



**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ УССР**

**КИЕВСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

На правах рукописи

БУЛЯНДРА Алексей Федорович

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВЫБОРА
РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ СУШКИ И
РАСЧЕТА СУШИЛЬНЫХ УСТАНОВОК
ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

**Специальность 05. 18. 12 — Процессы и аппараты
пищевых производств**

**Автореферат диссертации
на соискание ученой степени доктора
технических наук**

Киев 1978

Работа выполнена в Киевском технологическом институте
пищевой промышленности

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки
и техники, лауреат Государственной премии Латв. ССР, академик
Б.А.МИХАЙЛОВ;

доктор технических наук, профессор М.А. ГРИШИН,
доктор технических наук, профессор Н.А.БУРЕНКОВ

Ведущая организация - сектор теплообмена института
технической теплофизики АН УССР.

Защита состоится " _____ " 197 г. в _____ ч. на
заседании специализированного совета Д 068.30.01 Киевского
технологического института пищевой промышленности по адресу:
252017, Киев 17, Владимирская, 68, аудитория _____.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан " _____ " 197 г.

Ученый секретарь
специализированного совета,
доцент

В.М.ТАРАН

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В соответствии с решениями XXV с"езда
МПС основной задачей промышленности в десятой пятилетке являет-
ся обеспечение всемерного роста эффективности общественного про-
изводства и улучшения качества продукции. Прирост продукции пище-
вых отраслей составит 23-25%. Решающим фактором в достижении этих
задач будет дальнейшее развитие научных исследований, ускорение
и широкое внедрение в производство прогрессивной техники и тех-
нологии.

Теплообменные процессы сушки в производстве пищевых
продуктов являются наиболее энергоемкими, трудоемкими и требуют
больших затрат времени. Интенсификация этих процессов может
быть достигнута за счет применения новых режимов их термообра-
ботки при высокointенсивных методах подвода тепла - инфракрасный
(ИК) нагрев, токи высокой и сверхвысокой частот (ТВЧ и СВЧ) и др.

Основные положения теории сушки разработаны советскими уче-
ными А.В.Лыковым, П.А.Резиндером, Г.К.Филоменко, П.А.Постновым,
М.Ю.Дурье, А.В.Думанским, С.М.Липатовым, Ю.Л.Кавказовым, П.Д.Ле-
бедевым, Ю.А.Михайловым, О.А.Кремневым, А.С.Гинзбургом, В.В.Крас-
ниновым, М.Ф.Казанским, Н.В.Чураевым, Н.И.Гамановым, А.А.Долги-
ским, В.П.Душенко, М.А.Гришиным и др.

Выбор рациональных режимов сушки пищевых продуктов базирует-
ся на физико-химических свойствах и закономерностях переноса энер-
гии и массы в процессе их обезвоживания. Однако, выбор режимов
сушки связан с определенными трудностями в связи с тем, что в
настоящее время еще мало работ, посвященных исследованию гидро-
скопических, структурно-геометрических, теплофизических (ТФХ) и
массопереносных свойств. Для обобщения результатов исследования
процессов сушки прежде всего необходима классификация пищевых
продуктов по их основным сушильным свойствам.

В настоящее время имеется еще недостаточно сведений о кинетике и динамике процесса сушки пищевых продуктов при таких высокоинтенсивных методах энергоподвода как ИК излучения, токи СВЧ и их комбинаций с конвективным методом подвода тепла. Крайне мало работ, посвящено обобщению кинетики сушки. Эти сведения необходимы для выбора оптимальных режимов сушки при проектировании нового оборудования, а также при научно-исследовательских разработках.

Исходя из вышесказанного и учитывая, что в нашей стране на процессы сушки расходуется огромное количество топлива (до 15%), решение проблемы комплексного исследования тепломассопереноса в области технологических процессов и техники сушки пищевых продуктов при новых физических методах энергоподвода является актуальной задачей и имеет важное теоретическое и практическое значения.

Цель и задачи исследования. Для разработки научно-технических основ выбора рациональных режимов сушки необходимо классифицировать влажные дисперсные пищевые продукты по их определяющим сушильным свойствам. Исходя из этой классификации и учитывая важное народнохозяйственное значение, в качестве объектов сушки следует выбрать отдельные пищевые продукты из различных ее классов и провести комплексное исследование их гигроскопических, структурно-геометрических, теплофизических и других свойств, а также провести исследования внутреннего тепломассопереноса в объектах сушки при ИК энергоподводе. На основе этих исследований разработать общие требования к построению оптимальных режимов сушки пищевых продуктов данных классов.

Учитывая большие экспериментальные трудности исследования внутреннего тепломассопереноса, разработать методики и провести исследования: развития температурных полей $t = f(x, \tau)$, эффективных коэффициентов теплопроводности $\lambda_{эф} = f(x, \tau)$ и плотности поглощаемых тепловых потоков $q_n = f(\tau)$ в процессе ИК сушки пищевых продуктов с помощью метода электротепловых аналогий (ЭТА)

Провести обобщение кинетики терморadiационной сушки пищевых продуктов по режимным параметрам.

Исследовать кинетику сушки макаронных изделий, как представителя сильноструктурированных коагуляционных систем с малой пористостью при конвективном и конвективно-высокочастотном методах энергоподвода. На основе этих исследований разработать рациональные многостадийные режимы сушки длиннотрубчатых макарон и передать их для внедрения в промышленность.

Научная новизна работ. В работе впервые развит новый подход и разработана новая классификация влажных дисперсных пищевых продуктов по их определяющим сушильным свойствам. Исследование гигроскопических, структурно-геометрических, теплофизических и других свойств позволило выработать общие требования к построению рациональных режимов сушки отдельных классов пищевых продуктов.

С помощью разработанных методик и аппаратуры получены терморadiационные свойства многих пищевых продуктов и спектральные характеристики промышленных ИК генераторов.

На основе обширных опытных данных предложены правила размещения систем ИК генераторов в промышленных установках, обеспечивающие наилучшую равномерность облученности. Для расчета облученности, создаваемых ТЭН'ами предложены эмпирические зависимости.

Изучение кинетики терморadiационной обработки одобрных сухарей различных наименований, сахара-рафинада, мясных фаршей позволило установить общие закономерности внутреннего тепломассопереноса в этих продуктах. Эти результаты положены в основу разработки новых режимов термообработки, которые сокращают продолжительность сушки одобрных сухарей в 1,5-2 раза, сахара-рафинада в 5-8 раз, мясного фарша в 2 раза по сравнению с производственными режимами. Кроме того, результаты глубокой сушки имеют обшнауучную ценность.

Впервые для исследования внутреннего теплообмена в процессах терморadiационной сушки влажных материалов разработаны методики, базирующиеся на электротепловой аналогии.

Обработка многочисленных опытов по кинетике терморadiационной сушки ряда пищевых продуктов позволила прийти к заключению, что комплекс $dQ^* = const$ не зависит от режима сушки и способа подвода тепла, если сушка ведется от одинаковых начальных и до одинаковых конечных влагосодержаний. Это дает возможность предложить новое обобщение кинетики сушки в координатах (U, dQ^*) . Учитывая, что при терморadiационной сушке за счет интенсификации испарения влаги поверхностная корочка очень быстро высыхает и в дальнейшем терморadiационные характеристики практически не изменяются, предложено также обобщение по режимному параметру E в координатах $(U, E\tau)$.

Исследование кинетики сушки многих пищевых продуктов показало, что процесс сушки их до стандартных влагосодержаний практически идет в постоянном периоде сушки. Для таких материалов установлено, что продолжительность сушки от одинаковых значений U_0 до одинаковых U_k пропорциональна толщине образца δ , т.е. $\tau/\delta = const$. Это дает возможность предложить обобщение кинетики сушки в координатах $(U, \tau/\delta)$. Из последних двух обобщений видно, что комплекс $E\tau/\delta = const$. Это приводит к новому обобщению в координатах $(U, E\tau/\delta)$.

Предложенные обобщения проверены для многих материалов (крахмал, сдобные сухари, сахар, силикаты, пески, ткань и др.) и дали хорошие результаты.

На основании комплексного исследования терморadiационных свойств пищевых продуктов, спектральных и энергетических характеристик промышленных ИК генераторов предложена новая методика теплового расчета терморadiационных сушильных установок, базирующаяся на использовании условной поверхности излучения.

Исследования гигроскопических, структурно-механических свойств и усадки макаронных изделий, а также изучение кинетики их сушки при конвективном и конвективно-высоочастотном методах подвода тепла позволили разработать новые режимы сушки длиннотрубчатых макарон на промышленных аппаратах, многостадийные режимы сушки в плоских кассетах, на которые получено авторское свидетельство и многостадийные режимы во вращающихся кассетах. Применение этих режимов привело к резкому сокращению продолжительности сушки (в 2-3 раза) по сравнению с сушкой в производственных условиях.

Практическое использование результатов исследования

Предложенная классификация влажных пищевых продуктов найдет широкое применение как в научно-исследовательских, так и в проектных организациях при проектировании сушильного оборудования.

Исследования гигроскопических, теплофизических и массообменных характеристик основных типов пищевых продуктов применяют при выборе оптимальных режимов их сушки, кроме того данные по ТФХ используют при тепловых расчетах промышленных сушильных установок.

Разработанная аппаратура для измерения терморadiационных характеристик материалов и энергетических характеристик ИК генераторов применяется для проведения научных разработок в КТИП, КГПИ им. Горького, Украинимп, КПИ, Укрсахпроект и др.

Предложенные методики изучения развития $t = f(x, \tau)$, $\lambda_{\text{эф}} = f(x, \tau)$ и $q_n = f(\tau)$ в процессе сушки с помощью метода ЭТА найдут применение в научно-исследовательских организациях страны.

Полученные обобщения кинетики терморadiационной сушки можно применять как при инженерных расчетах сушилок, так и при научно-исследовательских разработках.

Результаты комплексных исследований кинетики терморadiационной сушки использованы Молдхлебпромом при проектировании и изгото-

товлении промышленного образца терморadiационной установки для сушки сдобных сухарей различных наименований. Такая установка производительностью 200 кг/ч внедрена на Тираспольском хлебосомбинате. Экономический эффект от внедрения одной такой установки составил 41,6 тыс.руб. в год.

Результаты комплексных исследований кинетики терморadiационной сушки сахара-рафинада использованы Укрсахпроектом при проектировании промышленного образца сушильной установки. Производительность такой установки составляет 1250 кг/ч. Экономический эффект от внедрения составит 46,4 тыс.руб. в год.

Результаты комплексных исследований кинетики терморadiационной обжарки колбасных изделий использованы УкрНИИММП при разработке опытно-промышленного образца теплового агрегата для производства колбасных изделий без оболочки. Данный образец принят ведомственной комиссией ММП СССР и рекомендован к внедрению. Экономический эффект от внедрения линии варенных колбас производительностью 100 кг/ч составит 71,0 тыс.руб. в год.

