

Автор ер.
Г 83 Г 85

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

ОДЕССКИЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
имени М. В. ЛОМОНОСОВА

НА ПРАВАХ РУКОПИСИ

ГРИШИН
МИХАИЛ АЛЕКСАНДРОВИЧ

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА СУШКИ ПИЩЕВЫХ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

(Специальность 05.18.13.—Технология консервирования
пищевых продуктов)

АВТОРЕФЕРАТ
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
ДОКТОРА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

ОДЕССА — 1974

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ УССР

Одесский технологический институт пищевой промышленности
имени М.В.Ломоносова

ОНАХТ 15.07.11
Интенсификация проце



v012302

ГРИШИН Михаил Александрович

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА СУШКИ ПИЩЕВЫХ РАСТИТЕЛЬНЫХ
МАТЕРИАЛОВ

(Специальность 05.18.13 - Технология консервирования
пищевых продуктов)

Переучет 19, 87

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени доктора
технических наук

с. в. 12302

БИБЛИОТЕКА

Одесса - 1974

v 012302

Работа выполнена на кафедре технологии сушки Одесского технологического института пищевой промышленности имени М.В.Ломоносова.

Официальные оппоненты :

доктор технических наук, профессор	Э.И.ГУЙГО
доктор технических наук, профессор	Б.И.ЛЕОНЧИК
доктор технических наук, профессор	А.Ф.ФАН-ЮНГ

Ведущая организация -- Ордена Трудового Красного Знамени институт тепло- и массообмена Академии наук Белорусской ССР.

Автореферат разослан " 15 " февраля 1974 г.

Защита диссертации состоится ' 12 апреля 1974 г. в 10 часов на заседании Совета Одесского технологического института пищевой промышленности имени М.В.Ломоносова, ауд. 272.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу : г.Одесса, ГСП-510, ул.Свердлова 112.

ученный секретарь Совета
кандидат технических наук

Л.А.ЗАПОРОЖЕЦ

БР 00338 13.02.74 г. Формат 60 x 84 1/16
Объем 3 п.л. Заказ № 573 Тираж 250 экз.
Городская типография управления по делам издательств, полиграфии и книжной торговли Одесского облисполкома.

г. Одесса, Ленина, 49

В условиях развитого социализма, когда создается материально-техническая база коммунизма, всесторонняя интенсификация общественного производства и повышение его эффективности является основой экономического развития нашей страны. Бурное развитие научно-технической революции создало условия внедрения совершенной техники и технологии в производство продуктов питания.

Сушка пищевых продуктов относится к старейшему способу консервирования. Высокое содержание влаги в картофеле, овощах и плодах является причиной нестойкости их при хранении, вследствие бактериальной, ферментативной и химической порчи. Сушеные продукты содержат питательные вещества в наиболее концентрированном виде по сравнению с продуктами других способов консервирования и не требуют особых условий при хранении.

В овощесушильном и пищеконцентратном производстве сушка является ответственным и решающим этапом технологического процесса, определяющим качество готового продукта. Это сложный нестационарный процесс переноса тепла и влаги.

Современные теории сушки, тепло- и массообмена, учение о формах связи влаги с материалом разработаны советскими учеными А.В. Лыковым, Г.К. Филоненко, П.Д. Лебедевым, С.М. Липатовым, П.А. Ребиндером, А.А. Лухманом, А.С. Гинзбургом, П.Г. Романковым, В.В. Красниковым, Ю.А. Михайловым, Б.М. Смольским, И.М. Федоровым, О.А. Кремневым, Э.И. Луиго, Ю.Л. Кавказовым, Б.И. Леончиком и другими. Благодаря работе советских ученых наша страна заняла ведущую роль в развитии теории сушки.

Улучшение качества сушеных пищевых растительных продуктов связано с сокращением продолжительности сушки, т.е. длительности теплового воздействия на продукт и зависит от равномерности нагрева материала и максимального снижения влажности в процессе сушки. Глубокая сушка картофеля, овощей и круп обусловлена тем, что при

остаточной влажности ниже 8 % сроки хранения сушеного продукта приблизительно удваиваются с уменьшением содержания влаги в них на каждые два процента.

Для производства сушеных картофеля, овощей, плодов и круп низкой влажности и высокой питательной ценности при минимальных затратах тепла и энергии разрабатывают высокоинтенсивные методы и режимы сушки. Наиболее эффективным методом является сушка в развитой стадии кипящего слоя. При этом частицы материала находятся в состоянии непрерывного движения и перемешивания, что обеспечивает наибольшую поверхность соприкосновения высушиваемого материала с нагретым воздухом, равномерный нагрев материала, срыв пограничного слоя испаряющейся влаги. Это позволяет применять повышенные температуры нагретого воздуха по сравнению с сушкой в неподвижном слое, сохраняет высокое качество готового продукта, способствует более рациональному использованию тепла, значительному сокращению продолжительности сушки. Под термином "развитая стадия" кипящего слоя подразумевается активное перемешивание материала, осуществляемое в каналах постоянного сечения, когда высота слоя движущихся частиц вдвое превышает начальную высоту неподвижного слоя, а также в фонтанирующем слое в каналах переменного сечения с постепенным расширением по ходу движения нагретого воздуха.

В исследования процессов гидродинамики, тепло- и массообмена и сушки в кипящем слое значительный вклад внесли советские ученые А.В.Лыков, П.Г.Романков, С.С.Загородский, Н.И.Сыромятников, И.М.Федоров, А.С.Гинзбург, Н.Б.Рашковская, М.Э.Аэров, О.М.Тодес, М.В.Лыков, З.Р.Горрис, В.И.Жидко, И.Ф.Пикус, Н.И.Гельперин, В.Г.Айнштейн, Н.А.Шахова, В.С.Сажин, А.П.Баскаков, И.М.Разумов, В.А.Резчиков и другие, а также ряд зарубежных исследователей М.Лева, П.Ребу, Д.Отмер, Я.Циборовский, Я.Беранек, Д.Сокол.

Следует отметить, что сушку картофеля и овощей в кипящем слое впервые исследовали на кафедре технологии сушки Удесского технологического института пищевой и холодильной промышленности в 1955 - 1960 гг. Это исследование провел автор настоящей работы под руководством основателя кафедры технологии сушки Г.К.Филоненко.

В литературе отсутствуют работы, систематизирующие и обобщающие процесс сушки картофеля, овощей, плодов и круп пищевого концентратного производства, имеются только отрывочные сведения о сушке отдельных видов этих материалов.

До настоящего времени недостаточно изучены растительные пищевые материалы как объекты сушки, отсутствуют или имеются малочисленные сведения о влиянии механической и тепловой обработки сырья на структуру ткани и характер связи влаги с материалом, в частности, противоречивы сведения о влиянии бланширования на скорость сушки.

В литературе нет подробных данных по теплофизическим характеристикам и термодинамическим параметрам влагопереноса для круп пищевого концентратного производства, имеющиеся сведения об этих параметрах для отдельных видов плодов и овощей, как правило, не учитывают особенности структуры материала, влияния механической и тепловой обработки, параметров сушильного агента и способов сушки, зависимости теплофизических характеристик от влажности и температуры материала.

Отсутствие необходимых данных о закономерностях гидродинамики взвешенного слоя крупнозернистого материала частиц различных форм, размеров и влагосодержания, а также комплексных сведений и математического описания процесса кинетики интенсивной сушки картофеля, овощей, плодов и круп при высоких температурах воздуха не позволяет рационально проектировать современные сушильные установки и внедрять их в промышленность.

Настоящая работа посвящена решению проблемы интенсификации сушки картофеля, овощей, плодов и круп.

Проведены комплексные исследования :

- а) влияния структуры и химико-технологических свойств влагопереноса на теплофизические характеристики и термодинамические параметры указанных материалов как объектов сушки ;
- б) гидродинамики взвешенного слоя крупнозернистых материалов различных форм, размеров и влагосодержания ;
- в) закономерностей тепло- и массообмена , кинетики и динамики сушки пищевых растительных материалов в развитой стадии кипящего слоя в зависимости от температуры , влажности, скорости сушильного агента, удельной нагрузки материала , формы и размера частиц;
- г) изменений химико-технологических показателей материалов в процессе сушки;
- д) применения предварительного подсушивания овощей в развитой стадии кипящего слоя при выработке овощных вакуумных консервов.

В данной диссертации обобщены результаты исследований автора с 1961 по 1973 гг. , также работ , проведенных при его участии и руководстве на кафедре технологии сушки Одесского технологического института пищевой промышленности имени М.В.Ломоносова.

Диссертация состоит из введения , пяти глав , общих выводов и рекомендаций , приложения .

В первой главе рассматриваются растительные пищевые материалы как объекты сушки : структура и химико-технологические свойства исследуемых видов материалов, результаты исследований по изменению структуры материалов при подготовке их к сушке по определению теплофизических характеристик , равновесного влагосодержания и термодинамических параметров влагопереноса всех объектов сушки.

Во второй главе приводятся результаты исследования гидродинамики взвешенного (кипящего и фонтанирующего) слоя крупнозерни-

тых частиц пищевых растительных материалов.

Третья глава посвящена исследованию тепло- и массообмена в процессе сушки растительных пищевых материалов, расчетам продолжительности сушки и температуры растительных пищевых материалов в процессе сушки в кипящем слое.

В четвертой главе описаны исследования кинетики и технологии сушки различных растительных пищевых материалов в развитой стадии кипящего слоя.

Пятая глава посвящена применению процесса сушки во взвешенном слое в овощесушильной и консервной промышленности, в ней приведены расчеты, конструирование и результаты внедрения сушильных установок взвешенного слоя, а также использование подсушенных овощей в производстве овощных вакуумных консервов.

Растительные пищевые материалы как объекты сушки

Исследованные растительные объекты: картофель, зеленый горошек, морковь, столовая свекла, цикорий, капуста, лук, яблоки, груши, айва, абрикосы, субтропическая хурма, крупы пищевого концентратного производства - гречневая, рисовая, пшеничная, кукурузная, перловая, пшенная, горох являются основными материалами овощесушильной, плодосушильной и пищевых концентратной промышленности. Строение и физико-химические свойства материала оказывают решающее влияние на прочность связи влаги с ним, перенос тепла и влаги внутри материала в процессе сушки.

Длительность сушки пищевых растительных материалов объясняется незначительным содержанием свободной влаги в них, вода всегда связана с компонентами и образует растворы. Кроме того, барьером при удалении влаги служат многочисленные преграды: трехслойная наружная оболочка клетки и мембраны, окружающие каждый структурный элемент ее. Переплетенная система мембран делит клетку на замкнутые отдельные участки водной фазы, и удаление воды из них требует преодоле-

ния проницаемости мембран. Известно, что проницаемость мембраны для воды составляет 10^{-4} см/сек, что в 100 000 раз меньше скорости диффузии воды в слое, лишенном мембраны. Поэтому растительные материалы как объекты сушки отличаются от химических, строительных, топливных и других материалов неживой природы.

В 1954 г. нами совместно с Г.В.Щеклиным и М.И.Буркиным был спроектирован, изготовлен и внедрен на Обоянском овощесушильном заводе непрерывно-действующий ленточный паровой бланширователь БГЩ. Внедрение этого аппарата вместо ранее применявшихся водяных бланширователей позволило уменьшить потерю сухих веществ и водорастворимых витаминов, сократить обслуживающий персонал, повысить качество сушеного продукта и сократить последующую сушку, так как частицы материала в паровом бланширователе не дробятся, не покрываются слоем клейстеризованного крахмала, который затрудняет диффузию влаги из внутренних слоев наружу, замедляя сушку. На ленточном паровом бланширователе БГЩ последовательно осуществляется бланширование, промывка и сульфитация материала. Ленточный паровой бланширователь БГЩ, производительностью 1400-1600 кг/час картофеля сейчас применяют на многих овощесушильных заводах для обработки картофеля, моркови, столовой свеклы, капусты.

Считается, что бланширование картофеля и овощей приводит к ускорению процесса сушки. Нами установлено, что это не всегда приводит к ускорению процесса сушки. Так, бланширование высококрахмалистого картофеля и вареного горошка, а также высокосахаристой столовой свеклы замедляет процесс сушки. Это объясняется клейстеризацией, при которой влага клетки поглощается набухшими зернами клейстеризованного крахмала, и закупоркой капилляров сахарным сиропом (ореди сахаров свеклы преобладает сахароза), что затрудняет последующую сушку.

Бланширование моркови и капусты, напротив, приводит к ускорению сушки, что связано с уменьшением прочности сцепления клеток, потерей полупроницаемости клеточных оболочек, выделением влаги и слабых растворов из клетки в межклеточные пространства. Незначительное количество крахмала, преобладание глюкозы среди сахаров этих овощей не препятствует удалению влаги.

Крупы и горох перед сушкой при производстве пищевых концентратов варят при температуре $110-126^{\circ}\text{C}$ в течение 20-45 минут в зависимости от вида материала. Поэтому изменения белковых веществ, крахмала и других углеводов при варке более существенны, чем при бланшировании. Свертывание белков приводит к освобождению связанной воды, полная клейстеризация крахмала - к набуханию и связыванию влаги, а частичный гидролиз крахмала - к разрушению этой связи с образованием водорастворимых веществ - декстринов - полисахаридов, повышающих концентрацию раствора.

В вареных крупах и горохе зерна становятся более плотными, полупрозрачными, стекловидными, менее пористыми и в них сокращается величина межклеточных пространств, повышается влажность.

В литературе отсутствуют комплексные данные теплофизических характеристик растительных пищевых материалов. В.З.Жадан приводит значения коэффициентов температуропроводности, теплоемкости и теплопроводности некоторых плодов и овощей, не подвергнутых механической и тепловой обработке. А.Н.Вышелесский и М.А. Громов определили теплофизические коэффициенты очищенных картофеля, моркови и свеклы в процессе варки и обжаривания в пределах изменения влажности от 40 до 80 % и установили, что теплофизические характеристики этих материалов не зависят от формы и размеров образцов. И.Т.Кретов и А.И.Плешков установили значения теплофизических коэффициентов лука, свеклы, моркови для одной начальной влажности, а картофеля при небольших изменениях в

в пределах 83-50 %.

