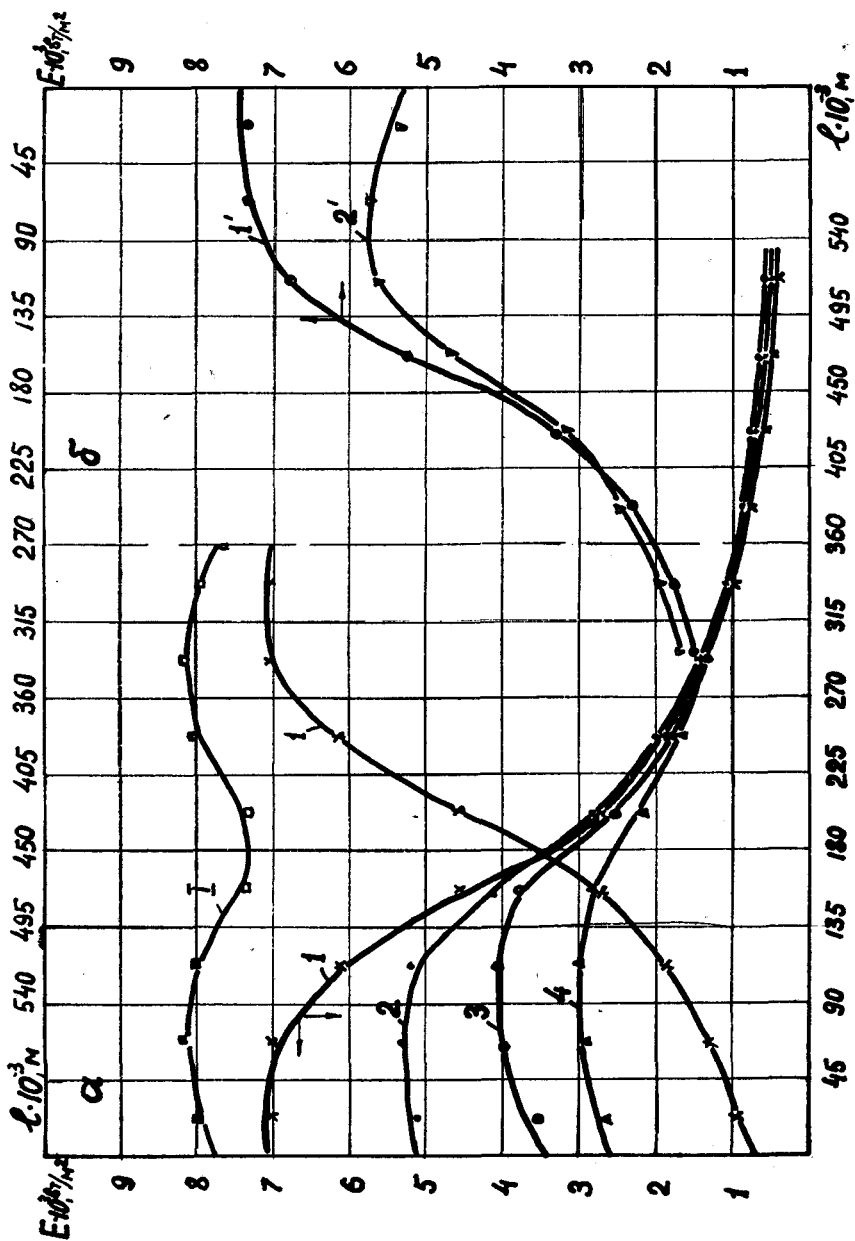


Рис. 4.

На рис. 5 представлены эпюры облученности, создаваемых системой ИК излучателей ЗС-3, размещенных в вершинах квадрата при  $H=0,3$  м в ограждении (а) и без ограждения (б) при  $L$  в м; 1 — 0,18; 2 — 0,22; 3 — 0,26; 4 — 0,3 м и I — суммарная при  $L=0,18$  м. Как видно, применение ограждения приводит к увеличению и улучшению равномерности полей облученности. Так, облученность при  $H=0,3$  м в точке, лежащей на вертикаль-



ной оси симметрии системы четырех излучателей ( $l=0$ ) при наличии ограждения в сечении квадрат со сторонами 0,72 м, увеличивается на 5—10%, а при  $l=0,35$  м — на 50—60% по сравнению с таковыми при отсутствии ограждения.