Разработанные режимы сушки длиннотрубчатых макаронных изделий для промышленных аппаратов внедрены лабораторией макаронного производства ВНИИХП на Орловской и Фрунзенской, а Укрмакаронпром внедрил их на Симферопольской и в настоящее время внедряет на Киевской макаронных фабриках. Многостадийные режимы сушки во вращающихся кассетах использованы СКБ ИТФ АН УССР при разработке конструкции промышленного образца установки для сушки макаронных изделий.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на 12 Всесоюзных и республиканских научных конференциях, симпозиумах, коллоквиумах и семинарах, посвященных вопросам исследования тепломассопереноса в технологических процессах. Кроме того, основные разработки работы докладывались на научных конференциях КТИП за период с 1968 по 1978 гг.

Структура и об"ем работы. Диссертация состоит из введения, восьми глав, общих выводов, списка использованной литературы и приложений. В приложениях приведены сведения дополнительного характера (таблицы), а также акты о внедрении законченных научно-исследовательских работах, расчет экономической эффективности созданного оборудования и др.

Представленная работа на протяжении многих лет (1968-1978 гг.) входила в план научно-исследовательских работ Киевского технологического института пищевой промышленности, а также Министерств пищевой промышленности УССР и МССР, а отдельные ее разделы, как имеющие важное народнохозяйственное значение, входили в план важнейших работ Совета Министров УССР.

Реферируемая диссертационная работа является обобщением результатов многолетних исследований, проведенных автором, а также при его непосредственном участии и руководстве аспирантами И.Т.Тарановым, Б.И.Вербицким, В.П.Дорожуком, В.А.Тарапон и Ю.П.Дупиком на кафедре физики КТИП.

1. НАУКА О ТЕПЛОМАСООБМЕНЕ - ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОСНОВА ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНЫХ МЕТОДОВ И РЕЖИМОВ СУШКИ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

В первой главе диссертации приведен анализ современного состояния теории и техники сушки пищевых продуктов и намечены задачи исследования.

2. ВОПРОСЫ ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНЫХ МЕТОДОВ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ СУШКИ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

Многочисленность пищевых продуктов, подвергающихся сушке и многообразие их свойств в настоящее время не дает возможности даже в качественном отношении произвести выбор метода подвода тепла и оптимальных режимов их сушки. Решить этот вопрос можно путем обобщения многочисленных данных по сушке пищевых продуктов и создания их классификации по основным сушильным свойствам.

Разработанная классификация влажных дисперсных пищевых продуктов является дальнейшим развитием идей А.В.Лыкова и П.А.Резинера.

В качестве основных определяющих свойств нами приняты количество компонент и их агрегатное состояние и характер взаимодействия частиц дисперсной фазы. По количеству компонент и их агрегатному состоянию пищевые продукты подразделяются на две группы. К первой относятся системы, состоящие из твердой дисперсной фазы, жидкой и газообразной дисперсионной сред. К этой группе относятся большинство пищевых продуктов. Ко второй, относятся системы, состоящие из жидких дисперсной и дисперсионной сред (эмульсии).

По характеру взаимодействия частиц дисперсной среды пищевые продукты подразделяются на свободно- (бесструктурные) и связно-дисперсные. Под свободнодисперсными понимаются бесструктурные системы, в которых частицы дисперсной среды не связаны друг с другом в один сплошной каркас или сетку. В зависимости от размера частиц свободнодисперсные системы подразделяются на микро- и макрорегетерогенные. Характерным для продуктов этой системы является практическое отсутствие сил молекулярного взаимодействия между частицами из-за больших расстояний между ними по сравнению с их размерами (микрогетерогенные системы) или по сравнению с силой тяжести (макрорегетерогенные системы).

В связнодисперсных системах частицы дисперсной среды взаимодействуют друг с другом за счет межмолекулярных и химических сил. В зависимости от величины этих сил твердые частицы дают более или менее жесткие пространственные структуры или каркасы. В таких системах твердые частицы не способны перемещаться друг относительно друга и совершают хаотическое колебательное движение.

В зависимости от характера сил взаимодействия между частицами связнодисперсные системы подразделяются на коагуляционные и кристаллизационные. Образование коагуляционных структур происхо-

дит за счет молекулярного сцепления беспорядочно расположенных мельчайших частиц дисперсной среды или макромолекул через тонкие прослойки дисперсионной среды. Такие системы не обнаруживают дальнего порядка, свойственного кристаллическим телам.

Молекулярное взаимодействие между мельчайшими частицами осуществляется за счет вандерваальсовых сил. В зависимости от сил молекулярного взаимодействия коагуляционные структуры подразделяются на две группы - слабо- (порошкообразные) и сильно-структурированные (твердообразные). Слабоструктурированные коагуляционные системы обладают тиксотропией, в то время как сильноструктурированные разрушаются необратимо.

При сушке на внутренний влагоперенос существенную роль оказывает поровая структура, поэтому - слабо- и сильноструктурированные системы подразделяются на системы с малой и большой пористостью.

Кристаллизационные структуры, так же как и коагуляционные, в зависимости от величины межмолекулярных сил подразделены на слабо- и сильноструктурированные и системы с малой и большой пористостью.

Существенное значение в процессе сушки влажных материалов оказывает характер взаимодействия твердых дисперсных частиц с влагой. Поэтому системы, содержащие в качестве дисперсной фазы твердые частицы, подразделены на системы с поверхностным и поверхностно-объемным взаимодействием влаги с материалом. Различный характер такого взаимодействия приводит к наличию различных форм связи влаги. Так, в системе с поверхностным взаимодействием будет наблюдаться влага моной, полиадсорбционной связи и капиллярная. В системах с поверхностно-объемным взаимодействием макромолекулы тела целиком проницаемы для молекул воды. Наличие в таких системах низкомолекулярных растворимых фракций приводит, кроме указанных форм связи влаги, к появлению влаги осмотического впитывания.

Важное значение для разработки оптимальных режимов сушки и-

ракт структурные изменения системы в процессе влагоудаления. В связи с этим пищевые продукты с твердой дисперсной фазой подразделены на материалы, которые при увлажнении диспергируются и растворяются и набухающие.

Как видно, при разработке классификации в одну группу поставлены продукты с близкими исходными свойствами. Это является очень важным, так как дает возможность выбрать в качестве типичных представителей отдельные продукты из определенных групп (крахмал, одобрные сухари, макаронные изделия и др.). Зная оптимальные режимы сушки для типичных представителей, можно прогнозировать, хотя бы в качественном отношении, режимы сушки других продуктов этой группы.

Исходя из предложенной классификации влажных дисперсных материалов и учета их основных сушальных свойств, в работе излагаются требования для построения рациональных режимов сушки каждой группы продуктов в отдельности.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ГИГРОСКОПИЧЕСКИХ, СТРУКТУРНО-ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ, ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ И МАССОВЫХ СВОЙСТВ ОБЪЕКТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучение процессов сорбции и десорбции воды пищевыми продуктами осуществлялось с помощью тензиметрического метода, сорбционной вакуумной установки и метода термограмм сушки М.Ф.Казанского.

В работе приведен детальный анализ изотерм сорбции. Остановимся лишь на количественных сведениях о формах связи влаги с пищевыми продуктами. Изотермы не имеют четких границ перехода влаги от одного состояния в другое, но, исходя из теории БЭТ, эту границу примерно можно определить. Так, при комнатной температуре для крахмала влага мономолекулярной адсорбции U_m составляет примерно 8%, а для сухарей "Московские" - 7-8%. Для большинства продуктов значения U_m составляют 7-10%. Для сахара $U_m=0,1\%$. Влага полимолекулярной адсорбции U_n составляет для крахмала 23-30%,

для одобрных сухарей - 13-14%. Максимально гигроскопическое влаго-содержание $U_{m.s.}$ для этих образцов составляет соответственно 40-42% и 30-32%.

Из рассмотрения дифференциальных водоудерживающих свойств крахмала и одобрных сухарей видно, что при сушке их в производственных условиях (влаго-содержание соответственно снижается от 55 до 25 и от 32-30 до 8-12%) удаляется в основном капиллярно-конденсированная влага и частично полимолекулярной адсорбции. Эта влага слабо связана с твердым скелетом и, если учесть развитую поровую структуру этих материалов, можно предположить, что для ее удаления можно рекомендовать жесткие режимы.

Пористая структура дисперсных влажных пищевых продуктов оказывает существенное влияние на механизм переноса тепла и влаги в них. Механизм связывания влаги с твердым скелетом существенно зависит от его гидрофильности и величин радиусов капилляров. Наличие в твердом скелете пищевых продуктов, микро-, макрокапилляров и каверн делает картину переноса в них достаточно сложной.

В качестве примера, нами проведено исследование общей пористой структуры одобрных сухарей при помощи метода Якоби, стандартным методом, а также сминанием вырезанных образцов под прессом. Данные, полученные различными методами, отличаются друг от друга не более чем на $\pm 3-5\%$. Плиты одобрных сухарей обладают значительной пористостью, составляющей в зависимости от наименований сухарей 70-73%. Пористость одобрных сухарей несколько ниже 62-75%, что объясняется усадкой плит в процессе сушки.

Основное влияние на выбор оптимальных режимов сушки сильно-структурированных конвекционных систем с малой пористостью оказывает не их пористая структура, а усадка. Поэтому нами проведено исследование усадки макарон, как типичного представителя этой системы при наиболее прогрессивных трехстадийных режимах сушки. Как показали исследования, в период предварительной сушки, при

удалении влаги от U_0 до $U_{sp} = 28\%$, изменение линейной усадки от влагосодержания носит почти прямолинейный характер. Это свидетельствует о свободной усадке всех слоев теста макаронной трубки и отсутствии напряженного состояния. Во время отволаживания происходит перераспределение влагосодержания по толщине макаронной трубки, снятие создавшихся напряжений и линейные размеры трубок увеличиваются. Снятие внутренних напряжений дает возможность в стадии окончательной сушки интенсифицировать процесс за счет применения более жестких режимов по сравнению с одностадийными режимами сушки.

Исследование теплофизических характеристик пищевых продуктов осуществлялось с помощью метода мгновенного источника тепла (по Кантеру) на специально изготовленной экспериментальной установке. При исследованиях ТХ толщина образцов, мощность нагревателя и длительность его действия подбирались такими, чтобы температурный перепад по толщине не превышал $0,5-1^\circ\text{K}$. Длительность теплового воздействия составляла 3 с. Соблюдение этих условий практически исключает массоперенос, что является особенно важным для образцов, ТХ которых существенным образом зависят от влажности и температуры. Точность измерений коэффициента A составила $\pm 1,5\%$, λ $\pm 5\%$. Подробное описание установки приведено в работе.

Как показали исследования, определяющая роль на характере изменения кривых $\lambda = f(U)$ и $A = f(U)$ принадлежит формам связи влаги с продуктами.