В лаборатории кафедры технологии сушки ОТИП имени М.В. Ломоносова под руководством автора проведено определение коэффициентов температуропроводности различных круп пищевого концентратного производства, целых и нарезанных картофеля, овощей и плодов в широком диапазоне изменения влагосодержания и температуры от 35 до 75°C в регулярном режиме первым методом Г.М. Кондратьева. Исследовано влияние усадки материалов в процессе их обезвоживания и бланширования на величины теплофизических коэффициентов.

Исследования показали, что коэффициенты температуропроводности и теплопроводности всех пищевых растительных материалов возрастают с увеличением температуры. Клейстеризация крахмала повышает величины этих коэффициентов соответственно в 1,5 - 2,8 и 1,7 - 3,3 раза в зависимости от температуры. Бланширование картофеля и овощей перед сушкой приводит к увеличению коэффициентов температуропроводности. Это имеет существенное значение при определении полей температур внутри материала в процессе сушки.

Коэффициент температуропроводности целых клубней картофеля, моркови и свеклы имеет меньшую величину, чем нарезанных частиц этих материалов при прочих равных условиях. Коэффициент температуропроводности картофеля, сохранившего в процессе обезвоживания свою первоначальную форму и объем, имеет большую величину по сравнению с частицами, получившими усадку в процессе сушки. Наоборот, величина коэффициента теплопроводности уменьшается у безусадочных частиц картофеля по сравнению с усадочными. Это объясняется пористым строением ткани безусадочных частиц, наличием в них воздушных полостей, а коэффициент температуропроводности газов имеет значительно большую величину, чем капельных жидкостей и твердых органических веществ. Для коэффициента теплопроводности характерна обратная зависимость.

Зависимость между коэффициентами температуропроводности и теплопроводности и влагосодержанием у большинства исследованных материалов имеет сложный, часто неопределенный характер. Коэффициент температуропроводности с уменьшением влагосодержания любого материала при одних температурах может неопределенно уменьшаться, при других - возрастать, что обусловлено изменением структуры материала. Коэффициент теплопроводности всех исследованных материалов с понижением влагосодержания уменьшается. Зависимость коэффициента температуропроводности α капусты и усадочных частиц картофеля от влагосодержания выражается уравнением

$$\alpha \cdot 10^8 = l + f W^c \quad /1/$$

где W^c - влагосодержание, %; l и f - постоянные коэффициенты, значения их приведены в работе.

Среднее квадратичное отклонение расчетных величин от опытных $\pm 0,3$.

Коэффициент теплопроводности при сушке перловой крупы при всех температурах и картофеля при температуре 75°C выражается линейной зависимостью от влагосодержания:

$$\lambda = c + d W^c \quad /2/$$

Значения коэффициентов c и d приведены в работе.

Среднее квадратичное отклонение расчетных величин от опытных составляет $\pm 0,016$.

А.В.Лыков, впервые предложивший термодинамическую аналогию тепло- и массообмена, прогнозируя развитие науки о сушке коллоидных капиллярно-пористых материалов, отмечает, что развитие термодинамики влажных материалов является одной из важнейших задач теории сушки. Термодинамические параметры влагопереноса: химический потенциал, экспериментальный потенциал влагопереноса, удельная изотермическая влагоемкость, термоградиентный коэффициент - определяют энергию и форму связи влаги с материалом, являются

массообменными характеристиками.

Нами определены термодинамические параметры влагопереноса в диапазоне температур от 0 до 100°C картофеля с безусадочными частями и получившими усадку в процессе сушки, зеленого горошка, капусты, абрикосов, перловой и гречневой круп, аморфной сахарозы, картофельного крахмала, пектина и клетчатки. Данные массообменных характеристик других растительных пищевых материалов приведены в монографиях Л.М.Никитиной и статьях Чуприны А.И.

Полученные термодинамические параметры влагопереноса характеризуются сложной зависимостью от структуры, химического состава, влагосодержания и температуры материала. С целью исследования влияния структуры на значения термодинамических характеристик был выбран сушеный картофель промышленной сушки в неподвижном слое при температуре сушильного агента ниже 100°C со значительной усадкой и стекловидной массой и картофель, высушенный нами при температуре воздуха 105°C в раввитой стадии кипящего слоя, сохранивший свою первоначальную форму и размер, имеющий пористое строение. На рис. 1 Б показаны зависимости потенциала влагопереноса и удельной изотермической влагоемкости от равновесного влагосодержания сушеного картофеля с усадкой и без усадки.

Картофель, овощи и плоды характеризуются зависимостью равновесного влагосодержания и термодинамических параметров влагопереноса от химического состава. Для изучения этой зависимости построены изотермы сорбции и определены термодинамические параметры влагопереноса основных химических компонентов плодов и овощей: аморфной сахарозы, крахмала, пектина и клетчатки — оказывающих решающее влияние на связь влаги с материалом и на изменение массообменных характеристик. Эти исследования показали, что при одинаковой влажности и температуре воздуха наибольшей способностью связывать влагу обладает пектин, затем крахмал и клетчатка.

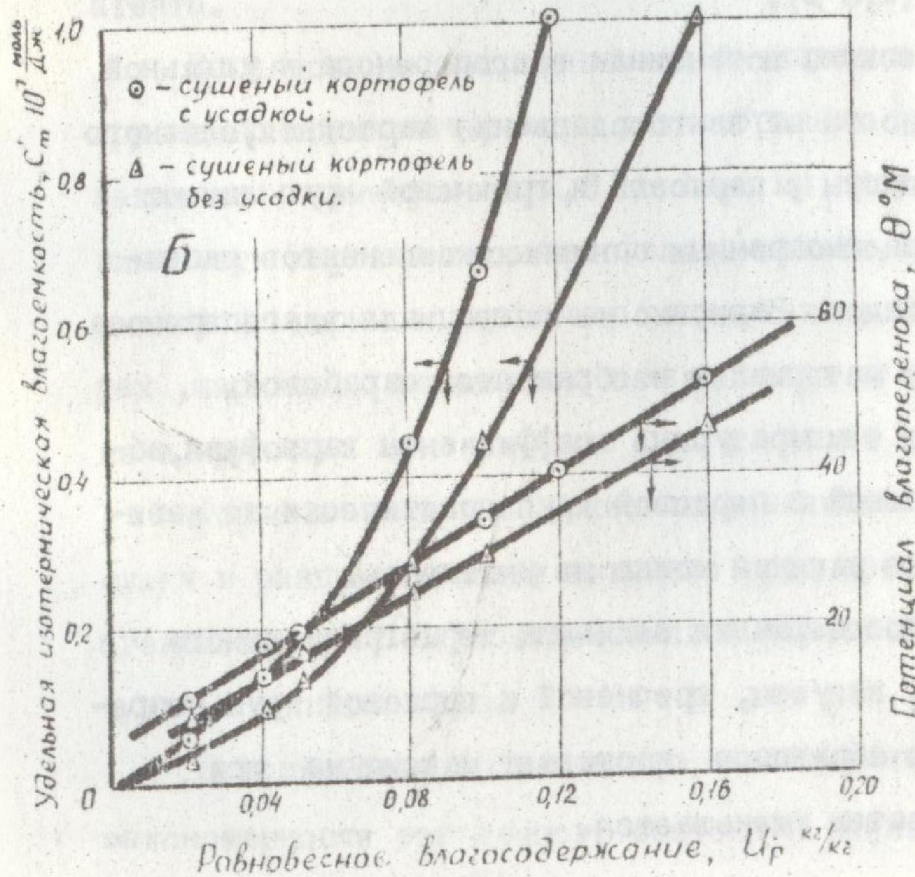
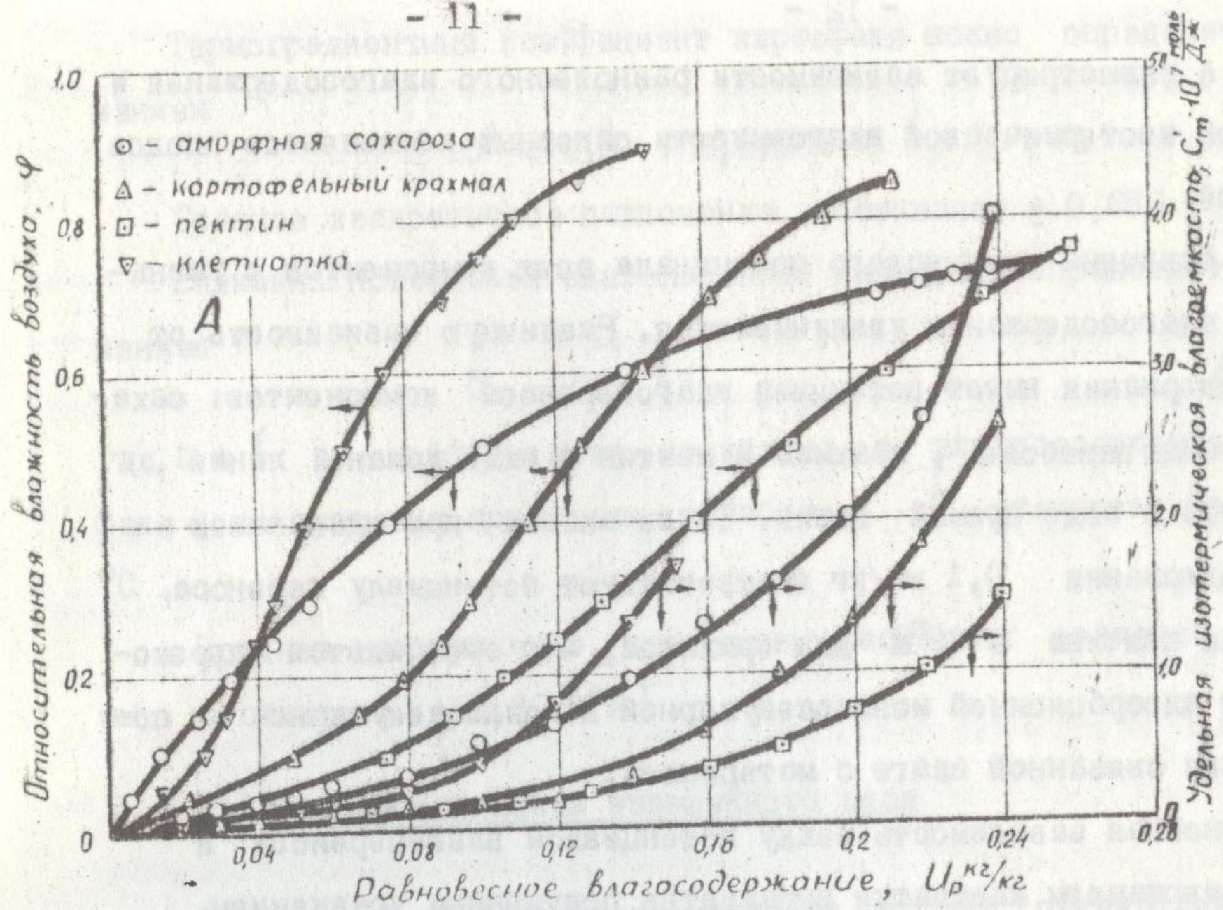


Рис 1

Рис. 1 А иллюстрирует зависимости равновесного влагосодержания и удельной изотермической влагоемкости основных компонентов плодов и овощей.

Величина химического потенциала всех компонентов с уменьшением влагосодержания увеличивается. Различную зависимость от влагосодержания имеет потенциал влагопереноса компонентов: сахароза в виде параболы, крахмал и пектин в виде ломаной линии, клетчатка в виде прямой линии. Точки излома при одинаковом влагосодержании 0,1 кг/кг соответствуют потенциалу переноса 10^9 М для пектина и 19^0 М для крахмала, что объясняется переходом от адсорбционной мономолекулярной и полимолекулярной и осмотически связанной влаги с материалом.

Линейная зависимость между потенциалом влагопереноса и влагосодержанием клетчатки выражается полученным уравнением

$$\theta = 406 \cdot u \quad /3/$$

Среднее квадратичное отклонение расчетных величин от опытных составляет $\pm 0,86$ (2,6 %).

Зависимости химического потенциала влагопереноса и удельной изотермической влагоемкости от влагосодержания картофеля, зеленого горошка, абрикосов, капусты, перловой и гречневой круп имеют такой же характер, как рассмотренных основных компонентов растительных пищевых материалов. Зависимость потенциала влагопереноса от влагосодержания этих материалов изображается параболой.

Термоградиентный и температурный коэффициенты картофеля, абрикосов, капусты, гречневой и перловой круп практически не зависят от температуры и ее влияния можно не учитывать.

С увеличением влагосодержания величина термоградиентного коэффициента картофеля, капусты, гречневой и перловой круп непрерывно возрастает, а для абрикосов достигает максимума при

$$u = 0,35 \text{ кг/кг, затем уменьшается.}$$

Термоградиентный коэффициент картофеля можно определить уравнением

$$\delta 10^4 = 0,3 + 2,875 u \quad /4/$$

Среднее квадратичное отклонение составляет $\pm 0,058$

Величина потенциала влагопереноса картофеля определяется уравнением

$$\theta = a + bt \quad /5/$$

где a и b - коэффициенты, зависящие от влагосодержания картофеля, их значения приведены в работе; t - температура среды, $^{\circ}\text{C}$.

Среднее квадратичное отклонение расчетных значений от опытных составляет $\pm 0,32 [^{\circ}\text{M}]$.

Гидродинамика взвешенного слоя

Взвешенный слой подразделяется на кипящий, осуществляемый в каналах постоянного сечения и фонтанирующий - в каналах переменного сечения с постепенным расширением по ходу движения сушильного агента.