Нами установлено, что наилучшая равномерность облученности, создаваемой системой ламп типа ЗС, размещенных в вершинах квадратов, обеспечивается при выполнении условия:  $H=1,75L$ .

Учитывая, что  $L$  не может быть меньше наибольшего диаметра колб ( $d=0,18$  м) и, исходя из формулы, видно, что наименьшая высота, при которой достигается равномерность облученности  $H=0,3$  м.

При выполнении этого условия максимальные отклонения от среднего значения облученности для различных  $H$  и  $L$  составляют 8—12%, что вполне удовлетворительно для практических целей.

Очень важным для практики является знание зависимости величины облученности от высоты  $H$  при выполнении вышеупомянутого условия. Обработка опытных данных позволила установить следующую эмпирическую зависимость облученности  $E$  от  $H$  для систем ламп ЗС-1 и ЗС-3:

$$E=13750-17500H; (0,3 \text{ м} \leq H \leq 0,6 \text{ м}).$$

Для систем ламп ЗС-2 полученные результаты по этой формуле необходимо уменьшить в два раза.

Опытным путем установлено, что создание наилучшей равномерности облученности в случае систем ТЭНов достигается при выполнении условия:  $H=1,4L$ , начиная с  $H \geq 0,15$  м.

#### **IV. Экспериментальное исследование кинетики терморadiационной сушки влажных дисперсных пищевых продуктов**

Нами в качестве объектов исследования были выбраны нативный картофельный крахмал, как типичное коллоидное тело, и заготовки сдобных сухарей «Детские» и «Сливочные», как типичные коллоидные капиллярнопористые тела.

Этот выбор обусловлен еще и тем, что согласно литературным сведениям, исследования терморadiационной сушки этих продуктов отсутствуют.

Большой научный и практический интерес для анализа процессов сушки представляет исследование форм связи влаги с материалом. Для этих целей мы использовали метод термограмм изотермической сушки тонких образцов материала М. Ф. Казанского, который за один опыт позволяет определить все формы связи и состояния влаги. Термограммы картофельного крахмала и пшеничной муки высшего сорта снимались для интервала температур 25—75° С через каждые 10° С.



Анализ сингулярных точек термограмм изотермической сушки позволил получить сведения о дифференциальных водоудерживающих свойствах объектов исследования.

Нами также исследовалось равновесное влагосодержание картофельного крахмала и пшеничной муки высшего сорта с помощью изотерм сорбции, полученных статическим способом при 20° С. Максимальное гигроскопическое влагосодержание крахмала составляет 45%, а муки — 38%.

Исследование кинетики терморadiационной сушки пищевых продуктов проведено в специально сконструированной и изготовленной лабораторной установке, которая представляет собой двухстенную теплоизолированную камеру размерами 1,8×1,0×0,8 м.

Конструкция камеры позволяет проводить терморadiационную сушку как при помощи «светлых», так и «темных» ИК излучателей. Излучатели в установке размещались согласно правилам, приведенным ранее. Расстояние между излучателями и обрабатываемыми продуктами изменялось при помощи специального устройства.

Движение воздуха в сушильной камере осуществлялось за счет естественной циркуляции через специальные входное и выходное отверстия.

Измерения температуры воздуха в камере, поверхностных и центральных слоев материала, внутренних поверхностей ограждения, «мокрого» термометра и контроль равномерности поверхностного нагрева проводились медно-константановыми термопарами. Термо- э.д.с. термопар записывались на диаграммной ленте наперед проградуированного потенциометра ЭПП-09М1.

Регистрация убыли веса материала и автоматическая запись осуществлялись с помощью фотовесов, предложенных А. Т. Лисовенко и А. А. Михелевым, конструкция которых несколько видоизменена.

Чувствительность примененных нами весов составляет 0,2 г/мм.