В области моно- и полиадсорбционной связи для слабоструктурированных коагуляционных систем наблюдается незначительный рост значений λ и A в то время как для сильноструктурированных — он значителен. Это объясняется тем, что влага этих форм связи прочно связана с твердым скелетом и в теплопереносе слабоструктурированных систем играет незначительную роль. Сильноструктурированные системы обладают твердым скелетом и основная часть тела

в таких системах транспортируется через твердый скелет. Наличие на поверхности твердого скелета микрокапилляров с влагой по капиллярно-осмотической связи приводит к увеличению значений λ и α за счет лучшей теплопроводности воды. При дальнейшем увеличении влагосодержания наблюдается значительный рост кривых $\lambda = f(u)$ слабо-структурированных систем. Это связано с появлением влаги капиллярной конденсации и заменой воздуха микрокапилляров влагой и улучшением их теплопроводности. Увеличение влагосодержания сильноструктурированных систем приводит к их набуханию, разрушению твердого скелета в наименее прочносвязанных местах и некоторому уменьшению значения λ . При переходе в область влажного состояния наблюдается резкий рост значений λ , что связано с улучшением тепловых контактов за счет тонких прослоек воды между отдельными зернами слабоструктурированных систем и ее лучшей теплопроводности.

Опытные данные по ТЭХ пищевых продуктов представлены в виде эмпирических формул. Так, зависимости $\lambda = f(t)$ для сухих сахаров носят примерно линейный характер и могут быть представлены в виде

$$\lambda_t = \lambda_0 + \beta t ; \quad (1)$$

Значения λ_0 и β для различных наименований сахаров рассчитаны на вычислительной машине "Наири" и представлены в работе. Расчетные значения λ_0 совпадают с экспериментальными с точностью $\pm 5\%$.

Примерно аналогичный характер имеют кривые $\lambda = f(u, t)$ и $\alpha = f(u, t)$ для других исследованных нами пищевых продуктов.

Изучение зависимости $C = f(t)$ для указанных продуктов проводилось с помощью калориметрической установки, использующей метод термографического анализа. Исследованиями установлено, что зависимость $C = f(t)$ для сухого картофельного крахмала и слоистых сахаров имеет линейный характер и может быть аппроксимирована уравнением

$$C_z = C_0 + dt \quad (2)$$

Расчет по этой формуле дает совпадение результатов с экспериментальными с точностью $\pm 3-5\%$. Численные значения C_0 и d рассчитаны на ЭВМ "Наири" и представлены в работе.

4. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОРАДИАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ, СПЕКТРАЛЬНЫХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИК ГЕНЕРАТОРОВ

Исследование терморadiационных характеристик рассеивающих излучение пищевых продуктов осуществлялось методом зеркальной полусферы. Последний обладает рядом преимуществ по сравнению с другими методами и достаточно полно теоретически разработан в трудах советских ученых Б.П.Козырева, А.С.Гинзбурга, В.В.Красникова, Н.Г.Селюкова, С.Г.Ильсова, В.П.Дущенко, А.Ф.Буляндры, И.М.Кучерука и др.

Разработанная нами установка с применением пироприемника и усилителя ИМЭК-2 позволила значительно повысить точность измерений.

Многочисленные опыты показали, что зависимости $R_\lambda = f(\lambda)$ влажных пищевых продуктов имеют сложный характер. Для большинства пищевых продуктов наибольшая отражательная способность приходится на интервал длин волн 0,8-1,8 мкм. Затем значения R_λ падают и примерно при $\lambda = 3$ мкм достигают минимума. При дальнейшем увеличении длины волн коэффициенты R_λ несколько увеличиваются. Значительная отражательная способность пищевых продуктов в коротковолновой области объясняется сильным рассеянием ИК излучения на оптических неоднородностях. Сильное рассеяние приводит к тому, что в отражении участвуют не только поверхностный слой, но и нижележащие, что способствует увеличению R_λ . С увеличением длины волны рассеяние, как установили В.В.Красников и С.Г.Ильсов, уменьшается примерно в 5-10 раз, что приводит к уменьшению R_λ .

На всех кривых $R_\lambda = f(\lambda)$ наблюдается ряд полос погло-

нения в областях длин волн 1,3; 1,8 и 3,0 мкм, что соответствует полосам поглощения воды.

С увеличением толщины образцов значения R_d увеличиваются. Это объясняется тем, что в отражении участвуют глубинные слои. Причем значительное увеличение отражения приходится на коротковолновую область ИК спектра. Так, при увеличении толщины δ крахмала от 0,5 до 12 мм при $\lambda = 1$ мкм значения R_d увеличиваются примерно на 15%. Для материалов с более плотной структурой эта зависимость проявляется менее отчетливо.

С увеличением влагосодержания отражательная способность пищевых продуктов уменьшается. Например, при увеличении влагосодержания крахмала от 10 до 74% при $\lambda = 1$ мкм и $\delta = 12$ мм значения уменьшаются примерно на 30-35%. Объясняется это значительным поглощением ИК излучений водой, а также уменьшением коэффициента рассеяния и уплотнением структуры.

Спектральная пропускательная способность T_d пищевых продуктов исследовалась методом приемника с большой приемной площадкой и методом вертикальной полусферы. Характер кривых $T_d = f(\lambda)$ подобен кривым отражения. Наибольшая пропускательная способность пищевых продуктов приходится на ближнюю ИК область спектра. Для сухарей T_d достигает 30-40% при толщинах 2-4 мм в ближней ИК области спектра. При толщине $\delta = 7,5$ мм T_d составляет примерно 20% при $\lambda = 0,70-1,15$ мкм. Если учесть, что стандартная толщина сухарей составляет 14-16 мм, то станет ясным, что применение для сушки обычных сухарей ИК генераторов, основная часть излучения которых приходится на этот интервал длин волн, приведет к значительной интенсификации процесса за счет проникающей радиации.

Таким образом, проведенные исследования терморадияционных характеристик пищевых продуктов дают основания утверждать, что при выборе типа ИК генератора необходимо исходить из следующих соображений. Если необходимо достичь глубокого прогрева продуктов

(например, сушка, выпечка и т.д.), то предпочтение отдадут генераторам, основная доля излучения которых приходится на область спектра 0,8-2,0 мкм. Если же в процессе тепловой обработки необходимо добиться быстрой поверхностной обработки, то выбирают ИК генераторы, основная доля излучения которых приходится на длинноволновую область спектра.

Проведенные исследования спектральных характеристик различных "светлых" и "темных" промышленных ИК генераторов с помощью спектрометра ИКО-12 показали, что максимум спектральной излучательной способности их приходится соответственно на $\lambda_{max} = 1,3-1,4$ и $3,0-4,0$ мкм. Основная доля излучаемой энергии этими генераторами приходится на интервалы длин волн 0,8-2,5 и 1,5-6,0 мкм.

Анализ экспериментальных данных по энергетическим характеристикам показывает, что последние в основном определяются удельной потребляемой мощностью σ . Важным для практики является знание зависимости облученности $E = f(\sigma)$ при определенных значениях высоты H . Знание семейства этой функции дает возможность построить поля облученности любого ТЭН'а при известном значении σ без предварительных исследований. Обработка экспериментальных данных позволила получить следующую зависимость облученности под центрами ТЭН'ов:

$$E_0 = A + B \left(\frac{P}{S_0} \right)^C; \quad (3)$$

где A, B, C - численные коэффициенты, рассчитанные на электронной вычислительной машине "Мир";

P - потребляемая ТЭН'ом мощность, Вт;

S_0 - активная поверхность трубки, м².

Значение E в любой точке, перпендикулярной оси ТЭН'а может быть рассчитано по формуле

$$E = (A + B \left(\frac{P}{S_0} \right)) \exp(-\alpha \ell^2); \quad (4)$$

где ℓ - расстояние от проекции продольной оси на горизонтальную плоскость до измеряемой точки, м;

α, β - постоянные коэффициенты для каждой высоты рассчитанные на вычислительной машине "Мир".

Значения величин E , рассчитанные по формуле (4), отличаются от экспериментальных данных на +2-7%, что вполне удовлетворительно для практических целей.

5. КИНЕТИКА И ДИНАМИКА ТЕРМООБРАБОТКИ НЕКОТОРЫХ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ИК ИЗЛУЧЕНИЯ

Для исследования кинетики терморadiационной сушки пищевых продуктов нами была сконструирована и изготовлена специальная лабораторная установка, позволяющая одновременно осуществлять регистрацию и автоматическую запись убыли массы продукта и изменения послойных температур. Сушка может осуществляться как с помощью "темных", так и "светлых" ИК генераторов. Кроме того, в установке предусмотрена возможность осуществлять сушку при конвективном и конвективно-радиационном методах подвода тепла.

Точность регистрации убыли массы в данной установке составляет $\pm 0,4\%$, а температуры - $\pm 0,5\%$.

Исходя из предложенной классификации и учитывая важное научно-хозяйственное значение, а также недостаточную изученность разработка рациональных режимов термообработки осуществлялась при ИК энергоподводе для картофельного крахмала, сладких сухарей, мясных фаршей, как типичных представителей слабо- и сильноструктурированных коагуляционных систем и сахара-рафинада, как типичного представителя сильноструктурированных кристаллизационных систем.

Исследование кинетики сушки крахмала, исходя из согласования его терморadiационных свойств и спектральных характеристик ИК генераторов, проведено с помощью "светлых" излучателей (зеркально-сушильные лампы, кварцевые излучатели КИ-1000 и др.) при одностороннем энергоподводе и естественной конвекции воздуха. Величина

облученности E изменялась от 3000 до 7500 Вт/м², толщина слоя засыпки δ - от 0,005 до 0,07 м, начальное влагосодержание - от 12,5 до 68%. Насыпная масса воздушно-сухого крахмала составляла $\rho = 650$ кг/м³.

Как показали исследования, процесс терморрадиационной сушки крахмала протекает как в периоде постоянной, так и падающей скорости сушки. В промышленных условиях сушка крахмала осуществляется от $U_0 = 54-58\%$ до $U_k = 25\%$. При таком изменении влагосодержания сушка в наших условиях, протекает только в периоде постоянной скорости сушки. Это объясняется тем, что при уменьшении влагосодержания в этих пределах удаляется слабосвязанная влага намокания, осмотическая, капиллярной конденсации и незначительная часть поглотительной влаги.

Развитие температурных полей идет очень интенсивно. Интенсивный прогрев поверхностных слоев приводит к созданию значительных температурных градиентов dT/dx , достигающих 3000-4000 К/м. Появление значительных градиентов способствует появлению термодиффузионного переноса влаги внутри материала, что, в свою очередь, приводит к более интенсивному прогреву центральных слоев засыпки. Несмотря на наличие столь значительного периода постоянной скорости сушки, периода с постоянной температурой материала не наблюдается. Такой ход кривых $T = f(\tau)$ свойственен высокointенсивным методам подвода тепла.

Развитие температурных полей идет неодинаково и зависит от U_0 и δ . С увеличением значений U_0 при всех толщинах поверхностные слои прогреваются более интенсивно. Это связано с увеличением спектрального коэффициента поглощения A_λ ИК излучения с увеличением U . В отличие от поверхностных в глубинных слоях развитие температурных полей идет менее интенсивно. С уменьшением U_0 крахмала и увеличением δ значения $T_{\text{ср}} = f(\tau)$ уменьшаются, что связано с нарушением тепловых контактов между зернами крахмала.