Исследование гидродинамики кипящего и фонтанирующего слоев крупнозернистых материалов равнообразных форм и размеров с эквивалентным диаметром от 2,3 до 18,6 мм проведено на частицах равной влажности нарезанного картофеля, моркови, свеклы правильной геометрической формы: кубиках, полукубиках, параллелепипедах, цилиндрах, шариках; нарезанном в виде колец лука, а также валеном горошке и крупах.

Форма и размеры частиц сохранялись неизменными в процессе сушки в развитой стадии кипящего слоя при температуре сушильного агента выше 100°C либо изменялись равномерно при низкотемпературной сушке в кипящем слое.

В результате проведенного исследования установлены основные закономерности взвешенного состояния слоя. Сопротивление кипящего

слоя прямо пропорционально удельной нагрузке и не зависит от скорости воздуха. Эта особенность кипящего слоя позволяет непрерывно контролировать изменение массы материала в процессе сушки сопротивлением слоя кипящего материала.

Границы кипящего слоя сухих частиц крупнозернистого материала можно определить по установленным нами уравнениям в виде эмпирической и критериальной зависимостей:

$$V_{k_1} = 1,0 + 0,6 K_{\phi} d_3 \quad ; \quad Re_{k_1} = 4,75 Fe - 325 \quad /6/$$

$$V_{k_2} = 2,1 + 0,8 K_{\phi} d_3 \quad ; \quad Re_{k_2} = 8,4 Fe - 530 \quad /7/$$

В этих уравнениях: V_{k_1} и V_{k_2} - соответственно критическая скорость воздуха при переходе слоя от неподвижного состояния в кипящее и скорость воздуха, соответствующая возникновению равновитой стадии кипящего слоя; K_{ϕ} - динамический коэффициент формы, равный отношению скорости витания частицы данной формы к скорости витания равновеликого по объему шара; d_3 - эквивалентный диаметр частиц: $d_3 = \sqrt[3]{\frac{6M}{\pi n \rho_M}} = 1,24 \sqrt[3]{V}$, M - масса материала, кг; n - число частиц; ρ_M - плотность материала, кг/м³; критерий Рейнольдса $Re_k = \frac{V_k \cdot d_3}{\gamma}$, критерий Федорова $Fe = d_3 \sqrt[3]{\frac{4}{3} \frac{g}{\gamma^2} \frac{\rho_M - \rho_b}{\rho_M}}$; V_k - критическая скорость воздуха, соответственно V_{k_1} и V_{k_2} , м/с; γ - кинематическая вязкость воздуха, м²/с; g - ускорение силы тяжести, м/с²; ρ_b - плотность воздуха, кг/м³.

Границы кипящего слоя влажного материала изменяются из-за агрегирования слипающихся частиц и зерен, и перевод их в кипящее состояние вызывает определенные трудности.

Влажные частицы крупнозернистого материала переходят в кипящий слой при большей критической скорости воздуха и меньшем сопротивлении слоя, чем сухие частицы. Это объясняется большими силами сцепления влажных частиц, что приводит к образованию агрегатов и многочисленных каналов между ними. Через образовав-

шиеся каналы проходит основная масса воздуха, что задерживает и затрудняет переход слоя в кипящее состояние, требует дополнительных затрат воздуха и энергии на работу вентилятора.

Установлены величины переходного влагосодержания безосадочных частиц картофеля и корнеплодов, равные $W_{пер} = 75-100 \%$, влажного горошка и всех видов круп $W_{пер} = 10-15 \%$. По достижении величины переходного влагосодержания прекращается слипание частиц.

Критическая скорость воздуха, соответствующая переходу слоя влажных частиц крупнозернистого материала в кипящее состояние, определяется полученным нами уравнением:

$$V_{к1} = a + b W^c \quad /8/$$

где a и b — коэффициенты, зависящие от вида материала, формы и размера частиц, их значения приведены в работе.

Среднее квадратичное отклонение составляет $\pm 0,245$.

Скорость воздуха, соответствующая равновитой стадии кипящего слоя круп после гидротермической обработки, определяется уравнением

$$V_{к2} = 2,0 + 0,17 W^c \quad /9/$$

Среднее квадратичное отклонение расчетных значений от опытных составляет $\pm 0,064$ (2,1%).

В результате проведенного исследования определено единое уравнение скорости витания всех исследованных растительных пищевых материалов, форм и размеров частиц при различных влагосодержаниях от влажного до сухого состояния:

$$V_{вит} = 1,2 + 5,4 K_{\varphi} \sqrt{d_s \frac{\rho_m}{\rho_g}} \quad /10/$$

Среднее квадратичное отклонение составляет $\pm 0,65$ (4,33%).

В критериальной форме определена скорость воздуха, соответствующая равновитой стадии кипящего слоя, и скорости витания всех исследованных материалов, разнообразных форм и размеров частиц при всех влагосодержаниях, эти зависимости изображены на рис. 2.

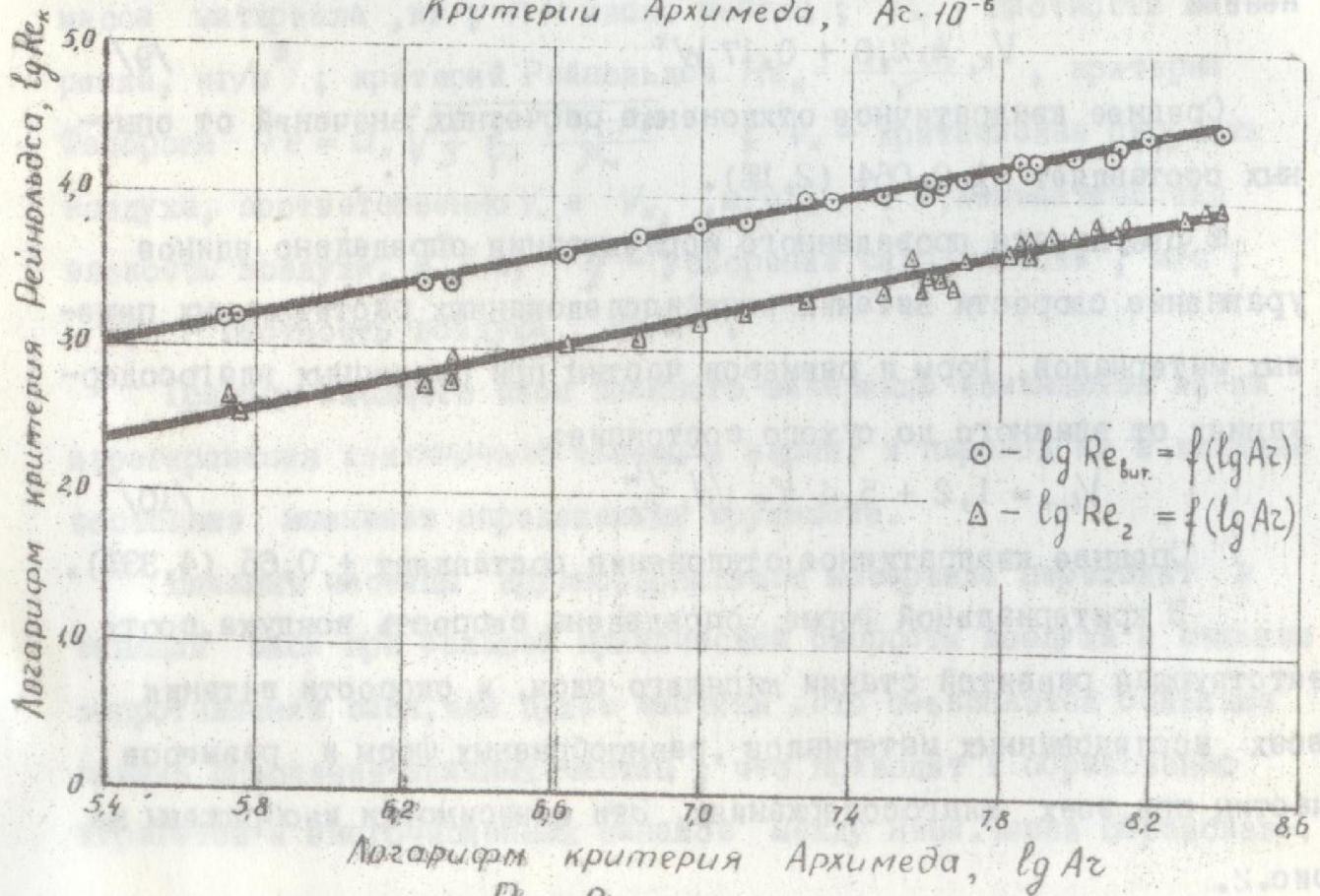
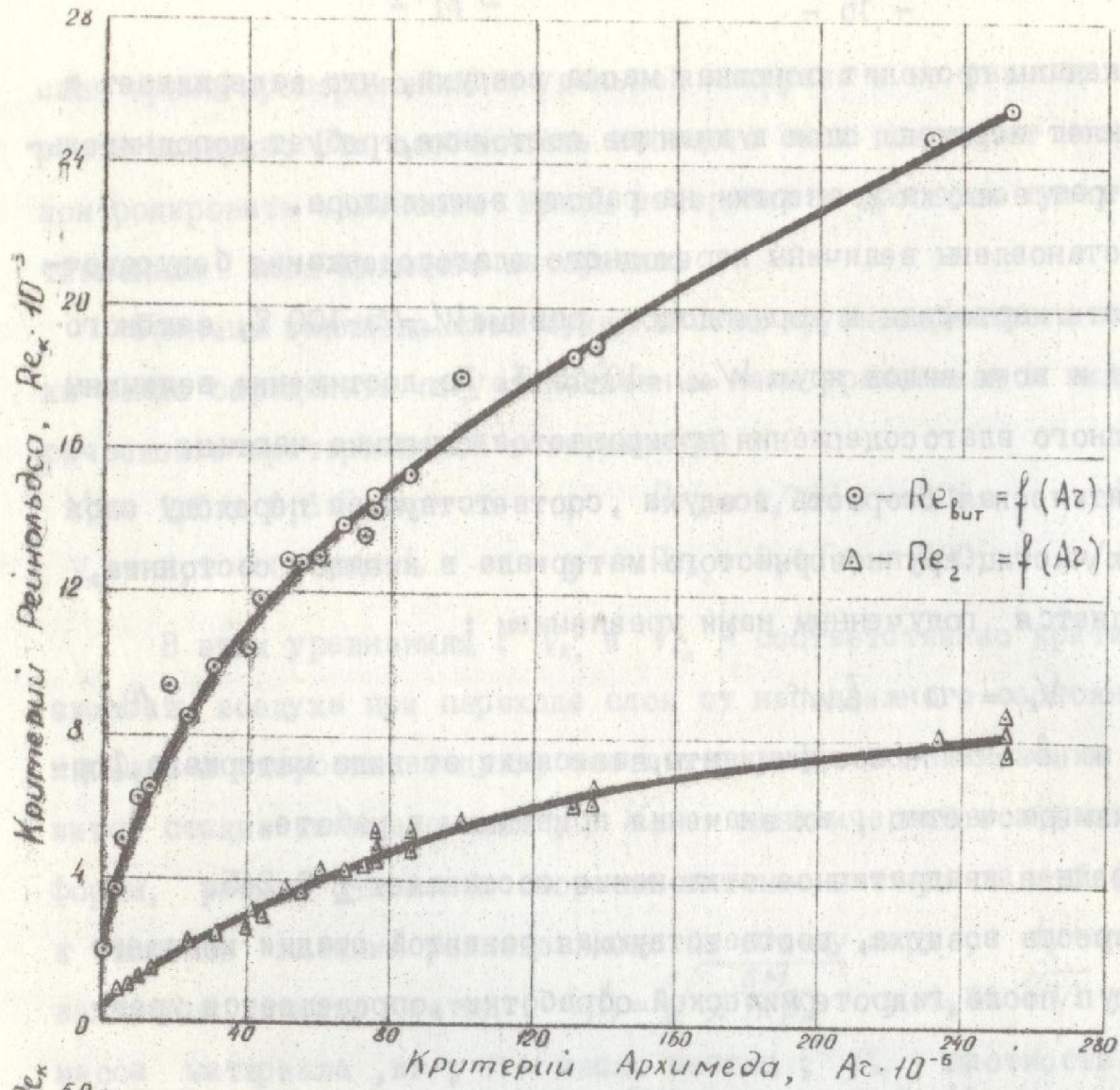


Рис 2

$$Re_{k_2} = 0,495 \cdot Az^{0,523}$$

/ 11/

$$Re_{\text{в.т.}} = 1,585 \cdot Az^{0,5}$$

/ 12/

Относительное среднее квадратичное отклонение расчетных значений от опытных $\pm 5,9\%$.

В уравнениях /11/ и /12/ в критерии Рейнольдса за величину скорости воздуха соответственно принимаются V_{k_2} и $V_{\text{в.т.}}$; Az - критерий Архимеда: $Az = \frac{d_s^3 \cdot g}{\gamma^2} \cdot \frac{\rho_n - \rho_b}{\rho_b}$

Нами установлены также закономерности гидродинамики фонтанирующего слоя. Максимальное гидравлическое сопротивление в фонтанирующих аппаратах наступает при состоянии потери устойчивости, когда слой начинает расширяться, но частицы его неподвижны. Максимальное гидравлическое сопротивление слоя не зависит от влаго содержания материала и определяется величиной удельной нагрузки материала по отношению к площади входного поперечного сечения, размерами, формой и плотностью материала. Дальнейшее увеличение скорости воздуха приводит к началу шевеления и движения частиц, возникает состояние начала фонтанирования, которое характеризуется соответствующей скоростью воздуха $V_{н.ф.}$ и падением величины гидравлического сопротивления. Началу фонтанирования присуще неустойчивое состояние, при котором непрерывно уменьшается гидравлическое сопротивление. Снижение гидравлического сопротивления продолжается в большем диапазоне изменения скорости воздуха и прекращается при значении скорости воздуха, соответствующей устойчивому фонтанированию $V_{у.ф.}$. Гидравлическое сопротивление слоя в состоянии устойчивого фонтанирования значительно сокращается по сравнению с максимальным сопротивлением и сопротивлением кипящего слоя, оно составляет 12-30% величины удельной нагрузки материала по отношению к площади поперечного сече-

с. № 12 302

ния слоя, не зависит от вида материала, формы и размера частиц, является величиной постоянной для данной конструкции камеры, определяемой углом раствора конуса.