Экспериментальные данные представлены графически в виде кривых сушки, скорости сушки и температурных кривых.

1. Процесс терморadiационной сушки крахмала «светлыми» ИК излучателями при одностороннем облучении протекает в периодах постоянной и убывающей скорости сушки. Если сушку заканчивать при  $W_k = 25\%$ , что соответствует сушке в промышленных условиях, то процесс сушки будет протекать только в периоде постоянной скорости сушки.

Скорость и длительность сушки в значительной мере определяются толщиной слоя материала. Так, при толщине слоя крахмала в 14 мм скорость сушки в постоянном периоде примерно в 2,1 раза меньше таковой при толщине слоя в 6 мм.

При этом время сушки до  $W_k = 25\%$  сокращается от 52,5 до 21 мин.

С целью исследования возможностей дальнейшей интенсификации нами проводились опыты по сушке крахмала при осциллирующих режимах. Опыты проводились при одинаковых по длительности циклах нагрева и охлаждения. Наилучшие результаты получены при циклах, равных 6 мин. При этом время сушки составляет примерно 140% от такового при непрерывном нагреве, а время нахождения ламп во включенном состоянии — 75% такового при непрерывном нагреве.

Учитывая термолабильность картофельного крахмала, нами экспериментально определялась допустимая величина облученности  $E_{\text{доп}}$ , обеспечивающая наибольшую интенсификацию процесса сушки и наилучшее качество продукта. Определение  $E_{\text{доп}}$  производилось путем изменения облученности  $E$  от 5250  $\text{вт/м}^2$  ( $H=0,5$  м) до 8800  $\text{вт/м}^2$  ( $H=0,3$  м). Установлено, что при увеличении  $E$  от 5250 до 6750  $\text{вт/м}^2$  ( $H=0,4$  м) время сушки крахмала уменьшается примерно на 30%. Качество сухого крахмала при этом не ухудшается. При дальнейшем увеличении облученности до 8800  $\text{вт/м}^2$  крахмал клейстеризуется.

Анализ температурных кривых показывает, что они подобны таковым при конвективной сушке, но скорость развития температурных полей внутри материала значительно больше. Это обусловлено отсутствием сопротивления пограничного слоя ИК излучению, сильным поглощением ИК излучения поверхностным слоем крахмала, а также его проникновением на некоторую глубину материала.

Интенсивный прогрев крахмала в процессе терморadiационной сушки приводит к быстрому увеличению коэффициента внутренней диффузии влаги  $a_m$ , за счет чего и достигается значительная интенсификация процесса сушки крахмала.

Исследованиями процесса сушки крахмала при помощи «темных» ИК излучателей типа ИР-1 установлено, что температура поверхностного слоя при этом сильно возрастает и крахмал начинает клейстеризоваться при  $E=5250$   $\text{вт/м}^2$ . Это говорит о том, что длинноволновое ИК излучение сильно поглощается поверхностными слоями и почти не проникает в глубь крахмала.

Исходя из вышеизложенного, можно сделать выводы о том, что для терморadiационной сушки крахмала следует применять «светлые» ИК излучатели. Оптимальная толщина слоя сушеного крахмала должна находиться в пределах 6—8 мм. Облученность крахмала не должна превышать 7000—7500  $\text{вт/м}^2$ .

Высушенный при таких условиях в лабораторной установке крахмал удовлетворял все требования стандарта для сухого крахмала.

2. Нами также проведено исследование кинетики терморadiационной сушки ломтиков сухарных плит, приготовленных по ре-

цептуре «Детские» и «Сливочные» на Киевском хлебозаводе № 3.

Ломтики сухарных плит во всех случаях размещались на медной сетке и подвергались двустороннему нагреву с помощью зеркальных ламп типа ЗС-3. Величины облученности изменялись в пределах 7250—8800  $вт/м^2$ .

В качестве иллюстрации на рис. 6 представлены кривая сушки 1, кривая скорости сушки 2, температурные кривые поверхности 3, центрального слоя 4, а также воздуха 5 в сушильной камере при сушке сухарей «Детские». Облученность при этом  $E = 8800 \text{ вт/м}^2$ .