Исследование кинетики сушки крахмала показало, что продолжительность сушки при малых значениях $\delta < 0,005$ м практически не зависит от U_0 , что связано с проникновением ИК излучения, интенсивным прогревом и испарением влаги во всем объеме. При этом продолжительность сушки в основном зависит от интенсивности удаления связанной влаги.

С увеличением толщины δ до 0,015 м продолжительность сушки существенно зависит от значений U_0 и на продолжительность сушки начинает оказываться внутренний влагоперенос. К поверхности крахмала подводится недостаточное количество влаги и сушка идет с углублением зоны испарения. Глубинные слои прогреваются менее интенсивно и влага перемещается в зону испарения.

Наличие периода постоянной скорости сушки наблюдается при $U_0 > 20\%$. При уменьшении U_0 в крахмале нет свободной влаги и сушка идет в периоде падающей скорости сушки.

Обработка экспериментальных данных позволила установить, что продолжительность сушки крахмала при $U_0, E = \text{const}$ до определенного значения U прямо пропорциональна толщине слоя засыпки, а численные значения скоростей сушки в периоде постоянной скорости сушки обратно пропорциональны значениям δ .

Исследование кинетики сушки крахмала в зависимости от величины E при $U_0, \delta = \text{const}$ показывает, что продолжительность процесса сушки до определенного значения U примерно обратно пропорциональна E . Скорость сушки $dU/d\tau$ с увеличением E возрастает по линейному закону. Примерно по такому же закону изменяется и плотность потока влаги через поверхность образца. Это подтверждает также и тот факт, что влажный крахмал обладает достаточно высокой влажностью. Этим же явлением объясняется ход среднеинтегральных температурных кривых $\bar{t} = f(\bar{U})$. При больших значениях U кривые $\bar{t} = f(\bar{U})$ при различных значениях E имеют одинаковые численные значения. При уменьшении влагоо-

держания примерно ниже 30% наблюдается расхождение кривых.

Для более глубокого изучения внутреннего тепломассообмена в процессе ИК сушки крахмала необходимо кроме температурных полей иметь сведения о развитии полей влагосодержания. Поэтому дальнейшее исследование кинетики сушки проводилось в специальной кювете, дающей возможность на определенном этапе сушки разрезать образец на слои толщиной 0,002 м и затем определить влагосодержание. Запись температурных кривых и убыли массы осуществлялась обычным методом.

Как показали исследования при сушке крахмала с начальным влагосодержанием, находящимся в области адсорбционной связи, сложное распределение влаги, кроме начального периода, происходит по линейному закону. С увеличением значений δ наблюдается криволинейный, близкий к параболическому, закон распределения влаги. Если в крахмале находится свободно связанная влага ($U > 30\%$) характер как температурных кривых, так и полей влагосодержания существенно изменяется.

Несколько необычное распределение влагосодержания наблюдается при больших значениях U_0 и δ . Так многочисленные опыты показывают, что после периода прогрева, на кривых $U = f(x)$ наблюдается уменьшение U не только в поверхностных, но и в слоях, находящихся на дне кюветы, в то время как влагосодержание центральных слоев увеличивается. Объясняется это тем, что при ИК энергоподводе происходит интенсивный прогрев крахмала по всей толщине слоя засыпки, достигающий в зависимости от E и δ 333-343 К. Такой интенсивный прогрев приводит к объемному испарению влаги, что в свою очередь, приводит к созданию избыточного градиента давления, под действием которого влага перемещается в центральные слои.

Таким образом, в центральные слои влага перемещается под действием градиента избыточного давления путем фильтрационного

переноса пара и жидкости против потока тепла и под действием термодиффузионных сил - по направлению потока тепла. В поверхностных слоях влага под действием диффузионных сил в виде пара перемещается против потока тепла. Интенсивное испарение влаги в поверхностных слоях создает значительный градиент концентраций. С течением времени диффузионный перенос влаги становится преобладающим и термодиффузионный перенос прекращается. Дальнейшая сушка идет за счет углубления зоны испарения.

Исследование кинетики сушки одобных сухарей также осуществлялось в лабораторной терморadiационной установке. Сушка осуществлялась при двухстороннем энергоподводе с помощью светлых ИК излучателей. Величина облученности составляла 4000-8000 Вт/м². Сушке подвергались сухари "Московские", "Туристские", "Украинские", "Детские", "Дорожные", "Школьные", "Горчичные", "Кофейные" и др. Для опыта использовались ломтики сухарных плит, изготовленные по требуемой рецептуре на Киевском хлебозаводе № 4. Толщина ломтиков в большинстве опытов соответствовала стандартной $\delta = 0,015$ м.

Как установлено многочисленными исследованиями, процесс сушки одобных сухарей протекает как в периоде постоянной, так и падающей скорости сушки. Если учесть, что в производственных условиях сушка сухарей осуществляется до $U_k = 15\%$, то видно, что в наших условиях сушка практически осуществляется только в периоде постоянной скорости сушки. Интенсивное удаление влаги в процессе терморadiационной сушки сухарей объясняется удалением свободной влаги. Сильно развитая поровая структура одобных сухарей позволяет осуществлять по микро- и макрокапиллярам интенсивный перенос влаги в зону испарения.

Скорость сушки сухарей в значительной степени определяется величиной E и с увеличением облученности изменяется по прямолинейному закону. Таким образом, внутренний массоперенос в одобных сухарях довольно в широких пределах изменения величины E не

является лимитирующим процесс сушки. Фактором, ограничивающим интенсивность сушки является скорость развития температурных полей и достижения предельной температуры. Так, при достижении $T = 403-423 \text{ K}$ в сухарях происходит карамелизация сахаров. Такой процесс происходит в поверхностных слоях при образовании специфической поджаристой корочки. При повышении температуры выше 423 K происходит обугливание сухарей.

Очень важным для практических целей является установление допустимой величины облученности $E_{\text{доп}}$. В результате проведенных опытов установлено, что $E_{\text{доп}} = 8000 \text{ Вт/м}^2$ с каждой стороны.

Развитие температурных полей в процессе сушки сухарей идет очень интенсивно, что также как и для крахмала, объясняется большими плотностями энергии, значительной теплопроводностью сухарей и проникновением ИК излучений на некоторую глубину. Так, при $E = 8000 \text{ Вт/м}^2$ температура на поверхности сухарей "Туристские" на 4 мин составляет примерно 363 K , а в центре сухаря - 348 K . Несмотря на интенсивное развитие температурный перепад между поверхностными и центральными слоями достигает значительной величины - $15-30 \text{ K}$. Наличие такого перепада приводит к термодиффузионному переносу влаги в центральные слои и более интенсивному прогреву их.

При рассмотрении температурных кривых крахмала и сдобных сухарей видно, что интенсивность развития температурных полей в сухарях при одинаковых значениях E и U_0 идет намного интенсивней. Объясняется это тем, что в сдобных сухарях значительная часть тепла передается через твердый скелет и вследствие этого коэффициенты теплопроводности их больше чем у крахмала. Особенно четко это прослеживается при малых значениях U .

Наличием твердого скелета, значительными пористостью и теплопроводностью объясняется тот факт, что скорость сушки сухарей в 5-10 раз больше скорости сушки крахмала при одинаковых условиях.

Таким образом, многочисленные опыты по исследованию кинетики сушки слобных сухарей при различных режимах и с применением различных ИК генераторов дают основание утверждать, что наилучшие результаты достигаются при непрерывном нагреве их с помощью кварцевых излучателей. При этом минимальное расстояние от излучателей до поверхности сухарей H должно составлять 0,15-0,16 м. Продолжительность сушки сухарей в этих условиях в зависимости от их вида составляет 9-12 мин., что примерно в два раза меньше, чем в промышленных условиях. Качественные показатели сухарей полностью удовлетворяют всем требованиям ГОСТ.

Исследование кинетики сушки сахара-рафинада осуществлялось в лабораторной терморadiационной установке. Анализ полученных терморadiационных характеристик сахара-рафинада показывает, что наиболее целесообразной для их сушки является область спектра 2,0-5,5 мкм. С учетом этого нами были применены "темные" ИК генераторы типа ИВС Бастовского завода электротермического оборудования, максимум излучательной способности которых приходится на длины волн 3,0-4,0 мкм. Сушка осуществлялась при двухстороннем подводе тепла. Суммарная величина облученности с двух сторон изменялась от 3600 до 8700 Вт/м². Начальная влажность - 1,2-2,0%.

Как показали исследования, кривые сушки и скорости сушки при ИК энергоподводе имеют сложный характер и не совпадают с типичными кривыми для наиболее часто встречающихся в практике материалов. Особенностью сушки данного класса материалов является то, что испарение влаги осуществляется из насыщенного раствора, это приводит к его пересыщению и выпадению сахара в виде мелких кристалликов.

В начальный период сушки происходит интенсивный прогрев материала и скорость сушки при этом резко возрастает. В этот период зона испарения находится на поверхности продукта и влага в виде жидкости достаточно интенсивно перемещается из внутренних слоев. Интенсивный прогрев сахара способствует увеличению его раствори-

мости, а вследствие этого и концентрации в растворе. Поэтому при дальнейшей сушке наблюдается процесс кристаллизации мелкокристаллического, так называемого "аморфного" сахара. Кристаллизация "аморфного" сахара приводит к перекрытию мелких пор и перемещение влаги в зону испарения в связи с увеличением гидравлического сопротивления затрудняется. При этом скорость сушки резко уменьшается. Затем на кривых $du/dt = f(t)$ наблюдается увеличение скорости сушки. Обясняется это тем, что перекрытие порового пространства за счет кристаллизации сахара и его интенсивный прогрев за счет применения ИК излучений приводит к обильному испарению влаги. Последнее создает избыточное давление пара внутри образцов. Под действием градиента избыточного давления происходит растрескивание скелета сахара-рафинада и влага в виде пара перемещается наружу. На своем пути она захватывает влагу, находящуюся в жидком состоянии и выносит ее на поверхность, где она образует капли при жестких режимах сушки.

Развитие температурных кривых при ИК сушке сахара-рафинада идет очень интенсивно. Скорость прогрева в начальный период в зависимости от величин E и U_0 составляет 50-80 К/мин. При дальнейшей сушке большая часть подводимой энергии идет на фазовые превращения влаги и скорость прогрева заметно уменьшается.

Интересно отметить, что градиент температур достигает максимальных значений в первом периоде сушки, когда влажность еще высока и к концу сушки уменьшается, в то время как для большинства материалов с уменьшением влагосодержания значения dt/dx возрастают. Обясняется это кристаллизацией сахара из раствора и улучшением тепловых контактов между отдельными кристаллами, что приводит к увеличению коэффициента температуропроводности.

В результате проведенных исследований кинетики сушки сахара-рафинада Дорожный установлено, что допустимая величина суммарной облученности с двух сторон составляет 5000-7000 Вт/м². Продолжи-

тельность процесса сушки при этом составила 5-8 мин, что примерно в 5-8 раз меньше по сравнению с самими интенсивными методами сушки в производственных условиях. При этом качество продукта удовлетворяет требованиям ГОСТ.