Скорости воздуха, соответствующие началу фонтанирования и устойчивому фонтанированию, можно рассчитать по полученным нами уравнениям

$$V_{н.ф.} = a + b \frac{M}{F_0} \quad /13/$$

$$V_{у.ф.} = c + d \frac{M}{F_0} \quad /14/$$

Среднее квадратичное отклонение расчетных значений от опытных составляет $\pm 0,05 + 0,27$ м/сек ($0,3 + 1,9$ %).

В этих уравнениях M - масса материала, кг; F_0 - площадь входного сечения, м²; a, b, c, d - коэффициенты, зависящие от вида материала, их значения приведены в работе.

В результате обработки опытных данных и определения постоянных коэффициентов методом наименьших квадратов получены критериальные уравнения, соответствующие состояниям начала фонтанирования и устойчивого фонтанирования исследованных пищевых растительных материалов равнообразных форм и размеров частиц.

$$Re_{н.ф.} = 2,2 \cdot Az^{0,4} \quad /15/$$

$$Re_{у.ф.} = 3,24 \cdot Az^{0,4} \quad /16/$$

Эти уравнения действительны для всех видов материалов, влажностей и удельных нагрузок их, форм и размеров частиц. Уравнения применимы для сушильных камер с углом конусности 45° .

Относительное среднее квадратичное отклонение $\pm 6,3$ %.

Тепло- и массообмен в процессе сушки пищевых растительных материалов

В результате проведенного исследования определены основные закономерности тепло- и влагообмена в процессе сушки пищевых растительных материалов в развитой стадии кипящего слоя. Дифферен-

циальные уравнения переноса тепла и влаги в процессе сушки влажных тел, сформулированные А.В.Лыковым, до настоящего времени практически не разрешимы. Трудность решения этих уравнений состоит в том, что коэффициенты температуропроводности, диффузии влаги, термоградиентный коэффициент, а также градиенты влагосодержания и термодиффузии являются величинами переменными и находятся в сложной зависимости от температуры и влагосодержания материала. Еще большие затруднения представляет собой расчет тепло- и массообмена при сушке пищевых растительных материалов, так как к зависимостям теплофизических характеристик и термодинамических параметров влагопереноса от температуры и влагосодержания прибавляются еще изменения химического состава и строения тканей, связанные с различием видов и сортов, степени зрелости, а также климатическими почвенными особенностями выращивания их, способами сушки и параметрами сушильного агента.

При расчете продолжительности сушки пищевых растительных материалов нами использован метод приведенной скорости сушки, впервые сформулированный Г.К.Филоненко в 1938 году. Метод приведенной скорости сушки позволяет исключить влияние параметров агента сушки, ограничиться только физико-химическими свойствами и энергией связи с материалом. Поэтому уравнения скорости и продолжительности сушки, полученные в результате исследования процесса на опытных стендах, могут быть использованы в инженерных расчетах производственных сушильных установок. Методом приведенной скорости сушки можно установить связь между скоростью сушки и влагосодержанием материала.

Приведенная скорость сушки ψ определяется отношением скорости сушки при данном влагосодержании к максимальной скорости сушки первого периода постоянной скорости

$$\psi = \frac{1}{N} \cdot \frac{dW}{d\tau} = \frac{(W - W_p)^m}{A + B(W - W_p)^m}$$

где N - скорость постоянного периода сушки, %/мин; W и W_p - соответственно начальное и равновесное влагосодержание; A, β, m - коэффициенты; скорость сушки: $-\frac{dW}{d\tau} = N\psi$

Подставляя значение из уравнения /17/, определяем продолжительность сушки:

$$\tau = \frac{1}{N} \left[(W_1 - W_k) + A \int_{W_2}^{W_k} \frac{dW}{(W - W_p)^m} + \beta (W_k - W_2) \right] \quad /18/$$

Подынтегральное выражение определяется значением показателя степени m , который для данного материала является постоянной величиной, не зависит от формы и размера частиц, от способов и параметров процесса сушки. Показатель степени характеризует энергию связи влаги с материалом. При испарении свободной влаги в периоде постоянной скорости сушки $m = 0$.

Наши исследования по сушке равнообразных растительных пищевых материалов установили три значения показателя степени m :

$m = 0,5$ для субтропической хурмы, морских водорослей, семян томатов и перца; $m = 1,0$ - для картофеля, свеклы, моркови, лука, капусты, зеленого горошка, цикория, яблок, абрикосов, айвы, груш, виноградных семян; $m = 2,0$ - для всех видов круп после гидротермической обработки.

При известном значении показателя степени решение уравнения /18/ значительно упрощается:

$$m = 0,5 \quad \tau = \frac{1}{N} \left[(W_1 - W_k) + 2A (\sqrt{W_k - W_p} - \sqrt{W_2 - W_p}) + \beta (W_k - W_2) \right] \quad /19/$$

$$m = 1,0 \quad \tau = \frac{1}{N} \left[(W_1 - W_k) + 2,3A \lg \frac{W_k - W_p}{W_2 - W_p} + \beta (W_k - W_2) \right] \quad /20/$$

$$m = 2,0 \quad \tau = \frac{1}{N} \left[(W_1 - W_k) + A \frac{(W_k - W_2)}{(W_k - W_p)(W_2 - W_p)} + \beta (W_k - W_2) \right] \quad /21/$$

В уравнениях /18/, /19/, /20/ и /21/ : W_1, W_k, W_2 - соответственно начальное, критическое и конечное влагосодержание материала.

Таким образом, для определения продолжительности сушки в любое время нужно найти только два коэффициента A и B , скорость постоянного периода сушки и значение равновесного влагосодержания.

Уравнение продолжительности сушки /18/ на основании метода приведенной скорости сушки было получено Г.К.Филоненко в результате исследования сравнительно однородных материалов при невысоких пределах изменений температуры и потенциала сушки нагретого воздуха. В этих условиях для определенного материала коэффициенты A и B , а также критическое влагосодержание являлись постоянными величинами, независимыми от способа сушки и параметров сушильного агента.

Результаты наших исследований по сушке разнообразных пищевых растительных материалов в широком диапазоне изменений температуры и потенциала сушки нагретого воздуха с применением различных способов сушки показывали, что коэффициенты A и B и значение критического влагосодержания W_k одного и того же материала, а также размеры частиц изменяются в зависимости от температуры и потенциала агента сушки.

Нами установлено, что коэффициенты A и B характеризуют перемещение влаги внутри материала и зависят как от размера и формы частиц, т.е. от длины пути перемещаемой влаги в процессе сушки, так и от температуры и потенциала сушильного агента характеризующих фазовое состояние перемещаемой влаги. Величина коэффициента A с повышением температуры и потенциала сушки уменьшается, а коэффициент B для одного и того же материала может иметь как положительное, так и отрицательное значение или равняться нулю в зависимости от температуры и потенциала агента сушки, определяющих фазовое состояние влаги.

Определены уравнения для расчета этих коэффициентов:

$$A = c - dE$$

/ 22 /

$$B = eE - f$$

/23/

где $E = t^c - t^m$ - потенциал сушки нагретого воздуха, t^c и t^m соответственно температуры по "сухому" и "мокрому" термометрам, $^{\circ}\text{C}$; c, d, e, f - коэффициенты, определяемые видом материала, формой и размером частиц. Значения этих коэффициентов для всех видов материалов приведены в работе.

Средние квадратичные отклонения расчетных от опытных в уравнениях /22/ и /23/ составляют: для картофеля $\pm 1,9$ (5,3 %), лука $\pm 1,5$ (6,2 %), вареного горошка $\pm 2,4$ (4,3 %), моркови $\pm 2,2$ (6,6 %), круп (гречневой, перловой, рисовой) $\pm 2 + 6$ (1,3 + 3,5 %).

При сушке в кипящем слое коэффициенты A и B не зависят от скорости воздуха и удельной нагрузки материала, которые в периоде падающей скорости сушки не влияют на удаление влаги и перемещение ее внутри материала.

Предложенные уравнения /22/ и /23/ и приведенные в работе табличные данные позволяют просто и быстро определить коэффициенты A и B без дополнительного графического построения.

Нами установлено, что для всех исследованных материалов скорость постоянного периода сушки в развитой стадии кипящего слоя прямо пропорциональна потенциалу сушки нагретого воздуха, массовой скорости воздуха v_p и обратно пропорциональна удельной нагрузке сухого материала $\frac{M_c}{F}$:

$$N = a + b \cdot E \cdot v_p \cdot \frac{F}{M_c} \quad /24/$$

В работе приведены значения коэффициентов a и b , определяемые видом материала, формой и размером частиц.

Среднее квадратичное отклонение расчетных значений от опытных различных видов материалов составляет $\pm 0,049 + 2,71$ (1,2-5,2 %).

Определен характер изменения критического влагосодержания всех исследованных растительных материалов в процессе сушки: с повышением температуры и потенциала сушки нагретого воздуха критическое влагосодержание материала понижается, т.е. возрастает диапазон

влажностного содержания материала в периоде постоянной скорости сушки. Критическое влажностное содержание всех исследованных материалов можно рассчитывать по предложенному нами уравнению

$$W_k = K - \ell E \quad /25/$$

Среднее квадратичное отклонение составляет $\pm 2 + 24,2$ (0,4-5%)

В работе приведены значения коэффициентов K и ℓ для всех видов материалов, форм и размеров частиц. Значения коэффициента K близки к величине первоначального влажностного содержания или равны ему.

Установленные нами закономерности и полученные уравнения /22/, /23/, /24/, /25/ являются дальнейшим развитием метода приведенной скорости сушки Г.К. Гилоненко, позволяют достаточно просто, быстро и с более высокой точностью решить уравнения продолжительности сушки /19/, /20/, /21/.

Расчет температуры материала в процессе сушки

Решающее влияние на качество термолабильных пищевых растительных материалов оказывает температура нагрева, равномерность и продолжительность воздействия тепла. Поэтому при сушке таких материалов требуется строгий контроль и регулирование температуры материала.

Температура материала в процессе сушки непрерывно повышается и определяется параметрами сушильного агента, способом сушки и теплофизическими свойствами самого материала.

В литературе отсутствуют данные о замерах температуры картофеля, овощей, плодов и круп пищевого концентратного производства в процессе сушки. Особые трудности вызывает определение температуры материала при сушке в кипящем слое вследствие непрерывного движения и перемешивания частиц. Если при сушке в кипящем слое мелкозернистого и пылевидного материала за среднюю объемную температуру материала можно принять температуру поверхности материала, измерен-

мую оголенными спаями термопар в момент внезапного прекращения подачи нагретого воздуха, то при сушке крупнозернистого материала этого недостаточно, нужно знать еще и температуру в центре частиц.

Измерение температуры материала в центре нарезанных частиц картофеля, плодов и овощей производили хромель-капельными термопарами диаметром 0,18 мм. Три термопары длиной 400 мм закрепляли на верхней сетке рабочей камеры, спай вводили в центры трех частиц и закрепляли их тонкими проволоками. Частицы с закрепленными термопарами, как и другие частицы, совершали непрерывное хаотическое движение на определенной высоте. Большая длина свободного конца (400 мм) не препятствовала такому движению частиц. Контрольные частицы непрерывно обменивались импульсами ударов с другими окружающими частицами, т.е. находились приблизительно в одинаковых условиях с ними. Скоростная киносъемка подтвердила равнозначность гидродинамических условий контрольных и окружающих частиц в процессе исследования при сушке в кипящем слое. Семью термопарами с незащищенными спаями измеряли температуру поверхности частиц на различной высоте в момент взвешивания рабочей камеры, при котором рабочую камеру вынимали из воздуховода сушильной установки, что исключало влияние сушильного агента на показания температуры поверхности частиц. Эти температуры непрерывно записывали на ленточной диаграмме автоматического показывающего потенциометра ПСР-1-20 с погрешностью $\pm 0,5\%$.

Эти исследования позволили установить основные закономерности кинетики нагрева пищевых растительных материалов в процессе сушки в развитой стадии кипящего слоя.

На рис. 3 А показаны зависимости температуры картофеля в центре и на поверхности частиц размером 15х15х15 мм при температурах нагретого воздуха 140, 120 и 60°C.