На кривых скорости сушки во всех опытах при терморadiационной сушке сухарей «Детские» и «Сливочные» наблюдаются также два периода сушки. Продолжительность сушки в периоде падающей скорости сушки составляла не больше 15% от общего времени сушки. Это говорит о том, что большая часть влаги удаляется в постоянном периоде сушки.

При сушке сухарей «светлыми» ИК излучателями температурный градиент по толщине образцов составляет не больше 10—15  $град/см$ , что объясняется значительным (до 10 мм) проникновением коротковолнового ИК излучения в толщу сухарей. Интенсивный прогрев центральных слоев сильно увеличивает коэффициент  $a_m$ , что приводит к интенсификации процесса сушки сухарей. Скорости сушки сухарей «Детские» и «Сливочные» примерно одинаковы. Продолжительность сушки сухарей «Сливочные» несколько больше, что обусловлено большим начальным и меньшим конечным влагосодержанием.

При осциллирующих режимах сушки наилучшие результаты достигаются при одинаковых циклах нагрева и охлаждения, равных 6 мин. Время сушки при этом увеличивается примерно на 30%, в то время как экономия электроэнергии составляет примерно 50%.

Из анализа проведенных опытов вытекает, что перенос влаги путем термодиффузии при терморadiационной сушке сдобных сухарей в наших условиях играет малую роль, так как процесс сушки происходит, в основном, в периоде постоянной скорости сушки, что обусловлено достаточно высокой интенсивностью подвода влаги к зоне испарения.

В наших условиях продолжительность сушки сухарей «Детские» составляет 10—12 мин, а сухарей «Сливочные» — 12—14 мин, в то время как в производственных условиях при радиационно-конвективной сушке продолжительность их сушки составляет 20—22 мин.

На основе проведенного исследования установлена принципиальная возможность и целесообразность использования «светлых» ИК излучателей для сушки сдобных сухарей при значительной интенсификации процесса сушки. В случае применения лам-