Очень важное значение в настоящее время имеет производство колбасных изделий без оболочки.

Заключительным этапом в их производстве является обжарка. В настоящее время этот технологический процесс осуществляется в дымо-воздушной среде при $T_b = 373-378$ К. Основным назначением процесса является доведение продукта до готовности и образование специфической поверхностной корочки, сообщаемой продукту приятный вид и вкус и сокращающий потери массы.

На основании технологических и экономических соображений, а также с целью интенсификации процесса нами было предложено использовать для этих целей ИК излучение. В отличие от процессов сушки, здесь необходимо добиться поверхностной обработки продукта и минимальных потерь массы. Исходя из согласования спектральных характеристик ИК генераторов и терморadiационных свойств скоагулированных мясных фаршей, наиболее подходящими для этих целей являются "темные" излучатели с $\lambda_{max} = 3,0-4,0$ мкм. В качестве таковых использованы ТЭН-ы Фастовского завода электротермического оборудования.

Исследование режимов обжарки скоагулированных мясных фаршей проводилось на специальной лабораторной установке. В качестве объектов исследования выбраны сосиски и колбасы без оболочки. Образцы сосисок и колбас изготавливались на электрокоагуляторе экспериментальной линии Украинимп. Скоагулированный мясной фарш в виде батончиков диаметрами 0,22 и 0,052 м, длиной 0,12 и 0,1 м, соответственно для сосисок и колбас, подавался в установку.

Исследования процессов обжарки мясных изделий показали, что развитие температурных полей идет очень интенсивно и, за исклю-

чением периода прогрева, прямопропорционально величине E . Существенное значение при выборе оптимальных режимов обжарки мясных изделий имеет величина и характер убыли массы. Кинетика убыли массы зависит от режима обжарки, температуры коагуляции t_k , величины и продолжительности обжарки.

Зависимость продолжительности процесса обжарки от величины облученности имеет параболический характер и приближенно может быть описана следующим выражением:

$$t_{\text{обж}} = 2,3 \cdot 10^{-5} E^2 - 0,22 E + 720, \text{ с.} \quad (5)$$

Расчет потерь массы в зависимости от значений E при доведении продукта до готовности может быть рассчитан по уравнению

$$\Delta m = \frac{m}{100} (A + B(2,3 \cdot 10^{-5} E^2 - 0,22 E + 720)), \text{ кг} \quad (6)$$

Численные значения коэффициентов A и B в зависимости от значений E и t_k рассчитаны на ЭЕМ и представлены в работе.

Расчет потери массы по этому уравнению дает хорошее совпадение с экспериментальными данными.

Для определения готовности продукта необходимо знать температуру в центральном слое изделия или на его поверхности. Обработка экспериментальных данных позволяет предложить следующую зависимость:

$$t_n = t_k + \alpha t_k^2 + e^{ct}, \quad (7)$$

Коэффициенты α, β, c и разность $t_n - t_k$ в зависимости от режимов обжарки рассчитаны на машине "Мир-2" и приведены в работе.

Таким образом, исходя из многочисленных исследований установлено, что обжарку скоагулированного мясного фарша необходимо осуществлять при значениях $E = 2000-3000 \text{ Вт/м}^2$. Продолжительность обжарки при этих условиях составляет 7-8 мин., что примерно в 2 раза меньше по сравнению с конвективным методом подвода тепла. Полученный при этих условиях продукт полностью отвечает требованиям к качественным показателям.

6. ОСНОВЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ ВНУТРЕННЕГО ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА И ОБОБЩЕНИЕ КИНЕТИКИ СУШКИ

Аналитическое и экспериментальное решение задач внутреннего тепломассопереноса в процессах сушки обладают рядом существенных недостатков и не могут быть эффективно использованы в настоящее время. Об"единение достоинств обоих методов, осуществляемое теорией подобия, дает возможность успешно изучать различные физические явления. Как показано в работах, проведенных в ИМ АН УССР, наиболее удобным при изучении теплопроводности оказалось моделирование тепловых явлений с помощью электрических. Сущность метода электротепловой аналогии (ЭТА) заключается в замене температурного поля, полем электрического потенциала. При использовании метода ЭТА по существу эксперимент продолжается над другим физическим процессом, резко отличающимся по своей природе от изучаемого, но допускающим более удобное его воспроизведение и измерение. Этот новый метод позволяет исследователю более глубоко и более простыми средствами изучать явления тепломассопереноса в процессах сушки.

Исследование задач нестационарной теплопроводности нами осуществлено с помощью электроинтегратора нестационарных процессов ЭИНП, разработанного ИМ АН УССР.

Для решения многих практических задач тепловой обработки необходимо знать развитие нестационарных полей температуры. В качестве примера в работе рассматривается задача нахождения температурных полей при выпечке хлеба.

Нахождение температурных полей в процессе тепловой обработки пищевых продуктов с помощью метода ЭТА дает надежные данные при наличии достоверных сведений по характеру изменений коэффициентов λ . Однако, как указывалось ранее, таких сведений в настоящее время крайне недостаточно. В связи с этим, большие перспективы, на наш взгляд, имеет применение метода ЭТА для нахождения числен-

ных значений эффективных коэффициентов теплопроводности $\lambda_{эф}$. Решение этих задач основано на использовании данных по экпериментальным температурным полям.

Разработанная методика расчета изменения послойных коэффициентов $\lambda_{эф}$ основана на использовании RC - цепочек и подробно изложена в работе. Исследования зависимости $\lambda_{эф} = f(x, \tau)$ осуществлялось для процесса выпечки хлеба, сушки одобрных сухарей, крахмала и др. Как показали результаты проведенных исследований коэффициенты $\lambda_{эф}$ имеют сложный характер и сильно изменяются в процессе тепловой обработки.

В качестве примера рассмотрим изменение значений $\lambda_{эф}$ при сушке сухарей. При терморрадиационной сушке сухарей наблюдается увеличение $\lambda_{эф}$ в поверхностных и центральных слоях только в начальный период. Увеличение коэффициентов $\lambda_{эф}$ в глубинных слоях связано с термодиффузионным переносом влаги. Явление термодиффузии наблюдается незначительное время и уже после 3 мин. значения $\lambda_{эф}$ в центральных слоях начинают резко уменьшаться. Объясняется это интенсивным прогревом к этому времени всех слоев сухарей и уменьшением перепада температуры $t_n - t_n$. Так, в данном опыте разность к концу 1 мин. составила 25, а в конце 3 мин. - 8 К.

Наблюдаемый минимум на кривых $\lambda_{эф} = f(x, \tau)$ на глубине 0,003-0,005 м связан с тем, что из данной глубины влага переносится в два противоположные направления. В более глубоких слоях преобладает термодиффузионный перенос влаги, а в поверхностных - конденсационный. Отсос влаги из этой зоны и приводит к появлению минимума на этих кривых. При дальнейшей сушке действие термодиффузионного переноса влаги прекращается и она движется в направлении к поверхностным слоям.

Интенсивный прогрев поверхностных слоев и интенсивное испарение влаги в них приводят к созданию значительного градиента влагосодержания. Это способствует интенсивной миграции влаги в поверх-

ностные слои и возрастанию значений $\lambda_{эф}$ в них. Так, к концу 2 мин. значения $\lambda_{эф}$ на глубине 0,002 м увеличиваются примерно в 2 раза по сравнению с первоначальным значением. К концу процесса сушки, когда в сухарях остается прочно связанная влага, величины $\lambda_{эф}$ по всей толщине принимают примерно одинаковые значения.

Характер изменения $\lambda_{эф} = f(x, \tau)$ в процессе сушки картофельного крахмала при одностороннем нагреве также является очень сложным и существенно отличается от таковых в процессе сушки одобрных сухарей и выпечки хлеба. Анализ температурных полей и полей влагосодержания показал, что в процессах тепловой обработки влажных продуктов преобладающая роль в переносе тепла принадлежит массопереносу. Даже при небольших значениях U массоперенос существенным образом сказывается на значениях $\lambda_{эф}$.

Достоверность полученных данных по нахождению значений $\lambda_{эф}$ проверялась решением прямой задачи (нахождение температурных полей по известным значениям $\lambda_{эф}$). Численные значения температур, полученных таким образом, с точностью $\pm 2-3\%$ совпадали с значениями, полученными экспериментальным путем. Хорошее совпадение опытных данных, полученных при электромоделировании и в натурном эксперименте, говорит о том, что разработанная методика является надежной и найдет применение при решении задач нестационарной теплопроводности.

Решение многих инженерных задач, а также аналитическое описание теплообмена в пищевых продуктах требует знания поглощаемого теплового потока $q_n = f(\tau)$. Аналитический расчет $q_n = f(\tau)$ вызывает большие трудности и для большинства реальных случаев не представляется возможным. Поэтому для этих целей может быть использована методика А.В.Дыкова, которая в качестве основной определяющей величины использует критерий Ребиндера Rb . При использовании этой методики необходимо знать среднееобъемную температуру $\bar{t}$, которая рассчитывается из допущения параболического

закона распределения температуры.

Как видно, приведенная методика расчета q_n является достаточно трудоемкой и требует знания ТХ влажных продуктов и их характер изменения в процессе сушки. Аналогичные сведения могут быть получены с помощью довольно простого и надежного в практическом осуществлении метода ЭТА. Для расчета $q_n = f(\tau)$ по этой методике необходимо знать $\lambda_{эф} = f(\tau)$. Кроме того, эта методика дает возможность рассчитать плотности тепловых потоков, идущих на нагрев материала q_n и фазовые превращения q_{ϕ} . Получение по этой методике зависимости $q_n = f(\tau)$ в процессе сушки показывают, что максимальные значения q_n приходятся на период прогрева продуктов. Это объясняется тем, что влажные материалы обладают большой поглощающей способностью ИК лучей и сравнительно низкой температурой поверхности. В период постоянной скорости сушки значения функции $q_n = f(\tau)$ остаются примерно постоянными, в период убывающей скорости сушки величина q_n уменьшается, что необходимо связывать с увеличением отражательной способности высохших поверхностных слоев продукта и увеличением их температуры.

Ход кривых $q_{\phi} = f(\tau)$ показывает, что в начале процесса сушки на испарение тратится незначительная часть тепла. В периоде постоянной скорости величины q_{ϕ} остаются примерно постоянными, причем доля тепла, расходуемая на испарение влаги, составляет значительную часть и с увеличением облученности уменьшается. Так, при увеличении E от 5000 до 6800 Вт/м² в процессе сушки сухарей отношение q_{ϕ}/q_n уменьшается от 8,3 до 4,8. Это говорит о том, что при высокоинтенсивных методах подвода тепла меньшая его часть используется на фазовые превращения.

Исследование зависимости $q_n = f(u)$ показало, что с увеличением u доля тепла, идущая на нагрев материала мало изменяется с изменением u_0 в то время, как $q_{\phi} = f(\tau)$ существенно зависит от значений u_0 . Например в процессе сушки крахмала при

$E = 3100 \text{ Вт/м}^2$ при изменении U_0 от 12,5 до 50% значения q_p изменяется от 400 до 900 Вт/м^2 , т.е. более чем в два раза.