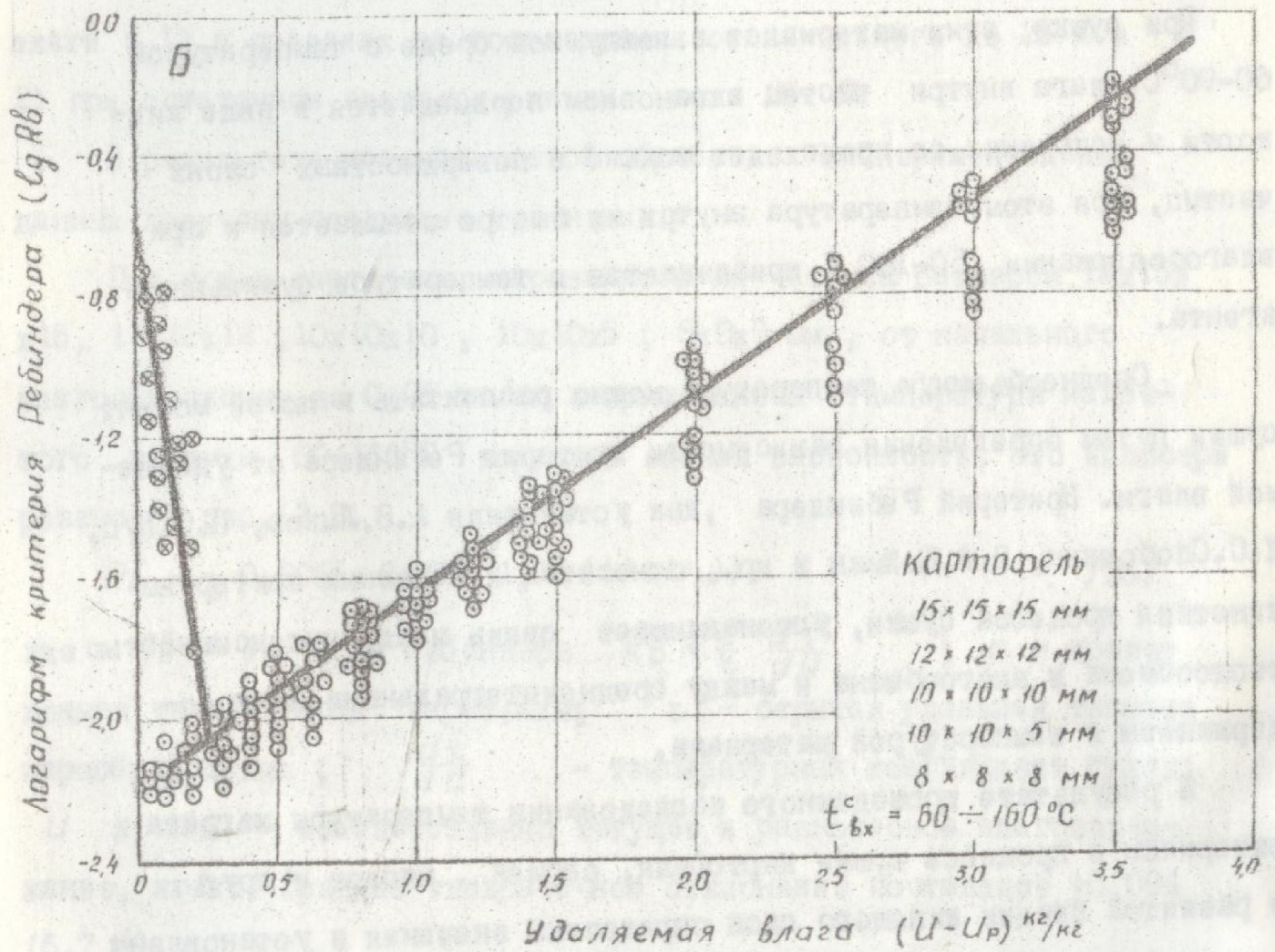
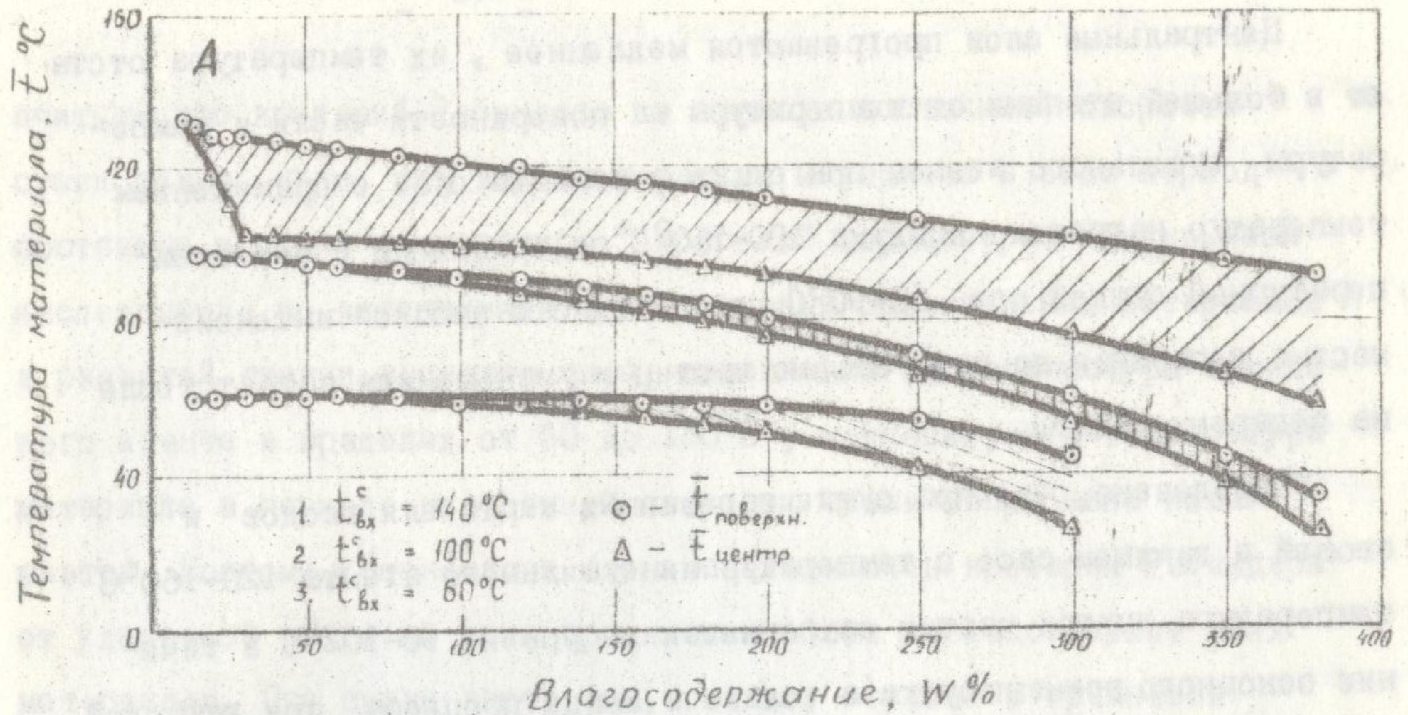


Рис. 3

Центральные слои прогреваются медленнее, их температура отстает в большей степени от температуры на поверхности части и температуры сушильного агента при сушке в кипящем слое с применением температур нагретого воздуха $100-160^{\circ}\text{C}$ по сравнению с низкотемпературной сушкой при $60-90^{\circ}\text{C}$. Это связано с высокой интенсивностью испарения по всем объемам частиц и уменьшением затрат тепла на испарение влаги.

Определено, что при сушке нарезанных картофеля, плодов и овощей в кипящем слое с температурами сушильного агента $120-160^{\circ}\text{C}$ температура внутри частиц сохраняется на уровне $90-102^{\circ}\text{C}$ в течение основного времени сушки и только в конце процесса при глубокой сушке приближается к температуре нагретого воздуха на выходе из рабочей камеры.

При сушке этих материалов в воздушной среде с температурой $60-90^{\circ}\text{C}$ влага внутри частиц в основном перемещается в виде жидкости и испарение ее происходит только в поверхностных слоях частиц, при этом температура внутри их быстро повышается и при влагосодержании $50-100\%$ приближается к температуре сушильного агента.

Среднеобъемную температуру можно рассчитать в любой момент сушки путем определения зависимости критерия Ребиндера от удаляемой влаги. Критерий Ребиндера, как установили А.В.Лыков, П.С.Куц, Л.С.Слободкин, В.А.Шейман и др., относится к основным критериям кинетики процесса сушки, устанавливает связь между интенсивностью теплообмена и влагообмена и между среднеинтегральными влагосодержанием и температурой материала.

В результате проведенного исследования температуры нагрева материала в процессе сушки картофеля, овощей, плодов и круп в развитой стадии кипящего слоя определены значения и установлены зависимости критерия Ребиндера от удаляемой влаги. Общепринято

27

считать, что критерий Ребиндера в периоде постоянной скорости сушки равен нулю, так как температура материала в этот период постоянна и равна температуре "мокрого" термометра. Однако, наши исследования по интенсивной сушке пищевых растительных материалов в развитой стадии кипящего слоя, независимо от температуры сушильного агента в пределах от 60 до 180°C, показывали, что температура материала в периоде постоянной скорости сушки непрерывно повышается. Поэтому установлена единая зависимость критерия Ребиндера от удаляемой влаги на всем протяжении обоих периодов сушки этих материалов. При сушке картофеля, свеклы, моркови и гречневой крупы с применением температуры нагретого воздуха от 110 до 180°C наблюдаются две зависимости критерия Ребиндера от удаляемой влаги: 1) в пределах влагосодержания от начального до 25 % и 2) при остаточном влагосодержании ниже 25 %.

В результате математической обработки экспериментальных данных получены следующие уравнения.

При сушке картофеля, нарезанного на частицы размером 15x15x15, 12x12x12, 10x10x10, 10x10x5, 8x8x8 мм, от начального влагосодержания до 0,25 кг/кг с применением температуры нагретого воздуха 60-160°C получена единая зависимость. Это иллюстрировано рис. 3 Б.

$$Rb = -0,0065 \cdot \exp[1,74(U - U_p)] \quad /26/$$

где Rb - критерий Ребиндера $Rb = \frac{c}{\tau} \frac{d\bar{t}}{dU}$; c - приведенная теплоемкость картофеля; τ - скрытая удельная теплота парообразования; $\frac{d\bar{t}}{dU}$ - температурный коэффициент сушки; U и U_p - соответственно текущее и равновесное влагосодержание, кг/кг. Среднее квадратичное отклонение составляет $\pm 0,094$ (6,7 %).

Коэффициенты уравнения (26) получены методом наименьших квадратов.

При сушке моркови, нарезанной кубиками 12х12х12 мм в диапазоне температур нагретого воздуха 70-150°C в пределах влагосодержаний 6,0 - 0,25 кг/кг:

$$R_b = - 0,0165 \cdot \exp[0,3316 (U - U_p)] \quad /27/$$

Среднее квадратичное отклонение составляет $\pm 0,063$ (3,7 %).

При сушке столовой свеклы размером частиц 20х20х20 мм и 15х15х15 мм в диапазоне изменения температуры агента сушки от 80 до 150°C и влагосодержания материала 6,0-2,5 кг/кг:

$$R_b = - 0,00885 \cdot \exp[0,516 (U - U_p)] \quad /28/$$

Среднее квадратичное отклонение составляет $\pm 0,0775$ (4,3%).

Для гречневой и кукурузной крупы при сушке в интервале изменения температуры нагретого воздуха 60-160°C и влагосодержания материала 1,5-0,25 кг/кг:

$$R_b = - 0,0335 \cdot \exp[1,45 (U - U_p)] \quad /29/$$

Среднее квадратичное отклонение составляет $\pm 0,0762$ (6,25 %).

При сушке перловой крупы в интервале температур сушильного агента 60-180°C, во всем диапазоне влагосодержания материала от 1,5 до 0,06 кг/кг:

$$R_b = - 0,01995 \cdot \exp[1,28 (U - U_p)] \quad /30/$$

Среднее квадратичное отклонение составляет $\pm 0,0771$ (5,9 %).

Постоянные коэффициенты в уравнениях (27-30) получены методом наименьших квадратов.

При высокотемпературной сушке в кипящем слое всех размеров частиц картофеля, свеклы, моркови и гречневой крупы в интервале температур нагретого воздуха 110-180°C при удалении остаточной влаги установлена единая зависимость критерия Ребиндера от влагосодержания (в пределах 25-2 %):

$$R_b = - 3,665 \cdot \exp(-13,93 U) \quad /31/$$

Постоянные коэффициенты уравнения /31/ получены методом наименьших квадратов, среднее квадратичное отклонение составляет $\pm 0,104$ (7,9 %).

Полученные уравнения (26-31) позволяют рассчитать среднюю температуру материала и установить связь между тепло- и влагообменом в процессе сушки.

Уравнения (26-31) показывают, что величина критерия Ребиндера при сушке пищевых материалов в кипящем слое обуславливается только влагосодержанием материала и не зависит от температуры, влажности, скорости агента сушки, удельной нагрузки материала, формы и размера частиц.

Связь между тепло-и влагообменом в процессе сушки определяется уравнением

$$q_{(t)}^* = \psi (1 + Rb) = \frac{1}{N} \frac{dW}{dt} (1 + Rb) = \left[\frac{(W - W_p)^m}{A + B(W - W_p)^m} \right] (1 + Rb) \quad /32/$$

где $q_{(t)}^*$ - отношение потока тепла в периоде падающей скорости сушки к потоку тепла в периоде постоянной скорости сушки, ψ - приведенная скорость сушки.

Уравнение /32/ позволяет расчет теплообмена свести к расчету влагообмена и, наоборот, связывает приведенную скорость сушки с величиной критерия Ребиндера.

Кинетика и технология сушки различных растительных пищевых материалов в развитой стадии кипящего слоя

В настоящее время в овощесушильной, пищаконцентратной и других отраслях пищевой промышленности применяют ленточные конвейерные, туннельные и шахтные сушильные установки, в которых процесс сушки осуществляется в неподвижном слое. Наиболее совершенные из них - ленточные конвейерные сушильные установки, обеспечивающие непрерывность процесса сушки и снижающие затраты ручного

труда на их обслуживание. Однако, несмотря на ряд достоинств, ленточные конвейерные сушильные установки имеют существенные недостатки: Ограниченная скорость и неравномерное распределение воздуха приводит к неравномерному распределению тепла и влаги, к возможным местным перегревам материала. Поэтому температура нагретого воздуха при сушке картофеля, овощей и плодов на этих установках не должна превышать 30°C из-за возможного подгорания продукта. Это, в свою очередь, заставляет работать на малых удельных нагрузках материала от 5 до $16,5 \text{ кг/м}^2$, что снижает производительность сушильной установки. Все это приводит к увеличению продолжительности сушки: картофеля, моркови, свеклы, цикория, нарезанных кубиками $8 \times 8 \times 8 \text{ мм}$, а также лука, капусты, зеленого горошка до остаточной влажности 12-14 % - 3,5-4,5 часа, а до влажности 6-8 % - 5-6 часов. Продолжительность сушки круп пишеконцентратного производства до остаточной влажности 8-9 % составляет 1,0 час, абрикосов в виде половинок до остаточной влажности 18-21 % - 6-7 часов и яблок, нарезанных мелкими столбиками $5 \times 5 \times 30 \text{ мм}$ до остаточной влажности 20 % - 3-3,5 часа.