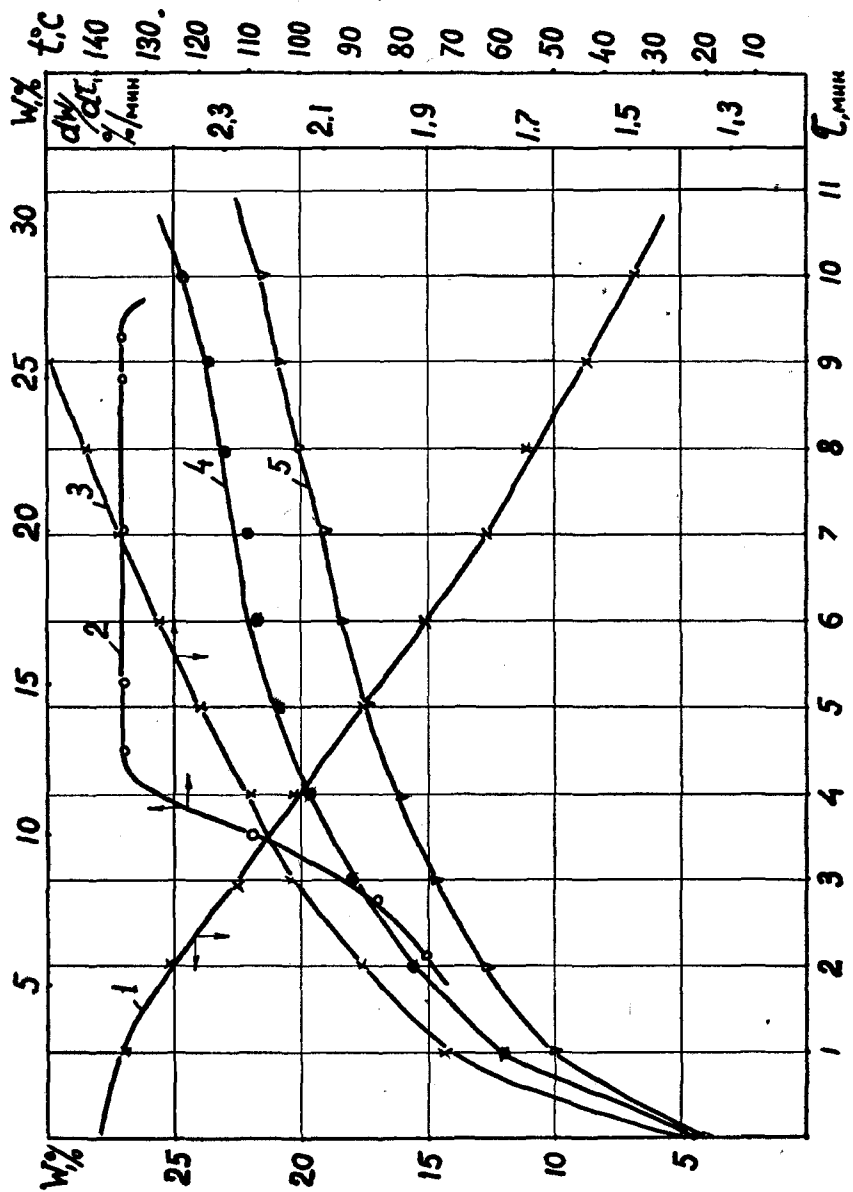


Рис. 6.

повых излучателей типа ЗС-3 можно рекомендовать располагать сухари на расстоянии 0,3 м от дна колб ламп и применять симметричный двухсторонний обогрев. Допускаемая величина облученности  $E=8800$  вт/м<sup>2</sup>. Качественные показатели сдобных сухарей, высушенных при таких условиях, удовлетворяют всем требованиям стандарта.

## V. Физические основы расчета терморadiационных сушильных установок

На основе вышеизложенного комплекса исследований и теории теплообмена излучением предложена методика теплового расчета терморadiационных сушильных установок пищевой промышленности.

Методика теплового расчета терморadiационных сушильных установок впервые в СССР разработана П. Д. Лебедевым. Этому вопросу посвящены также работы А. С. Гинзбурга, Г. Д. Рабиновича, Л. С. Слободкина, И. С. Павлова, А. А. Калитина, П. Л. Павловского и др.

Из рассмотрения этих работ можно сделать вывод, что они позволяют рассчитать необходимую облученность материала при его термообработке, оставляя в стороне вопрос о способах создания этих облученностей.

При условии равномерной облученности от ИК излучателей можно условно выбрать параллельную поверхности материала такую плоскость, задав ей температуру и степень черноты, что теплообмен между этой условно выбранной плоскостью и материалом, а также ограждениями установки будет соответствовать теплообмену между ИК излучателями, материалом и стенками ограждения установки.

Выбрав таким образом условную плоскость и приняв стенки и материал серыми телами, теплообмен в рабочей камере можно рассматривать как лучистый теплообмен между серыми телами.

Уравнение теплового баланса терморadiационной сушильной установки с диатермической средой можно представить в следующем виде:

$$dQ_{\text{изл}} = dQ_{\text{м}} + dQ_{\text{огр}} + dQ_{\text{тр}}, \quad (1)$$

где  $dQ_{\text{изл}}$  — энергия, излучаемая ИК излучателями,  $dQ_{\text{м}}$ ,  $dQ_{\text{огр}}$ ,  $dQ_{\text{тр}}$  — энергия, поглощенная соответственно материалом, ограждениями и транспортирующими устройствами.

Незначительное поглощение ИК излучения средой в уравнении теплового баланса не учитывается.

Энергия  $dQ_{\text{м}}$ , поглощенная материалом, расходуется на нагрев материала, на фазовые превращения внутри материала, разрушение связи влаги с материалом, конвективный теплообмен

с окружающей средой, теплообмен излучением с ограждениями установки и нагрев транспортирующих устройств:

$$dQ_M = m_0 \left( c_0 + c_b \frac{W}{100} \right) dt + L dm + a_k (t_{п.м} - t_c) \cdot S \cdot d\tau + \\ + C_{пр} \left[ \left( \frac{T_{п.м}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_0}{100} \right)^4 \right] S d\tau + \frac{\lambda}{\delta} \cdot F_k dt \cdot d\tau; \quad (2)$$

Так как материал в установке находится в лучистом теплообмене с ИК излучателями и со стенками ограждения, то для определения  $dQ_M$  необходимо найти суммарный тепловой поток, который поглощает материал.