Знание величины q_n и значений E дает возможность рассчитать интегральные коэффициенты поглощения A или отражения R . Проведенные расчеты показали, что в начале процесса сушки крахмала значения R несколько уменьшаются, а затем увеличиваются и в периоде постоянной скорости остаются примерно постоянными.

Сравнение данных, полученных по методике А.В.Лыкова и методу ЭТА дает хорошее совпадение результатов, не превышающих 3-5% при сушке одобрных сухарей, и 1-2% - при сушке крахмала. Учитывая то, что метод ЭТА дает возможность раздельно определять значения q_n и q_p , а также потери тепла в окружающую среду, коэффициенты α_k и R , предпочтение необходимо отдать методу электротепловой аналогии.

Изучение кинетики сушки при различных параметрах для установления оптимальных режимов требует проведения большого количества трудоемких опытов. С целью сокращения количества этих опытов, наиболее целесообразно осуществить обобщение кинетики сушки. Большие работы в этом направлении проведены В.В.Красниковым.

Обработка многочисленных экспериментальных данных по ИК сушке многих пищевых продуктов показала, что обобщения В.В.Красникова пригодны и в данном случае. Кроме того, как установлено нами при ИК сушке выполняется следующее выражение

$$dq/dt = \text{const}; \quad (8)$$

где dQ - количество тепла, идущее на фазовые переходы от U_0 до U , определяемого текущим временем t и отнесенное к единичной массе.

Это обобщение хорошо выполняется для тех материалов, сушка которых протекает в основном в периоде постоянной скорости и учета энергии связи влаги с твердым скелетом не требуется. Затраты же

тепла на нагрев материала, как было показано, в периоде постоянной скорости составляют незначительную часть от затрат на фазовые превращения. Если сушка происходит в периодах постоянной и падающей скорости сушки выражение (8) дает разброс точек, достигающий 10-15%. Наилучшие результаты достигаются в том случае, если в обобщении (8) учитывается все тепло, затрачиваемое на нагрев и фазовые превращения в материале.

Обработка многочисленных экспериментальных данных позволила нам сделать вывод, что количество тепла, отнесенное к единичной массе сухого вещества, затрачиваемое в процессах сушки на нагрев материала и фазовые превращения при условии, что сушка ведется от одинаковых начальных и до одинаковых конечных состояний не зависит от режима сушки и способа подвода тепла и остается величиной постоянной, т.е.

$$dQ'_{\tau} = const \quad (9)$$

Результаты расчета по обобщению (9) дают отклонения от экспериментальных данных, не превышающих 3-5%. Таким образом, этот способ обобщения является более универсальным и пригодным для всего процесса сушки.

В связи с тем, что $dQ' = AE$ и величина A , кроме начального периода, мало изменяется в процессе сушки можно предложить следующее обобщение:

$$E\tau = const \quad (10)$$

Предложенный способ обобщения отличается от предыдущих тем, что обобщение ведется по определяющему режимному параметру ИК сушки - величине облученности, а не по следственной характеристике, которыми являются N и Q .

Обработка экспериментальных данных по кинетике сушки картофельного крахмала показала, что продолжительность сушки от одинаковых U_0 и до одинаковых U_x прямо пропорциональна толщине засыпки δ , т.е. $\tau/\delta = const$. Это дает возможность обобщать

кинетику сушки в координатах $(U, \tau/\delta)$. На основании этого и обобщения приведенного в формуле (10) можно предложить следующее обобщение:

$$E\tau/\delta = const \quad (11)$$

Данные обобщение проверялось для многих пищевых продуктов и дало хорошее совпадение результатов с экспериментальными данными.

Наиболее ценным является нахождение влагосодержания продукта при данном режиме сушки. Эти данные могут быть получены по известным кривым сушки, полученных при определенных значениях E, δ и т.д. Как показала обработка экспериментальных данных, зависимость $U = f(U_0)$ при фиксированных значениях $E\tau/\delta$ представляет собой семейство прямых линий с различными углами наклона. Искомое значение текущего влагосодержания может быть рассчитано по следующему выражению

$$\bar{U}_x = \bar{U}_0 + \frac{(U_{0x} - U_{01})(\bar{U}_x - \bar{U}_1)}{U_{0x} - U_{01}} \quad (12)$$

где U_{0x}, U_{01}, U_{02} - соответственно начальные влагосодержания искомой кривой сушки и двух известных при фиксированных значениях $E\tau/\delta$;

U_x, U_0 - соответственно текущие влагосодержания для двух известных кривых сушки при фиксированных значениях $E\tau/\delta$.

Данное обобщение проверялось для многих материалов, подвергавшихся ИК сушке (семена подсолнечника, силикагели, ткани и др.) и дало хорошие результаты.

В некоторых случаях, когда сушка материалов осуществляется при различных значениях U_0 , и сам процесс в основном протекает в периоде постоянной скорости сушки возможно, с некоторой погрешностью по одной опытной кривой, рассчитать обобщенные кривые сушки с другим значением U_0 по следующему выражению

$$U_x = \frac{U \cdot U_{0x}}{U_0} \quad (13)$$

Данное выражение проверялось для односторонних сухарей "Московские", "Туристские", "Украинские" и "Детские" и дало хороший результат.

Полученные обобщения в координатах $(U, U_0)_\tau$ и $(U, U_0)_{E\tau}$ позволяют легко рассчитать продолжительность процесса сушки τ_K от любого U_0 до любого U_K при различных режимах сушки и одинаковой толщине. Если же обобщение представлено в координатах $(U, U_0)_{E\tau/\delta}$, то вначале определяют комплекс $E\tau/\delta$ и по известным E и δ определяют продолжительность сушки. В случае, если в реальных условиях сушка протекает при величинах E_p и δ_p отличных от опытных $E_{оп}$ и $\delta_{оп}$, то продолжительность процесса сушки находят из выражения

$$\tau_p = \frac{E_{оп} \tau_{оп} \delta_p}{\delta_{оп} E_p} \quad (14)$$

Таким образом, полученные обобщения кинетики терморрадиационной сушки материалов можно широко применять как при инженерных расчетах, так и при научно-исследовательских разработках. Применение этих обобщений намного сокращает количество трудоемких и продолжительных опытов и позволяет легко переходить от одних условий сушки к другим.

7. ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ СУШКИ МАКАРОННЫХ ИЗДЕЛИЙ ПРИ КОНВЕКТИВНОМ И КОНВЕКТИВНО-ВЫСОКОЧАСТОТНОМ МЕТОДАХ ПОДВОДА ТЕПЛА

Макаронные изделия, по классификации, предложенной в гл. 2, относятся к коагуляционным сильноструктурированным системам со слабо развитой поровой структурой. Такие продукты обладают малой интенсивностью внутреннего переноса влаги и значительной интенсивностью переноса тепла.

Исследования кинетики сушки длиннотрубчатых макаронных изделий, проведенные в производственных условиях на аппаратах ВВП на Киевской макаронной фабрике показали, что применяемые в них режимы являются несовершенными и требуют детального изучения.

Поэтому более глубокие исследования кинетики сушки макаронных изделий осуществлялись в экспериментальной установке. Последняя представляла собой вариант полупроизводственной кассетной сушилки и была смонтирована на Киевской макаронной фабрике. Опыты проводились с макаронными изделиями, изготовленными непосредственно в производственных условиях. Описание установки приведено в работе.

Исследование кинетики процесса сушки макарон показало, что интенсивность влагоотдачи, а следовательно и продолжительность сушки, существенно зависят от изменения T_6 , U_6 и φ_6 . Так, при повышении значений T_6 от 308 до 333 К $dU_x/d\tau$ увеличивается примерно в 2,5 раза. Дальнейшее увеличение значений T_6 приводит к резкому уменьшению интенсивности сушки. Например, увеличение T_6 от 338 до 343 К приводит к уменьшению скорости сушки $dU_x/d\tau$ примерно в 1,5 раза. Это связано с тем, что при таких значениях T_6 температура макаронных изделий достигает критических значений $T_k = 330-333$ К, при которых происходит изменение белково-крахмального комплекса, т.е. наблюдается денатурация белков и клейстеризация крахмала. Освобожденная при денатурации белков влага интенсивно поглощается клейстеризующимися зернами крахмала, что приводит к уменьшению интенсивности сушки.

Скорость движения сушильного агента U_6 также оказывает существенное влияние на интенсивность и продолжительность сушки. Так, при $T_6 = 313$ К и $\varphi_6 = 30-40\%$ продолжительность сушки τ_k при изменении U_6 от 4 до 1,7 м/с увеличивается примерно в два раза. Интенсивность сушки существенно зависит от значений U_6 только в начале и практически не зависит в конце сушки.

Исследования кинетики сушки макаронных изделий в различных по длине сушильной камеры кассетах показали, что прогрев, а следовательно, и обезвоживание идет неравномерно. Неравномерность прогрева изделий по секциям существенным образом зависит от дли-

тельности цикла реверсии τ_p . Обясняется это следующим образом. При применении плоских кассет из-за плотной укладки вокруг макаронных изделий образуется "собственное" поле влажности, т.е. слой паровоздушной среды, параметры которого существенно отличаются от параметров сушильного агента.

Толщина "собственного" поля влажности зависит как от параметров сушильного агента, так и от плотности укладки макарон. Наличие этого поля существенно влияет как на внутренний тепло-массообмен, так и на внешний массообмен. Увеличение значений U_6 приводит к уменьшению толщины "собственного" поля влажности и увеличению интенсивности прогрева изделий и испарения влаги.

Как показали исследования, реверсия воздуха оказывает существенное влияние на прогрев макарон и интенсивность сушки только до определенного, так называемого, переходного влагосодержания $U_{пер} = 23-25\%$. При сушке макаронных изделий ниже $U_{пер}$ реверсия сушильного агента незначительно сказывается на теплообмене.

В связи с тем, что в производственных условиях параметры сушильного агента не регулируются, зависимость интенсивности сушки от значений τ_p использована для разработки рациональных режимов сушки. Как показали исследования, максимальные значения $du/d\tau$ достигаются в первом периоде для изделий 1/с при $\tau_p = 20$ мин, а в/с - при $\tau_p = 15$ мин. При всех значениях τ_p максимальные значения $du/d\tau$ наблюдаются в первом периоде и минимальные - в третьем.

На основании проведенных исследований нами предложены новые реверсивные режимы сушки макарон "Особые" для производственных условий, которые приведены в работе.

Параметры сушильного агента в цеху следующие: $T_6 = 309-313$ К, $\varphi_6 = 60-75\%$, $U_6 = 2,8-1,8$ м/с. Общая продолжительность процесса сушки макарон 1/с составляет 13-15, а в/с - 11-13 ч, что на 25-30% меньше, чем при существующих режимах сушки. Качество готовых

изделий значительно улучшается. Так, наличие трещин сокращается с 20 до 3%, а прочность изделий I/c составляет 5,6-6,3 Н, в/с - 5,2-6,2 Н, вместо стандартной 4Н.