Улучшение качества сушеных пищевых растительных материалов всегда связано с сокращением продолжительности сушки, т.е. продолжительности теплового воздействия, а также равномерностью нагрева материала в процессе сушки и с возможно большим снижением влажности материала.

Во всех сушильных установках неподвижного слоя практически невозможно высушить пищевые растительные материалы до малых пределов остаточной влажности с сохранением высокого качества.

Для выработки сушеных картофеля, овощей, плодов и круп низкой остаточной влажности, высокой питательной ценности при минимальных затратах тепла необходимо обеспечить высокоразвитую поверхность испарения, равномерный нагрев материала до максимально допустимой температуры, сокращение продолжительности

сушки. Всем этим условиям отвечает сушка в раввитой стадии кипящего слоя, устраняющая недостатки процесса в плотном слое.

Исследована интенсифицированная сушка во вавешенном слое (в раввитой стадии кипящего слоя и в фонтанирующем слое) различных форм и размеров нарезанных картофеля, моркови, столовой свеклы, цикория, а также веленого горошка, лука, капусты, филофоры, яблок, айвы, груш, абрикосов, субтропической хурмы и круп: гречневой, перловой, рисовой, кукурузной, пшеничной, пшенной и гороха.

Исследования по сушке пищевых растительных материалов во вавешенном слое охватили влияние на процесс сушки различных факторов: Формы и размера нарезанных частиц, удельной нагрузки материала, первоначального влагосодержания материала, скорости, температуры и потенциала сушки нагретого воздуха. В каждом опыте обеспечивали на входе в рабочую камеру постоянную скорость, температуру и влажность нагретого воздуха. Исследование влияния одного из факторов на процесс сушки проходило при постоянном значении других факторов.

Влияние формы и размера частиц. Исследование сушки картофеля, овощей и плодов, нарезанных частицами равнообразной формы [шариками, кубиками, полукубиками, параллелепипедами, цилиндрами, кружками] и размеров показало, что лучшей формой резки являются кубики. На примере картофеля определено, что продолжительность сушки частиц в форме кубиков по сравнению с параллелепипедами одинакового с кубиками сечения, отличающимися только различной длиной, сокращается в 1,5-2,5 раза. Это происходит в результате увеличения поверхности на 19-36 % и иного характера движения кубиков в процессе сушки в кипящем слое: если параллелепипеды стремятся занять горизонтальное положение по отношению к потоку воздуха и совершают спокойные колебания, то кубики непрерывно вращаются вокруг своих осей. Благодаря этому происходит срыв пограничного слоя

испаряющейся влаги и процесс сушки кубиков протекает более интенсивно, чем параллелепипедов. Поэтому при сушке растительных пищевых материалов в развитой стадии кипящего слоя лучшей формой резки являются кубики или полукубики.

Экспериментально найдено, что отношение продолжительности сушки различных размеров частиц растительных материалов в форме кубиков приблизительно равно отношению их эквивалентных диаметров в степени 1,5.

Влияние скорости воздуха на процесс сушки. Исследование воздействия скорости сушильного агента на процесс сушки пищевых растительных материалов показало, что сушка в кипящем слое значительно ускоряется по сравнению с процессом в неподвижном слое благодаря максимальной поверхности испарения, так как каждая частица в кипящем слое омывается потоком нагретого воздуха со всех сторон и, кроме того, в результате непрерывного вращения и перемешивания частиц происходит срыв пограничного слоя испаряющейся влаги.

Скорость воздуха оказывает влияние на продолжительность сушки материала в кипящем слое только в периоде постоянной скорости сушки, но в периоде падающей скорости сушки уменьшение влажности материала практически не зависит от скорости воздуха, которая не воздействует на перемещение влаги внутри материала. Поэтому сушку пищевых растительных материалов следует проводить при минимальной скорости воздуха, обеспечивающей устойчивое движение и перемешивание частиц, т.е. развитую стадию кипящего либо фонтанирующего слоя.

Влияние удельной нагрузки материала на сушку растительных пищевых материалов в кипящем слое. Исследование воздействия первоначальной удельной нагрузки всех растительных пищевых материалов на продолжительность сушки проведено в диапазоне от 20 до 120 кг/м². Это исследование показало, что только в периоде постоянной скорости сушки наблюдается снижение скорости сушки при увеличении удельной

нагрузки, что объясняется уменьшением среднеинтегральных значений потенциала сушки нагретого воздуха. Удаление остаточной влаги, наиболее прочно связанной с материалом, в периоде падающей скорости сушки не зависит от величины удельной нагрузки материала. Общая продолжительность сушки этих материалов в развитой стадии кипящего слоя практически мало изменяется при величинах удельной нагрузки до определенных пределов, так как возрастание удельной нагрузки при прочих равных параметрах нагретого воздуха приводит к увеличению периода постоянной скорости сушки. Так, например, глубокая сушка кубиков цикория размером $10 \times 10 \times 10$ мм при снижении влагосодержания от 300 до 3 % при удельной нагрузке материала 30 кг/м^2 и 120 кг/м^2 продолжается соответственно 40 и 48 минут, т.е. возрастание первоначальной удельной нагрузки материала в 4 раза приводит к увеличению продолжительности сушки только на 8 минут - в 1,2 раза.

Сушка пшеничной крупы при снижении влагосодержания от 50 до 5 % при удельных нагрузках материала 20 кг/м^2 составляет 61 минуту и 120 кг/м^2 - 68 минут, т.е. возрастание первоначальной нагрузки материала в 6 раз увеличивает продолжительность сушки в 1,1 раза и т.д.

Определены оптимальные удельные нагрузки растительных пищевых материалов при сушке в развитой стадии кипящего слоя: $100-120 \text{ кг/м}^2$ картофеля, моркови, столовой свеклы, зеленого горошка, цикория, капусты, лука и всех круп; $60-80 \text{ кг/м}^2$ - всех плодов; 50 кг/м^2 - измельченной филофоры. Оптимальные удельные нагрузки материала при сушке в неподвижном слое в ленточных конвейерных и туннельных сушильных установках составляют $5-16,5 \text{ кг/м}^2$, т.е. в 4-12 раз меньше по сравнению с сушкой в кипящем слое. Это способствует повышению производительности сушильных установок кипящего

слоя по сравнению с применяемыми в промышленности установками неподвижного слоя.

Влияние первоначального влагосодержания материала на процесс сушки. Из пищевых растительных материалов только при сушке круп пищевого концентратного производства можно в широких пределах менять начальное влагосодержание материала, регулируя его количеством добавляемой воды при варке. Незначительные изменения начального влагосодержания картофеля, овощей и плодов происходят в самом сырье в результате климатических воздействий, сортовых признаков и при технологической подготовке их к сушке. Эти незначительные колебания не влияют на скорость сушки картофеля, овощей и плодов.

Исследование воздействия начального влагосодержания на процесс сушки проведено на перловой крупе. Вареную перловую крупу с начальным влагосодержанием 32 и 150 % сушили в развитой стадии кипящего слоя со скоростью воздуха 4,0 м/сек, первоначальной удельной нагрузкой 60 кг/м² при одинаковых значениях температуры и потенциала сушки нагретого воздуха соответственно в пределах 60-180°C и 28-121°C.

Это исследование показало, что продолжительность сушки более влажной крупы до конечного влагосодержания 10-5 % сокращается по сравнению с крупой меньшего начального влагосодержания в 1,3-2,4 раза в зависимости от температуры нагретого воздуха. Это явление можно объяснить тем, что при большем начальном влагосодержании в результате испарения влаги внутри зерен образуется больше пара, возрастает градиент давления, способствующий удалению влаги в конце сушки.

Повышение начального влагосодержания крупы перед сушкой способствует не только ускорению процесса, но и получению быстрорастворимого продукта.

Период постоянной скорости сушки пищевых растительных материалов. В периоде постоянной скорости сушки интенсивность процесса

определяется в основном параметрами сушильного агента, размерами и формой частиц, удельной нагрузкой материала. При низкотемпературной сушке этот период продолжается до тех пор, пока не испарится влага с поверхности, а при интенсифицированной сушке период постоянной скорости сушки продолжается и после того, как поверхность частиц становится сухой. При высокотемпературной сушке испарение происходит внутри частиц и образовавшийся пар удаляется в атмосферу через сухую пористую поверхность.

С повышением температуры и потенциала сушки нагретого воздуха значение величины критического влагосодержания понижается, т.е. увеличиваются границы влагосодержания материала в периоде постоянной скорости сушки. Эти границы в зависимости от вида материала могут составлять 50-300 %, а для некоторых материалов, например филофоры, при температуре сушильного агента 100-130°C весь процесс сушки проходит в периоде постоянной скорости сушки.

Установлено, что скорость постоянного периода сушки находится в линейной зависимости от потенциала сушки воздуха, массовой скорости воздуха, от величины, обратной удельной нагрузке материала, а также от комплекса - произведения этих величин.

Скорость постоянного периода сушки равнообъемных размеров частиц картофеля определяется единым уравнением:

$$N = 3,0 + 0,112 E \cdot U_F \frac{F}{M_c} \frac{S}{V} \frac{\%}{\text{мин}} \quad /33/$$

где S и V - соответственно поверхность и объем частиц.

Постоянные коэффициенты уравнения /33/ определены методом наименьших квадратов. Среднее квадратичное отклонение расчетных величин от опытных составляет $\pm 2,56$ (11,5 %). Это уравнение позволяет определить скорость постоянного периода сушки частиц картофеля любого размера при известной удельной нагрузке материала и параметрах сушильного агента.

Влияние температуры и потенциала сушки воздуха на процесс.

Глубокая сушка, химико-технологические изменения при сушке.

Решающее влияние на ускорение процесса сушки пищевых растительных материалов оказывает температура и потенциал сушки нагретого воздуха. В отличие от сушки в неподвижном слое, ограниченном верхним пределом температуры нагретого воздуха $60-80^{\circ}\text{C}$, при сушке термолабильных материалов в кипящем слое можно повысить температуру до $110-180^{\circ}\text{C}$ в зависимости от вида материала. Этому способствуют активное перемешивание и движение частиц, выравнивающее температуру нагретого воздуха и частиц. При сушке в развитой стадии кипящего слоя исключаются местные перегревы, так как каждая частица равномерно омывается потоком нагретого воздуха со всех сторон.

Применение повышенных температур нагретого воздуха значительно сокращает продолжительность сушки. Особенно важное значение имеет применение высоких температур сушильного агента при глубокой сушке растительных пищевых материалов, так как с понижением влажности сохранность сушеных продуктов значительно увеличивается. При низкотемпературной сушке в неподвижном слое практически невозможна глубокая сушка материалов с сохранением высокого качества продукта, так как на удаление остаточной влаги, наиболее прочно связанной с материалом, нужно затратить несколько часов, причем пределы низкотемпературной сушки ограничены равновесным влагосодержанием (около 6 %).

Некоторые авторы считают, что для получения высококачественного продукта картофель, овощи и плоды необходимо сушить при возможно низких температурах. Это противоречит истине. Низкотемпературная сушка всегда длительна (8 и более часов). Наши опыты показали, что при низких температурах сушильного агента нельзя ускорить процесс удаления влаги за счет повышения скорости либо уменьшения влажности воздуха. Эти факторы оказывают ускорение только в периоде постоянной скорости сушки. При удалении связанной влаги высокие скорости и низ-

кая влагоемкость воздуха практически не ускоряют процесса.

Порча продукта является следствием как температуры, так и продолжительности теплового воздействия. Результаты наших опытов показывают, что суммарная температура материала в течение всего процесса при высоких температурах нагретого воздуха значительно меньше, чем при умеренных температурах агента сушки. Например, для свеклы частицами 15x15x15 мм при сушке до остаточного влагосодержания 12 % с температурой сушильного агента 140°C суммарная температура будет 3200°C/мин, а с температурой 80°C - 5800°C/мин в 1,81 раза больше.

Кроме усиления температурного воздействия, вызывающего тепловую порчу продукта, в процессе длительной низкотемпературной сушки, создаются благоприятные условия для роста бактерий, плесени, повышается активность окислительных ферментов, поврежденных растительных тканей, что также приводит к ухудшению питательной ценности. Наоборот, значительное сокращение продолжительности сушки, следовательно, сокращение теплового воздействия, а также разрушение ферментной системы, создание губительных условий для развития микрофлоры способствует лучшему сохранению питательной ценности пищевых материалов при использовании повышенных температур агента сушки. Кроме того, низкотемпературная сушка является малоэффективной, приводит к увеличению затрат тепла на испарение влаги по сравнению с высокотемпературной сушкой в развитой стадии кипящего слоя.

В табл. 1 приведены опытные данные, показывающие продолжительность процесса обезвоживания в минутах различных пищевых растительных материалов при сушке их в развитой стадии кипящего слоя до стандартного и низкого влагосодержания при различных температурах воздуха.