Суммарный тепловой поток зависит от вида установки. На практике находят применение терморadiационные установки закрытого, полужакрытого и открытого типа.

Для установок полужакрытого типа:

$$dQ_M = dQ_{14} + 2 dQ_{24}; \quad (3)$$

Ради удобства записей соответственно индексы 1, 4, 2, 3, 5, 6 относятся к условной поверхности излучения, поверхности материала и поверхностям ограждений установки.

Результирующий поток  $dQ_{14}$  определяется из расчета лучистого теплообмена между двумя параллельными, а  $dQ_{24}$  — между взаимноперпендикулярными плоскостями.

Тогда уравнение (2) в общем виде переписывается так:

$$C_{при} \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_4}{100} \right)^4 \right] \cdot F_1 \cdot \varphi_{14} \cdot k \cdot d\tau \pm 2C_{при} \left[ \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 - \right. \\ \left. - \left( \frac{T_4}{100} \right)^4 \right] \cdot F_2 \cdot \varphi_{24} \cdot k \cdot d\tau = m_0 \left( c_0 + c_b \frac{W}{100} \right) dt + L dm \cdot F_4 + \\ + a_k (t_{п.м} - t_c) F_4 \cdot d\tau + \frac{\lambda}{\delta} \cdot F_k \cdot \Delta t \cdot d\tau; \quad (4)$$

При  $T_4 > T_2$  второй член правой части (4) берется со знаком минус и, следовательно, в правой части (2) будет отсутствовать член, характеризующий теплообмен излучением с ограждениями установки.

Выразив левую часть (4) через облученность поверхности материала

$$E = \frac{Q_M}{F_4 \cdot d\tau} = C_{при} \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_4}{100} \right)^4 \right] \frac{F_2}{F_4} \cdot \varphi_{14} \cdot k \pm \\ \pm 2C_{при} \left[ \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_4}{100} \right)^4 \right] \frac{F_2}{F_4} \cdot k \cdot \varphi_{24};$$

(4) запишется так:

$$E = \frac{m_0}{F_4} \cdot c_{\text{пр}} \frac{dt}{d\tau} + L \frac{dm}{d\tau} + \alpha_k (t_{\text{п. м}} - t_c) + \frac{\lambda}{\delta} \cdot \Delta t; \quad (5)$$

По результатам лабораторных опытов из (5) можно определить величину  $\alpha_k$ .

Введем обозначение:

$$\frac{m_0}{F_4} \cdot c_{\text{пр}} = B(\tau); \quad L \frac{dm}{d\tau} = D(\tau); \quad \alpha_k (t_{\text{п. м}} - t_c) = M(\tau);$$

$$\frac{\lambda}{\delta} \cdot \Delta t = N(\tau).$$

Разделив переменные (5) перепишем в виде:

$$[E - D(\tau) - M(\tau) - N(\tau)] d\tau = B(\tau) dt; \quad (6)$$

Обозначив

$$E - D(\tau) - M(\tau) - N(\tau) = Z(\tau); \quad (7)$$

получим

$$d\tau = \frac{B(\tau)}{Z(\tau)} dt; \quad (8)$$

Разбивая весь период термообработки на два периода (постоянной и падающей скорости сушки), определяем продолжительность каждого в отдельности:

$$\tau_I = \int_{t_{\text{нач}}}^{t_I} \frac{\bar{B}(\tau)_I}{\bar{Z}(\tau)_I} dt_I; \quad (9) \quad \tau_{II} = \int_{t_I}^{t_{\text{кон}}} \frac{\bar{B}(\tau)_{II}}{\bar{Z}(\tau)_{II}} dt_I. \quad (10)$$

Для общей продолжительности термообработки имеем:

$$\tau = \tau_I + \tau_{II}; \quad (11)$$

При расчете закрытых сушилок необходимо учитывать также теплообмен материала еще с двумя стенками ограждения — передней и задней.