Проверка предлагаемых режимов длиннотрубчатых макаронных изделий проведена специальной комиссией на Киевской макаронной фабрике. Эти режимы признаны наиболее оптимальными и рекомендованы к широкому внедрению.

Предложенные новые режимы сушки макарон "Особые" ввиду отсутствия регулировки параметров воздуха в производственных условиях, не позволяют полностью учитывать изменения физико-химических свойств и максимально интенсифицировать процесс. В связи с этим нами были проведены исследования применения многостадийных режимов сушки длиннотрубчатых макаронных изделий в плоских кассетах.

Исследования развития температурных полей макаронных изделий, полей температур и влажности в различных точках сушильной камеры позволили установить оптимальные для каждой стадии параметры сушильного агента.

Общая продолжительность процесса сушки макарон "Особые" I/c при предлагаемых режимах составляет 9-10 ч, а для в/с - 8-12 ч, что примерно в два раза меньше, чем в производственных условиях (18-24 ч). Готовые изделия, высушенные при этих режимах, имеют высокие качественные показатели (прочность 5,5-6,5 Н, микротрещины отсутствуют, хорошо сохраняют форму при варке и т.д.).

На предлагаемый многостадийный способ сушки длиннотрубчатых макарон получено авторское свидетельство.

Дальнейшая интенсификация технологических режимов сушки осуществлялась за счет применения токов СВЧ. Как показали исследования кинетики сушки макаронных изделий при конвективно-высокочастотном методе подвода тепла применение токов СВЧ при $U > 23\%$ нецелесообразно, так как на этом этапе сушка происходит достаточно интенсивно при конвективном методе подвода тепла и наложение энер-

гии токов СВЧ приводит к бурному испарению влаги, образованию сли-
пов, что является недопустимым. Наибольший эффект дает применение
токов СВЧ на последней стадии сушки. Продолжительность процесса
сушки сокращается на 20-30% по сравнению с конвективным способом.
При этом качество изделий значительно улучшается.

Сушка макаронных изделий в плоских кассетах наряду с сущест-
венными достоинствами обладает рядом недостатков. Поэтому нами
были изучены особенности процесса сушки длиннотрубчатых макарон-
ных изделий во вращающихся кассетах.

При разработке режимов сушки во вращающихся кассетах в осно-
ву положены разработанные многостадийные режимы для плоских кас-
сет. Однако особенности конструкции кассет и условий теплообмена
в них потребовали глубоких дополнительных исследований.

При применении вращающихся кассет вокруг макаронных труб
практически не образуются "собственное" поле влажности. Поэто-
му интенсивность влагоотдачи при применении вращающихся кассет
значительно выше, чем в плоских. Это приводит к резкому сокраще-
нию продолжительности процесса сушки. Проведенные исследования
позволили предложить новые режимы сушки макарон во вращающихся
кассетах, которые приведены в работе. Общая продолжительность про-
цесса сушки составляет 6-7 ч, что в 3-4 раза меньше, чем в произ-
водственных условиях. Значительно улучшается качество макарон.

Разработанные режимы сушки длиннотрубчатых макаронных изде-
лий рассмотрены макаронной секцией технического Совета МПП УССР,
одобрены и рекомендованы к внедрению.

8. ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

В настоящее время в промышленности нет специальных установок
для сушки сдобных сухарей. Поэтому в задачу исследования кроме
разработки оптимальных режимов сушки сухарей входила выдача техни-
ческой документации на проектирование промышленного образца термо-

радиационной сушильной установки.

Тепловой расчет сушильной установки проводился по предложенной нами методике. По представленным данным была сконструирована и изготовлена Молдхлебпромом сушильная установка большой единичной мощности. Производительность ее составляет 200 кг/ч. В качестве ИК генераторов использованы кварцевые излучатели КИ-1000. Установленная мощность излучателей 135 кВт. Установка смонтирована на Тираспольском хлебокомбинате. Экономический эффект от внедрения составил 41,6 тыс.руб. в год.

Результаты исследования кинетики сушки быстрорастворимого сахара-рафинада с помощью ИК излучения были использованы при разработке терморadiационной сушильной установки. В качестве генераторов в этой установке использованы ТЭН^ы типа ЗВУ ГИБ/ЗТ 220 мощностью 2 кВт. Максимальная с двух сторон величина облученности составляла 5000 Вт/м². По этим данным Укрсахпроект разработал рабочие чертежи терморadiационной установки большой единичной мощности для сушки сахара-рафинада Дорожный производительностью 1250 кг/ч. Общая установленная мощность - 90 кВт. Предложенная терморadiационная установка использована в поточной линии по производству сахара-рафинада в малкой расфасовке. Экономический эффект от внедрения одной установки составит 46,4 тыс. руб. в год.

Исследование терморadiационных свойств фарша колбасных изделий без оболочки, спектральных и энергетических характеристик "темных" ИК излучателей, а также исследования кинетики обжарки батончиков колбасных изделий без оболочки легли в основу теплового расчета термоагрегата. Данные этого расчета были использованы Укрнимип при конструкторских разработках и изготовлении опытно-промышленного агрегата для обжарки колбасных изделий без оболочки. Данный образец принят ведомственной комиссией МММП СССР и рекомендован к внедрению при изготовлении линии вареных колбас без оболочки, производительность ее 100 кг/ч. Экономический эффект

фект от внедрения этой линии составит 71,0 тыс. руб. в год.

Исследование кинетики сушки длиннотрубчатых макаронных изделий использованы при разработке новых реверсивных режимов для производственных условий. Эти режимы внедрены лабораторией макаронного производства ВНИИХП на Орловской и Фрунзенской макаронных фабриках. Укрмакаронпром эти режимы внедрил на Симферопольской, а в 1978 г. внедрит на Киевской макаронной фабриках. Кроме того, разработанные многостадийные режимы сушки макарон во вращающихся каскетах использованы СКБ ИТФ АН УССР при разработке нового образца сушильной установки.

Кроме непосредственного внедрения в промышленность, результаты диссертационной работы нашли применение при проведении научно-исследовательских разработок в области тепломассопереноса в других учреждениях. Так установка для исследования терморadiационных свойств материалов использована КПП им. Горького, КПИ, УкрНИИММП, Укромашпроект и др. Предложенная классификация влажных пищевых продуктов найдет широкое применение как в научно-исследовательских, так и в проектных организациях страны при проектировании сушильного оборудования.

Предложенные новые методики изучения развития температурных полей, эффективных коэффициентов теплопроводности и плотности поглощаемых потоков в процессе сушки с помощью метода ЭТА найдут применение в научно-исследовательских организациях страны.

Полученные обобщения кинетики сушки можно широко применять как при инженерных расчетах сушилок, так и при научно-исследовательских разработках.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для обобщения данных по кинетике сушки пищевых продуктов предложена классификация, позволявшая сгруппировать их по близким свойствам. Зная режимы сушки отдельных пищевых продуктов, можно

прогнозировать методы подвода тепла и режимы сушки и для других продуктов этого класса. Проведенные исследования гигроскопических, теплофизических, массопереносных и других свойств пищевых продуктов позволили установить формы связи влаги с материалами, описать механизм тепломассопереноса в них и наметить пути разработки оптимальных режимов сушки.

Исследования кинетики сушки картофельного крахмала, сладких сухарей, сахара-рафинада и обжарки колбасных изделий без оболочки при терморadiационном энергоподводе, терморadiационных свойств, спектральных и энергетических характеристик ИК генераторов позволили разработать оптимальные режимы их тепловой обработки. При этом продолжительность процесса сушки сладких сухарей сокращается примерно в 2 раза, сахара-рафинада - в 5-8 раз, колбасных изделий без оболочки - в 2 раза. Данные этих исследований использованы при разработке промышленных установок для сушки и обжарки пищевых продуктов с помощью ИК излучения. Применение этих установок в промышленности дает значительный экономический эффект.

Использование метода электротепловой аналогии для исследования задач тепломассопереноса в процессах сушки позволило получить надежные сведения о развитии температурных полей, эффективных коэффициентах теплопроводности и поглощаемых тепловых потоках. Такие исследования проведены впервые и являются новым направлением в области исследования тепломассопереноса.

Проведенные обобщения кинетики терморadiационной сушки многих материалов по режимным параметрам позволяют использовать их как непосредственно при расчетах сушильных установок, так и при проведении научных разработок.

Исследование физико-химических свойств макаронного теста и кинетики сушки длиннотрубчатых макаронных изделий при конвективном и конвективно-высокочастотном методах подвода тепла позволили предложить новые реверсивные режимы сушки для производственных

условий в плоских кассетах и многостадийные режимы сушки как в плоских, так и во вращающихся кассетах. Применение этих режимов значительно сокращает продолжительность процесса сушки и улучшает качество готовых изделий. Так, при многостадийных режимах сушки во вращающихся кассетах продолжительность процесса составляет 6-8 ч, что примерно в 3-4 раза меньше чем в производственных условиях.

Разработанные режимы сушки макарон для производственных условий внедрены на Орловской, Фрунзенской и Симферопольской макаронных фабриках, а многостадийные режимы сушки во вращающихся кассетах будут внедрены на Киевской макаронной фабрике.

Таким образом, приведенные результаты комплексного исследования выбора рациональных режимов сушки и расчета сушильных установок можно рассматривать как решение крупной научной проблемы в области технологии и техники сушки пищевых продуктов при новых физических методах энергоподвода, имеющей важное народнохозяйственное значение.

Основное содержание работы опубликовано в следующих работах:

1. Душенко В.П., Буляндра А.Ф., Кучерук И.М. Некоторые вопросы аналитического и экспериментального исследования процесса сушки инфракрасными лучами. В кн.: Новые физические методы обработки пищевых продуктов. М., 1967, с.3-5.

2. Буляндра А.Ф., Душенко В.П. О сушке крахмала инфракрасными лучами. В кн.: Массообменные процессы химической технологии. Л., Химия, 1967, с.91-93.

3. Буляндра А.Ф., Душенко В.П., Кучерук И.М. Оптические характеристики некоторых пищевых продуктов. Изв. высших учебных заведений. Пищевая технология, 1967, №4, с.152-155.

— 4. Душенко В.П., Буляндра А.Ф., Кучерук И.М. Исследование спектральных и энергетических характеристик некоторых "темных" инфракрасных излучателей. В кн.: Электротермия. М., 1968, вып.67,

5. Дущенко В.П., Буляндра А.Ф., Кучерук И.М. Исследования терморadiационной сушки коллоидных тел. В кн. Теплообмен, Киев, Наукова думка, 1968, с.96-101.

6. Комплексное исследование терморadiационной сушки капиллярно-пористых тел. /Дущенко В.П., Кучерук И.М., Буляндра А.Ф. и др. - В кн.: Тепло- и массообмен, Киев, Наукова думка, 1968, т.6, ч.П, с.14-26.

7. Методика приближенного теплового расчета терморadiационных сушильных установок пищевой промышленности /Буляндра А.Ф., Дущенко В.П., Кучерук И.М. и др. - В кн. Тез. докладов Всесоюзной межвузовской научной конференции по новым физическим методам обработки пищевых продуктов. Воронеж, 1968, с.31-32.