Таблица 1

Материал	размер, мм	$W_1^c - W_2^c$	τ мин	при $t_{сх}^c$ °C	100	110	120	130	140	150	160
Картофель	8х8х8	410-15	283	190	135	96	70	42	31	30	22
" "	" "	410-8	380	240	166	106	75	44	32,5	31	23,5
Морковь	10х10х10	640-10	108	-	69,5	55	50	42	36	31,5	-
" "	" "	640-4	-	-	78,5	65	53,5	45	40	35	-
Цикорий	8х8х8	300-10	99	81	75	51	38	26	24,0	24	-
" "	" "	300-4	-	-	130	102	52	36	30	31	-
Зеленый горошек		300-14	114	96	80	41,5	34	21	18	14	12
Лук кружками $\delta = 3$ мм		550-10	58,5	33	24	20,5	18	17	14	11	8,5
" "	" "	550-4	66	53	34	24,5	22	20	15,5	13	10,5
Капуста кружки $\delta = 3$ мм		1400-10	63	48	44	25	21	19	16,5	-	-
" "	" "	1400-6	-	64	48	27	23	21	18	-	-
Филлофора		300-8	25	23	-	17	-	10,5	-	-	-
Хурма	20х20х20	440-20	175	150	120	-	90	72	64	-	-
" "	10х10х10	440-20	84	68	54	51	41	35	30	-	-
Гречневая крупа	60-10	54	38	35,5	33,5	23,5	17,5	15,5	12,5	-	-
" "	60-5	100	77,5	70,5	63	42	31	26	18	17	-

Данные табл. 1 показывают, что применение воздуха с температурами выше 120°C приводит к значительной интенсификации удаления остаточной влаги. Это объясняется перемещением ее внутри материала преимущественно в виде пара, испарением влаги внутри частиц, что приводит к возникновению градиента давления внутри материала. Поэтому при сушке в развитой

стадии кипящего слоя с применением температур нагретого воздуха 130-160°C картофель, овощи, крупы можно высушить до остаточного влагосодержания 1-2 % за короткий промежуток времени. Например, продолжительность сушки картофеля частицами 8х8х8 мм от начального влагосодержания 410 % до остаточного 2 % составляет при температурах нагретого воздуха 130°C - 59 минут, 140°C - 39 минут, 150°C - 38 минут, 160°C - 28,5 минут, 170°C - 25 минут.

Глубокая сушка по сравнению с обычной приводит к увеличению в несколько раз сроков хранения готового продукта.

Картофель, овощи, плоды относятся к числу коллоидно-капиллярно-пористых материалов и при обычной сушке в промышленных установках дают значительную усадку, уменьшаются в объеме в 3-4 раза. Усадка происходит в обоих периодах сушки.

Результаты наших исследований показали, что при сушке в кипящем слое с температурой воздуха меньше 100°C происходит равномерная усадка картофеля, тогда как при сушке в неподвижном слое усадка картофеля и других растительных материалов неравномерна, а сухой продукт приобретает искаженную форму.

При равномерной усадке изменение объема частиц в процессе сушки в кипящем слое с температурой нагретого воздуха ниже 100°C имеет линейную зависимость от влагосодержания картофеля и определяется полученными нами уравнениями:

для частиц в форме кубиков:

$$V = V_c (1 + W^c / 160) \quad /34/$$

для частиц в виде параллелепипедов:

$$V = V_c (1 + W^c / 100) \quad /35/$$

Среднее квадратичное отклонение уравнений /34/ и /35/ составляет $\pm 0,0234$ и $\pm 0,0325$.

В этих уравнениях V и V_c - соответственно объем частицы в любой момент сушки и при абсолютно сухом состоянии, см³.

При исследовании процесса сушки пищевых растительных материалов с температурами нагретого воздуха выше 105°C впервые было обнаружено, что частицы в процессе сушки не дают усадки, сохраняют свою первоначальную форму и объем, имеют пористое строение. Регулированием степени бланширования и температуры сушильного агента можно получить высушенный материал с сохранением первоначальной формы и объема частиц, либо с увеличенным объемом частиц, либо взорванные частицы.

Мелкопористое строение и лиофильность растительных тканей понижает парциальное давление водяного пара над сильно вогнутым мениском жидкости и уменьшает температуру кипения. При этом происходит интенсивное образование пара внутри частиц, волей испарения становится весь их объем. Образование большого количества пара при сушке в кипящем слое с температурами нагретого воздуха свыше 105°C способствует получению безусадочных частиц.

Пористое строение безусадочных частиц не препятствует удалению образовавшегося пара в окружающее пространство и тем самым ускоряет процесс сушки. Наоборот, усадка материала приводит к более плотному расположению клеток, уменьшению диаметра пор, затвердеванию поверхности, что снижает скорость перемещения влаги к поверхности частиц и увеличивает продолжительность сушки. Сохранение первоначальной формы и объема частиц возможно лишь в условиях сушки в развитой стадии кипящего слоя при равномерном нагреве частиц со всех сторон.

Для обоснования оптимальных режимов сушки изучали изменения органолептических и химико-технологических показателей некоторых исследованных материалов: картофеля, зеленого горошка, гречневой, рисовой, пшеничной и пшанной круп.

В работе приведены полные данные этих показателей и других исследованных материалов: лука, яблок, груш, айвы, абрикосов, субтропической хурмы, тиллофори, перловой крупы.

В таблицах содержание химических показателей даны в пересчете на сухие вещества.

Таблица 2.

$t_{вх}^c$	τ мин	Витамин С	мг/гг	потери	Коэффи-циент	Развари-ваемость, мин,
θ		после бланшир.	после сушки	%	набухае-мости	
<u>К а р т о ф е л ь 8 x 8 x 8 мм</u>						
60	448	33,05	18,6	43,6	2,96	12
80	283	31,1	24,7	20,6	2,85	14
100	135	34,6	28,6	17,3	3,04	26
120	70	33,9	30,0	11,5	3,26	24
140	31	9,52	8,23	13,6	3,48	5
150	30	9,14	7,78	14,8	3,36	5
160	22,5	9,29	5,16	44,4	3,44	5
<u>З е л е н ы й г о р о ш е к</u>						
70	177	77,5	44,25	42,8	1,78	16
80	133	59,8	42,2	29,3	1,63	18
100	86	76,0	61,5	19,0	1,73	18
120	37,5	61,6	58,0	6,2	2,04	10
140	18	55,7	51,4	7,6	2,28	5
150	16	54,6	46,6	14,8	2,6	9
160	14	54,73	45,4	17,1	2,87	6

Данные химико-технологических исследований показывают, что при сушке картофеля и зеленого горошка потери витамина С при температуре воздуха 110-150°C меньше по сравнению с температурами агента сушки 60-90°C и 160-180°C. Это объясняется значительным сокращением продолжительности и уменьшением теплового воздействия при температурах агента сушки 110-150°C. Применение температуры воздуха выше 160°C не рекомендуется из-за возможного подгорания продукта, так как температура нагрева этих материалов в конце сушки превосходит до-

Таблица 3

Крупы, параметры	$t_{вх}^{\circ}C$						
	80	100	120	150	160	170	180
Гречневая							
τ сушки мин до $W_2^c=10\%$	54	36,5	23,5	12,5	11	8	7
предельн.набу- хаемость, %	77,4	100,3	126,4	136	146,8	148	153
τ разваривания, мин	12	10	4	4	3	3	3
Белок, %	12,87	13,63	12,55	13,6	12,7	12,75	13,05
Рисовая							
τ сушки мин до $W_2^c=10\%$	38	36	24	15,5	13	8	7,5
предельн.набу- хаемость, %	158	165	-	162	160	200	200
τ разваривания, мин	7,5	6	5	4	6	6	5,5
Белок, %	7,83	8,07	8,2	7,61	7,01	7,15	8,1
Пшеничная							
τ сушки мин до $W_2^c=10\%$	46	31	24	10,5	7,5	6	-
предельн.набу- хаемость, %	146	233	244	252	255	253	-
τ разваривания, мин	7,5	7,5	7,5	7,0	7,0	6,0	-
Белок, %	15,68	16,88	15,63	16,08	16,12	16,02	-
Пшенная							
τ сушки, мин до $W_2^c=10\%$	41	32	21	13	12	11	-
предельн.набу- хаемость, %	132	160	120	185	148	149	-
Белок, %	12,55	11,45	12,35	13,8	11,9	12,5	-
Крахмал, %	66,7	65,8	70,5	-	-	-	-
Сахара, %	0,50	0,53	0,52	-	-	-	-

пустимую для зеленого горошка и картофеля.

При сушке круп в кипящем слое содержание белковых веществ, крахмала и сахаров практически не изменяется при разных температурных режимах сушки.

Коэффициент набухаемости является важным показателем качества сушеных пищевых материалов, так как определяет их способность восстано-
перво
новления начальных свойств при оводнении. Безусадочные частицы порис-

того строения отличаются большим значением коэффициента набухаемости и меньшей продолжительностью разваривания. Получение быстрорастворимых круп связано с увеличением гидротермической обработки и применением при сушке в кипящем слое сушильного агента с температурой 120-180°C. Равномерная кратковременная сушка при такой температуре способствует сохранению высокой питательной ценности продукта.

Оптимальная температура агента сушки при обволакивании картофеля в зависимости от сорта находится в пределах 110-150°C, зеленого горошка 130-140°C, моркови, цикория и столовой свеклы 140-160°C, лука и капусты 110-120°C, фиолетовых 90-110°C, яблок и айвы - 110-120°C, груш и абрикосов 90-100°C, субтропической хурмы 100-110°C, всех видов круп 160-180°C.

По окончании сушки крупы необходимо охладить до 20-22°C. В шахтных аппаратах "Эврика" охлаждение круп достигается за 40 минут, а в ленточных конвейерных установках за 10-15 минут.

Исследование охлаждения круп в развитой стадии кипящего слоя и аэрофонтанной экспериментальной сушильной установке при температуре воздуха +18-22°C, независимо от величины удельной нагрузки материала 20-120 кг/м² и температур материала от 110 до 150°C, показало, что продолжительность охлаждения составляет 2-3 минуты, т.е. в 4-13 раз сокращается по сравнению с процессом в неподвижном слое.

Использование подсушенных овощей в производстве овощных закусочных консервов. При изготовлении овощных закусочных консервов из обжаренных овощей происходят нежелательные физико-химические изменения растительного масла: разложение жира на составные части с образованием низкомолекулярных жирных кислот, перекисей, альдегидов, кетонов, увеличение кислотного числа и прогоркание, потемнение, увеличение вязкости, разрушение фосфатидов, витаминов и т.д. В результате этого пищевая ценность продукта снижается, наблюдаются значительные потери масла, нормируемые в пределах 6-8%.

Основным фактором, оказывающим наибольшее влияние на снижение

качества масла и потери его при обжаривании в паромасляных печах, является влага, удаляемая из овощей.

Исследования, проведенные нами по замене обжаривания овощей предварительным подсушиванием их, показали, что подсушивать овощи рациональнее в развитой стадии кипящего слоя. Если продолжительность сушки овощей при ведении процесса в неподвижном слое составляет 40-70 минут, то в кипящем слое 3-7 минут. Это позволяет установить сушильный аппарат кипящего слоя в технологическую линию производства овощных вакуумных сочных консервов, не нарушая поточности. Овощи, подсушенные в развитой стадии кипящего слоя, отличаются хорошей впитываемостью масла, частицы их сохраняют форму, размер, естественный цвет, плотную, упругую структуру. Подсушивание овощей в развитой стадии кипящего слоя происходит в периоде постоянной скорости сушки.

Разработаны оптимальные технологические параметры производства девяти видов овощезакусочных консервов из предварительно подсушенных овощей в кипящем слое. Выработанные консервы получили положительную оценку на расширенных дегустациях. Четыре вида овощезакусочных консервов получили одобрение на дегустационном совещании при центральной лаборатории консервной промышленности УкрГлавконсерва с участием представителей Министерства Здравоохранения УССР и Министерства торговли УССР и были рекомендованы для внедрения в промышленное производство.

Производство овощных закусок консервов из подсушенных овощей в развитой стадии кипящего слоя позволяет сократить потерю растительного масла с 8 до 1 % и сохранить его высокое качество. Годовой экономический эффект от внедрения этого метода на Одесском консервном комбинате составляет 23,1 тыс.руб.

В результате проведенных исследований по интенсификации сушки пищевых растительных материалов и математического описания процесса рассчитаны и спроектированы при моделировании отдельных узлов сушильные установки с активным гидродинамическим режимом: трехярусная установка непрерывного действия для сушки картофеля, овощей в развитой

стадии кипящего слоя ; комбинированная сушильно-охладительная установка для круп ; сушильные установки кипящего слоя для получения взорванного картофеля и для подсушивания овощей при выработке овощных ваку-сочных консервов.

Изготовленная и смонтированная на Дубновском овощесушильном заводе трехярусная установка непрерывного действия для сушки картофеля и овощей в сравнении с действующими ленточными конвейерными сушильными установками отличается большей производительностью по испаренной влаге в 1,3 раза; меньшими габаритами 6500х100х1150 мм против 15040х3750х4745 мм; меньшей рабочей поверхностью паровых калориферов.

Экономическая эффективность замены ленточной конвейерной сушильной установки КСА-80 сушильным аппаратом кипящего слоя на Дубновском овощесушильном заводе составляет 13,8 тыс.рублей в год.

Общие выводы

Для решения проблемы интенсификации сушки картофеля, овощей, плодов и круп, улучшения качества, повышения сроков хранения сушеных продуктов и снижения затрат тепла на процесс выполнено комплексное исследование по определению термодинамических параметров и теплофизических характеристик материалов как объектов сушки, тепло- и массообмена в процессе сушки, закономерностей гидродинамики, кинетики и технологии сушки пищевых растительных материалов в развитой стадии кипящего слоя.

1. Доказано, что активное движение и непрерывное перемешивание частиц при сушке в развитой стадии кипящего слоя обеспечивает максимальную поверхность испарения, равномерный нагрев, повышает пределы нагрева сушильного агента до 110-180°C в зависимости от вида растительного материала.

Применение повышенных температур нагретого воздуха значительно сокращает продолжительность сушки (в 4-12 раз) и уменьшает воздействие тепла (в 1,8-2 раза) по сравнению с низкотемпературной сушкой в неподвижном слое.

Кратковременная равномерная сушка при оптимальных температурах воздуха позволяет получить продукт высокого качества : значительно снижаются потери термолабильного витамина С , лучше сохраняются балки, не изменяется содержание крахмала, сахаров, жиров , витаминов В₁ и В₂, каротинов.

При этом образуются безосадочные частицы пористого строения, что способствует удалению образовавшегося внутри частиц пара, улучшению технологических свойств готового продукта : увеличивается набухаемость и снижается продолжительность разваривания.