Тогда (3) в общем виде запишется так;

$$dQ_M = dQ_{14} + dQ_{24} + dQ_{34} + dQ_{54} + dQ_{64}; \quad (12)$$

При расчете открытых сушилок боковые стенки можно считать абсолютно черными телами при  $T=0$ . Тогда (3) запишется в виде:

$$dQ_M = dQ_{14}; \quad (13)$$

В работе рассмотрены вопросы расчета ограждений конструкции и тепла, поглощенного транспортирующими устройствами.

В качестве иллюстрации предлагаемой методики рассмотрен пример теплового расчета терморadiационной установки закрытого типа применительно к сушке съедобных сухарей.

Расчетная продолжительность сушки, определенная по (9) и (10), хорошо совпала с результатами опытов.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Исходя из особенностей внутреннего тепло- и массопереноса под воздействием ИК излучений показано, что аналитическое описание полей температур и влагосодержаний для случая постоянства тепло- и массообменных коэффициентов и оптических свойств обрабатываемого материала наиболее удобно провести методом Генри—Кранка—Смирнова с использованием конечного  $\cos$  — преобразований Фурье.

2. Исследованиями зависимости спектральных коэффициентов отражения  $\rho_\lambda$  от длины волны установлено, что с уменьшением длины волны и влагосодержания коэффициенты  $\rho_\lambda$  исследуемых материалов увеличиваются. Начиная с  $\lambda \geq 3$  мкм коэффициенты  $\rho_\lambda$  уменьшаются и практически не зависят от влагосодержания материалов.

3. Значительное пропускание ИК излучений исследуемыми продуктами приходится на коротковолновую область спектра ( $\lambda = 0,9—1,8$  мкм). С увеличением толщины образца длина волны, на которую приходится максимальное пропускание ИК излучения, смещается в сторону коротких длин волн.

4. Пространственное распределение отраженной радиации исследуемых материалов носит характер близкий к диффузному отражению.

5. Исследованиями спектральных характеристик ИК излучателей установлено, что максимальная спектральная интенсивность «светлых» и «темных» ИК излучателей при номинальном напряжении питания соответственно приходится на интервалы длин волн  $\lambda_{\max} = 1,3—1,4$  и  $\lambda_{\max} = 2,9—4,0$  мкм.

6. Исследованиями энергетических характеристик установлено, что равномерная облученность от отдельных «светлых» ИК излучателей достигается примерно, начиная с  $H \geq 0,5$  м — для ламп типа ЗС и  $H \geq 0,4$  м — для ламп заводов «Элпром» и «VEB», НИК и ТЭНов.

7. Исследования полей облученности от систем ИК излучателей позволили установить эмпирические правила их размещения, обеспечивающие равномерность облученности:  $H = 1,75$  L — для «светлых» и  $H = 1,4$  L — для «темных» ИК излучателей. При выполнении этого условия зависимость облученности, создаваемой системой ламп типа ЗС-3 и ЗС-1, от расстояния до обрабатываемого



мого материала  $H$  описывается следующей эмпирической формулой:

$$E = 13750 - 17500 H; \text{ (вт/м}^2\text{)} \quad (0,3 \text{ м} \leq H \leq 0,6 \text{ м});$$

8. Исследованиями кинетики терморadiационной сушки картофельного крахмала установлено, что наиболее рационально для этих целей применять «светлые» ИК излучатели. Допустимая облученность крахмала составляет  $7500 \text{ вт/м}^2$ . При этом продолжительность сушки крахмала при толщине слоя в  $8 \text{ мм}$  составляет примерно  $20 \text{ мин.}$

9. Исследование кинетики сушки сдобных сухарей при помощи «светлых» ИК излучателей показало, что допустимая их облученность составляет  $8800 \text{ вт/м}^2$ . При двухстороннем облучении продолжительность сушки уменьшается примерно в два раза по сравнению с таковой в промышленных условиях и составляет для сухарей «Детские»  $10-12 \text{ мин.}$ , сухарей «Сливочные» —  $12-14 \text{ мин.}$

10. Комплексное исследование оптических свойств материалов, спектральных и энергетических характеристик ИК излучателей, кинетики терморadiационной сушки легли в основу предлагаемого метода теплового расчета терморadiационных установок. Методика теплового расчета проверена на лабораторной установке периодического действия.