8. Аналитическое исследование внутреннего массо- и теплообмена в дисперсных пищевых продуктах при их сушке ИК излучением и электроосмотическом обезвоживании/Дущенко В.П., Луцки П.П., Буляндра А.Ф. и др. В кн. Тез. докладов Всесоюзной межвузовской научной конференции по новым физическим методам обработки пищевых продуктов. Воронеж, 1968, с.53.

— 9. Буляндра А.Ф., Дущенко В.П., Кучерук И.М. Исследование условий создания равномерности полей облученности систем "светлых" инфракрасных излучателей. В кн.: Пищевая пром-сть. Киев, Техніка, 1968, №10, с.110 - 114.

10. Буляндра О.Ф., Таранов І.Т., Курганська А.І. Вплив реверсії на процес сушіння довготрубчастих макаронних виробів. В кн.: Харчова промисловість, Київ, Техніка, 1969, №5, с.36-39.

11. Исследование кинетики процесса сушки капиллярно-пористых материалов инфракрасным излучением/ Буляндра А.Ф., Дущенко В.П., Кучерук И.М. и др. - В кн.: Теплофизика и теплотехника, Киев, Наукова думка, 1970, вып.16, с.38-43.

12. Дущенко В.П., Кучерук И.М., Буляндра А.Ф. Исследование спектральных характеристик некоторых капиллярно-пористых тел в ИК

области длин волн 1-5 мкм. В кн. Тепло- и массоперенос в твердых телах, жидкостях и газах. Минск, Изд. ИТМО АН БССР, 1970, с.115-125.

13. Буляндра А.Ф., Душенко В.П., Тарапон В.А. Кинетика температурного поля в тесте-хлебе в процессе выпечки. - Изв.высших учебных заведений. Пищевая технология, 1971, №4, с.90-94.

14. Буляндра О.Ф., Душенко В.П., Кучерук І.М. Про тепловий розрахунок терморадіаційних сушильних установок харчової промисловості. В кн.: Харчова пром-сть, Київ, Техніка, 1971, №13, с.24-29.

15. Кінетика терморадіаційного сушіння здобних сухарів /Душенко В.П., Буляндра О.Ф., Вербицкий Б.И., Сиднев П.П. - В кн.: Харчова пром-сть, Київ, Техніка, 1971, №5, с.30-32.

16. Буляндра О.Ф., Душенко В.П., Кучерук І.М. Приклад теплового розрахунку терморадіаційних сушильних установок харчової промисловості. В кн.: Харчова пром-сть, Київ, Техніка, 1972, №14, с.91-97.

17. Використання методу електроаналогії для дослідження кінетики коефіцієнта теплопровідності тіста-хліба в процесі випікання/ Буляндра О.Ф., Душенко В.П., Тарапон В.А. і ін. - В кн.: Харчова пром-сть, Київ, Техніка, 1972, №15, с.3-7.

18. Душенко В.П., Тарапон В.А., Буляндра А.Ф. Методика дослідження коефіцієнтів теплопровідності теста-хліба в процесі випечки. - В кн.: Математическое моделирование потенциальных полей. Киев, Наукова Думка, 1972, с.211-214.

19. Тарапов И.Т., Буляндра А.Ф., Володарский А.В. Влияние параметров воздуха на процесс конвективной сушки длиннотрубчатых макаронных изделий в плоских кассетах. В кн.: ЦНИИТпищепром, М., 1973, №6, с.12-16.

20. Буляндра А.Ф., Душенко В.П., Вербицкий Б.И. Об обобщении кинетики терморадіаційної сушки здобних сухарей. Изв.высших учебных заведений. Пищевая технология, 1973, №2, с.138-140.

21. Спектральные и энергетические характеристики некоторых

"темных" инфракрасных излучателей /Буляндра А.Ф., Бабанов Г.К., Дорошук В.П., Вербицкий Б.И. - Мясная индустрия, 1973, №8, с.31-33.

22. Душенко В.П., Буляндра А.Ф., Вербицкий Б.И. О расчете теплового потока, поглощаемого коллоидными капиллярно-пористыми телами в процессе терморадіаційної сушки. Инж.физ.журн., 1973, т.25, №3, с.415-418.

23. Энергетичні характеристики "темних" випромінювачів /Бабанов Г.К., Буляндра О.Ф., Дорошук В.П., Вербицкий Б.И. - В кн.: Харчова пром-сть, Київ, Техніка, 1973, №17, с.24-30.

24. О кинетике поглощаемого теплового потока при терморадіаційної сушки сухарей /Буляндра А.Ф., Душенко В.П., Вербицкий Б.И., Сиднев П.П. - Изв. высших учебных заведений. Пищевая технология, 1973, №5, с.113-116.

25. Буляндра А.Ф., Тарапон В.А., Душенко В.П. К определению тепловых потоков в процессе выпечки хлеба. В кн.: Моделирование задач теплофизики, Киев, изд. ИМ АН УССР, 1973, с.108-110.

26. Исследование кинетики поглощаемого продуктами теплового потока в процессе терморадіаційної сушки /Тарапон В.А., Вербицкий Б.И., Душенко В.П., Буляндра А.Ф. - В кн.: Применение инфракрасной техники в пищевых отраслях промышленности. М., 1973, с.18.

27. Исследование полей влагосодержания и температуры влажных пищевых продуктов в процессе терморадіаційної сушки /Бережной П.В., Тарапон В.А., Вербицкий Б.И., Буляндра А.Ф. и др. - В кн.: Применение инфракрасной техники в пищевых отраслях промышленности. М., 1973, с.61-62.

28. Буляндра А.Ф., Вербицкий Б.И., Душенко В.П. О методе обобщения кинетики терморадіаційної сушки. В кн.: Тепло- и массоперенос. Минск, Изд. ИТМО АН БССР, 1974, т.10, ч.П, с.369-372.

29. Тарапов И.Т., Буляндра А.В., Володарский А.В. Про конвективне сушіння довготрубчатих макаронних виробів у плоских касетах. В кн.: Харчова пром-сть, Київ, Техніка, 1974, №3, с.33-36.

30. Буляндра А.Ф., Дуценко В.П., Таралон В.А. Применение метода электротепловой аналогии для определения кинетики теплопередачи при инфракрасной сушке крахмала. В кн.: Реферативная информация о законченных научно-исследовательских работах в вузах УССР. Пищевая промышленность, Киев, Вища школа, 1974, вып.8, с.20.

31. Установка для измерения терморadiационных характеристик пищевых продуктов /Буляндра А.Ф., Вербицкий Б.И., Дуценко В.П., Столяров В.М. и др. - Изв. высших учебных заведений. Пищевая технология, 1974, №5, с.140-143.

32. О кинетике коэффициентов теплопроводности и теплового потока при инфракрасной сушке сухарей /Дуценко В.П., Буляндра А.Ф., Таралон В.А., Вербицкий Б.И. и др. - Изв. высших учебных заведений. Пищевая технология, 1974, №6, с.121-124.

33. Об использовании метода электротепловой аналогии для расчета результирующих тепловых потоков, поглощаемых коллоидными капиллярно-пористыми телами в процессе сушки. Инж.физ. журн., 1975, т.28, №6, с.1040-1044. /Буляндра А.Ф., Дуценко В.П., Таралон В.А., Луцки Ю.П.

34. Исследование полей влагосодержания и температуры при терморadiационной сушке одобрных сухарей /Буляндра А.Ф., Бережной П.В., Дуценко В.П., Вербицкий Б.И. - Изв. высших учебных заведений. Пищевая технология, 1976, №1, с.95-97.

35. Буляндра А.Ф., Таранов И.Т. Способ сушки длиннотрубчатых макарон типа "Особые". Авторское свид. №78106. М., 1975, №27.

36. Буляндра А.Ф., Таранов И.Т. Про міграцію вологи в макаронах при сушінні. В кн.: Харчова пром-сть, Київ, Техніка, 1976, №3, с.34-36.

37. Исследование зависимости удельной теплоемкости одобрных сухарей от температуры /Буляндра А.Ф., Кучерук И.М., Вербицкий Б.И., Грицаенко Э.В. - В кн. Пищевая пром-сть, Киев, Техніка, 1976, №22, с.21-23.

38. Таранов И.Т., Курганская А.И., Буляндра А.Ф. Про застосування тристадійних режимів для сушіння макаронів у плоских касетах. В кн.: Харчова пром-сть, Киев, Техніка, 1972, №6, с.37-39.

39. Буляндра А.Ф., Луцки Ю.П., Вербицкий Б.И. Сушка прессованного сахара-рафинада с помощью инфракрасного излучения. В кн.: Новое в сушильной и выпарной технике сахарного производства, Киев, 1976, с.17-18.

40. Исследование зависимости коэффициента диффузии влаги некоторых пищевых продуктов от влагосодержания /Луцки Ю.П., Вербицкий Б.И., Буляндра А.Ф., Таралон В.А. и др. В кн.: Реферативная информация о законченных научно-исследовательских работах в вузах УССР. Пищевая пром-сть. Киев, Вища школа, 1977, вып.12, с.31.

41. Буляндра А.Ф. Интенсификация процессов сушки некоторых пищевых продуктов. В кн.: Интенсификация процессов сушки и использования для этих целей новой техники, Калинин, 1977, с.156-159.

42. Буляндра А.Ф., Таралон В.А. Об обобщении в области кинетики сушки и комплексном исследовании терморadiационной сушки некоторых коллоидных капиллярно-пористых пищевых продуктов. В кн.: Электрофизические методы обработки пищевых продуктов. Воронеж, 1977, с.94-95.

43. О выборе оптимальных режимов терморadiационной сушки дорожного сахара-рафинада /Буляндра А.Ф., Луцки Ю.П., Вербицкий Б.И., Дорожук В.П. В кн.: Электрофизические методы обработки пищевых продуктов. Воронеж, 1977, с.99-100.

44. Таралон В.А., Буляндра А.Ф., Дуценко В.П. Применение метода электротепловой аналогии для изучения нестационарной теплопроводности при гигротермической обработке пищевых продуктов. В кн. Теплопроводность и диффузия в технологических процессах. Рига, 1977, с.314-320.

45. Буляндра А.Ф., Таранов И.Т., Острик А.С. Сушка мучных

изданий. Киев, Техніка, 1977, 160 с.

46. Тарапон В.А., Буляндра А.Ф., Тарапон А.Г. Об обобщении кинетики терморадикационной сушки. В кн.: Моделирование нестационарных процессов, Киев, изд. ИМ АН УССР, 1977, с.61-70.

47. Тарапон В.А., Буляндра А.Ф. Некоторые вопросы обобщения кинетики терморадикационной сушки материалов. - В кн.: Реферативная информация о научно-исследовательских работах в вузах УССР. Пищевая пром-сть. Киев, Вища школа, 1978, вып. 14, с. 56 - 57.



БМ 26066. Подписано в печать 18.10.78 г. Формат 60х84/16.

Бумага № 1. Печатных листов 2. Заказ 1945-2. Тираж 150.

Тип. РИО КИИГА. 252058, Киев-58, пр. Космонавта Комарова, 1.