Основные результаты работы доложены на Сессии Научного Совета АН УССР по проблеме «Высокотемпературная теплофизика» (10—12.XI.1966 г., г. Киев), на XXXII и XXXIII научных конференциях Киевского технологического института пищевой промышленности и опубликованы в следующих печатных работах:

1. Душенко В. П., Буляндра О. Ф. Про вибір оптимальних умов термічної обробки дисперсних харчових продуктів інфрачервоними променями. Тези доповідей XXXII наукової конференції КТІХП, К., 1966.

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

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

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

5. Душенко В. П., Буляндра О. Ф. Про тепловий розрахунок установок з інфрачервоними випромінювачами. Тези доповідей XXXIII наукової конференції КТІХП, К., 1967.

6. Буляндра А. Ф., Дорохович А. Н., Душенко В. П., Лисовенко А. Т. Пути интенсификации выпечки пряников инфракрасными лучами. Сб. «Пищевая промышленность», 5, 1967.

## ОБОЗНАЧЕНИЯ

$i_m$  — удельная скорость влагоотдачи,  $кг/м^2 \cdot сек$ ;  $E$  — облученность,  $вт/м^2$ ;  $\rho$  и  $\rho_\lambda$  — коэффициент и спектральный коэффициент отражения ИК излучений поверхностью материала;  $i_\lambda$  — спектральная интенсивность величины излучения;  $m_0$  — масса абсолютно сухого вещества,  $кг$ ;  $c_0$  — удельная теплоемкость абсолютно сухого вещества,  $дж/кг \cdot град$ ;  $L$  — удельная теплота испарения с учетом энергии связи влаги,  $дж/кг$ ;  $dm$  — количество влаги, испаренной из единичной площадки за время  $dt$ ,  $кг/м^2$ ;  $\alpha_k$  — коэффициент конвективного теплообмена материала с окружающей средой,  $вт/м^2 \cdot град$ ;

$t_{пм}$ ,  $t_c$  соответственно температуры поверхности материала и окружающей среды,  $^{\circ}C$ ;  $C_{пр}$  — приведенный коэффициент излучения материала и ограждений установки,  $вт/м^2 \cdot град^4$ ;  $T_{п.м}$ ,  $T_0$  — температура поверхности материала и ограждений установки,  $^{\circ}K$ ;  $S$  — облучаемая поверхность материала,  $м^2$ ;  $\lambda$  — эквивалентный коэффициент теплопроводности паровоздушного контактного слоя;  $вт/м^2 \cdot град$ ;

$\delta$  — толщина паровоздушного контактного слоя,  $м$ ;  $F$  — площадь контакта,  $м^2$ ;  $\Delta t$  — перепад температур по толщине паровоздушного слоя,  $град$ ;  $dQ_{14}$  — результирующий поток между условно выбранной плоскостью излучения и поверхностью материала,  $дж$ ;

$dQ_{24}$  — результирующий поток между стенкой ограждения и поверхностью материала,  $дж$ ;  $T_1$ ,  $T_4$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ ,  $T_5$ ,  $T_6$  — соответственно температуры условной поверхности излучения, поверхности материала и ограждений установки,  $^{\circ}K$ ;  $k$  — коэффициент заполнения конвейера установки;  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_4$  — соответственно площади условной поверхности излучения, стенок ограждения и поверхности обрабатываемого материала,  $м^2$ ;  $\varphi_{14}$ ,  $\varphi_{24}$  — соответственно угловые коэффициенты условной поверхности излучения и поверхности материала, условной поверхности излучения и стенок ограждения;

$C_{пр14}$ ,  $C_{пр24}$  — соответственно приведенные коэффициенты излучения условной поверхности излучения и поверхности материала, условной поверхности и стенок ограждения.