2. Исследование глубокой сушки пищевых растительных материалов до остаточного влагосодержания 2-4 %, позволяющего увеличить сроки хранения сушеных продуктов в несколько раз по сравнению с обычной сушкой, показало , что в развитой стадии кипящего слоя при температуре сушильного агента 110°C до остаточной влажности 2 % сушка картофеля, моркови, цикория продолжается около 10 минут, капусты и лука 17-20 минут, а при оптимальных температурах воздуха 160-180°C сушка круп продолжается 6-10 минут.

3. Установлены закономерности кинетики сушки пищевых растительных материалов в развитой стадии кипящего и фонтанирующего слоя:

а) Лучшей формой резки картофеля, овощей и плодов являются кубики. Эта форма приводит к ускорению процесса сушки вследствие увеличения поверхности испарения и срыва пограничного слоя испаряющейся влаги за счет непрерывного вращения частиц вокруг своих осей.

б) Отношение продолжительности сушки этих материалов различных размеров частиц приблизительно равно отношению их эквивалентных диаметров в степени 1,5.

в) Указанные материалы следует сушить при минимальной скорости воздуха, обеспечивающей устойчивое движение и перемешивание частиц.

г) Оптимальные удельные нагрузки материала при сушке в развитой стадии кипящего слоя составляют от 50 до 120 кг/м² , что в 4-12 раз больше , чем в сушилках , применяемых в пищевой промышленности.

д) Повышение начального влагосодержания круп способствует ускорению разваривания продукта и увеличению скорости сушки за счет возникновения градиента давления и получения продукта пористого строения.

4. Определены основные закономерности тепло- и влагообмена в процессе сушки пищевых растительных материалов в развитой стадии кипящего слоя.

Доказана возможность применения метода приведенной скорости сушки Г.К.Филоненко для расчета продолжительности процесса в условиях интенсивной сушки пищевых растительных материалов до низких пределов влажности. Найдены значения постоянных коэффициентов всех видов исследованных материалов; получены расчетные уравнения, определяющие изменение коэффициентов A и B общего уравнения продолжительности сушки, а также критического влагосодержания материала, скорости постоянного периода в зависимости от параметров сушильного агента. Установленные закономерности и полученные уравнения являются дальнейшим развитием метода приведенной скорости сушки Г.К.Филоненко, позволяют достаточно просто, быстро и с высокой точностью решать уравнения продолжительности сушки.

5. В результате непосредственно замера температуры в центре и на поверхности частиц в процессе сушки в развитой стадии кипящего слоя установлены закономерности кинетики нагрева материала.

Доказано, что при интенсивной сушке с применением высоких температур воздуха замедляется рост температуры в центральных слоях за счет интенсивного испарения влаги во всем объеме материала.

Получены уравнения, определяющие зависимость критерия Ребиндера от количества удаляемой влаги в процессе сушки различных форм и размеров частиц картофеля, моркови, столовой свеклы, а также гречневой, кукурузной и перловой круп.

Установлено, что при высокотемпературной сушке в кипящем слое различных пищевых растительных материалов при удалении остаточной вла-
ги

существует единая зависимость критерия Рабиндера от влагосодержания (в пределах от 25 до 2-3 %) и получено уравнение /3-27/, отражающей эту зависимость.

Найденные зависимости позволяют рассчитать среднюю температуру материала и установить связь между тепло и массообменом в процессе сушки.

6. Установлены закономерности гидродинамики и границы кипящего и фонтанирующего слоев крупнозернистых частиц картофеля, овощей и круп различной формы, размеров и влагосодержания.

Сопротивление кипящего слоя не зависит от скорости воздуха и прямо пропорционально удельной нагрузке материала. Критическая скорость воздуха, соответствующая переходу слоя из неподвижного в кипящий и скорость воздуха, соответствующая развитой стадии кипящего слоя, не зависит от величины удельной нагрузки материала.

Получены уравнения в виде эмпирических и критериальных зависимостей, позволяющие рассчитать скорости воздуха, соответствующие возникновению развитой стадии кипящего слоя, скорости витания, начальной стадии фонтанирования и состоянию устойчивого фонтанирования крупнозернистых частиц равнообразных форм, размеров и влагосодержания пищевых растительных материалов.

7. Выявлена роль структурных и химико-технологических характеристик объектов сушки. Вопреки распространенному мнению установлено, что бланширование растительных пищевых материалов не всегда приводит к ускорению сушки.

Определены теплофизические характеристики: коэффициенты температуропроводности и теплопроводности исследованных пищевых растительных материалов в широком диапазоне изменения влажности и температуры. Обнаружено, что величины этих коэффициентов возрастают с увеличением температуры, а также при бланшировании картофеля и овощей и находятся в сложной зависимости от влагосодержания материала, что обусловле-

но изменениями структуры материала в процессе сушки.

Клейстеризация крахмала повышает коэффициент температуропроводности в 1,5-2,8 раза в зависимости от температуры.

8. Полученные термодинамические параметры влагопереноса растительных пищевых материалов характеризуются сложной зависимостью их от структуры, химического состава, влагосодержания и температуры материала. Для изучения влияния химического состава определены термодинамические параметры влагопереноса основных компонентов плодов и овощей: аморфной сахарозы, крахмала, пектина и клетчатки. С целью исследования влияния структуры найдены значения термодинамических параметров влагопереноса картофеля, безусадочного и получившего усадку. Это исследование показало, что при одинаковом влагосодержании сушеному картофелю без усадки свойственны более высокие значения потенциала влагопереноса и удельной изотермической влагоемкости. Получены уравнения, позволяющие рассчитать зависимость термоградиентного коэффициента и потенциала влагопереноса картофеля, а также потенциала влагопереноса клетчатки от влагосодержания.

9. В результате проведенных исследований по интенсификации сушки пищевых растительных материалов, а также математического описания процесса рассчитаны и спроектированы сушильные установки с активным гидродинамическим режимом для ряда пищевых растительных материалов: трехярусная установка непрерывного действия для сушки картофеля и овощей в развитой стадии кипящего слоя; комбинированная сушильно-охладительная установка для круп; сушильные установки кипящего слоя для получения взорванного картофеля и подсушивания овощей в производстве овощных вакуумных консервов.

10. Изготовлена и смонтирована на Дубновском овощесушильном заводе трехярусная установка непрерывного действия для сушки картофеля и овощей. В сравнении с действующими ленточными конвейерными сушильными установками она отличается большей производительностью

по испаренной влаге в 1,3 раза ; меньшими габаритами 6500x100x
x 4150 мм против 15040x3750x4745 мм ; меньшей рабочей поверх-
ностью аппарата в 10,6 раза ; вдвое меньшей поверхностью наг-
рева паровых калориферов.

Экономическая эффективность замены ленточной конвейерной
сушильной установки ИСА-80 сушильным аппаратом кипящего слоя на
Дубновском овощесушильном заводе составляет 13,8 тыс.рублей в год.

Основные положения диссертации изложены в следующих
работах :

Учебное пособие для вузов пищевой промышленности.

1. Г. К. Силоненко, М. А. Гришин, Л. М. Гольденберг, В. К. Коссек.

Сушка пищевых растительных материалов. Москва, издательство "Пищевая промышленность", 1971 г. (Из них около 50 % лично автора).

С т а т ь и :

2. М. А. ГРИШИН. Экспериментальное исследование вихревой сушки овощей. Инженерно-физический журнал, № 5, 1960.

3. М. А. ГРИШИН. Гидродинамика крупнозернистого материала в вихревом потоке воздуха. Инженерно-физический журнал, № 6, 1960.

4. Г. К. СИЛОНЕНКО, М. А. ГРИШИН. Вихревая сушка овощей. Пищевая промышленность (консервная, овощесушильная и пищевая концентратная), № 2, 1960.

5. М. А. ГРИШИН. Расчет процесса вихревой сушки овощей. Известия вузов. Пищевая технология, № 4, 1960.

6. Г. К. СИЛОНЕНКО, М. А. ГРИШИН, В. К. КОССЕК. Вихревой способ сушки казеина. Молочная промышленность, № 1, 1963.

7. М. А. ГРИШИН, В. К. КОССЕК. Вихревая сушка круп при производстве пищевых концентратов. Консервная и овощесушильная промышленность, № 4, 1964.

8. Г. К. СИЛОНЕНКО, М. А. ГРИШИН, В. К. КОССЕК. Определение характеристик массопереноса методом приведенной скорости сушки. Тезисы докладов Всесоюзного семинара-совещания "Характеристики массопереноса и методы их определения", 1966.

9. М. А. ГРИШИН, В. К. КОССЕК. Исследование кинетики сушки вареных круп. Пищевая промышленность (консервная, овощесушильная и пищевая концентратная), № 12, 1964.

10. М. А. ГРИШИН. Высокотемпературная вихревая сушка овощей. Сборник статей по пищевой промышленности, № 1, Киев "Техника", 1965.

11. М. А. ГРИШИН, А. К. МОЛЧАНОВ. Интенсификация сушки виноградных семян. Виноделие и виноградарство СССР, № 5, 1967.

12. М. А. ГРИШИН, А. Н. ГОЛОВИН, Н. М. БОЙДЫ. Использование черноморской филофоры для производства кормов. Харчова промисловість, № 1, 1966.

13. М.А.ГРИШИН. Сушка картофеля и других овощей в вихревом потоке воздуха (в кипящем слое). Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции по производству пищевых продуктов из картофеля. Минск, 1966.
14. М.А.ГРИШИН, Р.Р.ДЖИНДЖОЛИИ. Искусственная сушка субтропической хурмы. Труды Грузинского института субтропического хозяйства, 1968.
15. М.А.ГРИШИН, ХУСЕЙН ХАЛИМ. Сушка моркови и лука в развитой стадии кипящего слоя. Консервная и овощесушильная промышленность, № 6, 1968.
16. М.А.ГРИШИН, Р.Р.ДЖИНДЖОЛИИ. Интенсифицированная сушка субтропической хурмы. Известия вузов, Пищевая технология, № 3, 1968.
17. М.А.ГРИШИН. Сушка растительных пищевых материалов до низких пределов влажности. Тепло- и массоперенос. т.6, часть 2, Киев, 1968.
18. М.А.ГРИШИН. Сушка картофеля и других овощей в вихревом потоке воздуха (в кипящем слое). ЦИТИПищепром, Реферативный сборник "Научно-техническая информация" (консервы), № 10, 1968.
19. М.А.ГРИШИН. Высокотемпературная сушка вареных круп в кипящем слое. Перспективы развития пищевконцентратной промышленности и улучшения качества продукции. ЦИТИПищепром, М., 1969.
20. М.А.ГРИШИН, Т.Л.РОМАТОВСКАЯ, Р.Ц.ЯРОСИНСКАЯ. Производство овощевакуумных консервов из подсушенных овощей. Научно-технический сборник "Харчова промисловість", № 6, Киев, 1968.
21. М.А.ГРИШИН. Исследование вихревой сушки овощей, плодов и круп в развитой стадии кипящего слоя. Тезисы докладов Межвузовской научной конференции по новым физическим методам обработки пищевых продуктов. Воронеж, 1968.
22. М.А.ГРИШИН. Интенсификация сушки филлофорн. Использование гидро-биологических ресурсов Черного моря на корм сельскохозяйственных животных. Одесса, 1968.
23. М.А.ГРИШИН, А.К.МОЛЧАНОВ. Сушка виноградных семян в кипящем слое при осциллирующем режиме. Садоводство и виноградарство Молдавии, № 10, 1969.
24. М.А.ГРИШИН. Интенсификация сушки пищевых материалов овощесушильной пищевконцентратной и консервной промышленности. Материалы докладов. Секция III - Технология сушки. Всесоюзное научно-техническое совещание по новой технике и прогрессивной технологии в процессах сушки. М., 1969.
25. М.А.ГРИШИН. Сушка крупнозернистых пищевых материалов в развитой стадии кипящего слоя. Краткие доклады Всесоюзного научно-техни-

- ческого сообщения по исследованию процессов тепло- и массообмена в кипящем слое. Иваново, 1969.
26. М.А. ГРИШИН, Р.Р. ДЖИНДЖОЛИЯ. Исследование сушки субтропической хурмы. Тезисы докладов Всесоюзной Межвузовской конференции по термическим методам обработки при консервировании пищевых продуктов. Одесса, 1969.
27. М.А. ГРИШИН, Т.Л. РОМАТОВСКАЯ. Применение сушки овсей в кипящем слое при производстве овощезакусочных консервов. Тезисы докладов Всесоюзной Межвузовской конференции по термическим методам обработки при консервировании пищевых продуктов. Одесса, 1969.
28. М.А. ГРИШИН, А.К. МОЛЧАНОВ. Исследование процесса сушки семян томатов и перца в кипящем слое при осциллирующем режиме. Консервная и овощесушильная промышленность. № 10, 1969.
29. М.А. ГРИШИН, ЛАМ ТХИ БЭ НАМ. Сушка плодов в вихревом потоке после осмотического обезвоживания. Известия вузов, Пищевая технология, № 4, 1970.
30. М.А. ГРИШИН, Р.Ц. ЯРОСИНСКАЯ. Интенсификация сушки яблок и айвы. Консервная и овощесушильная промышленность. № 11, 1970.
31. М.А. ГРИШИН. Разработка конструкции сушильной установки для сушки крупнозернистых пищевых материалов в кипящем слое. Тезисы докладов Всесоюзного совещания "Создание высокоэффективных сушилок для многотоннажных производств", М., 1971.
32. М.А. ГРИШИН. Особенности применения метода приведенной скорости сушки в условиях интенсивных процессов тепло- и массообмена. Тепло- и массоперенос, т.6, Минск, 1972.
33. М.А. ГРИШИН. Исследование процесса сушки некоторых круп. Труды ВНИИЗ, 1972, вып. 74.
34. М.А. ГРИШИН, Р.Ц. ЯРОСИНСКАЯ. Сушка плодов в кипящем слое. "Известия вузов, Пищевая технология", № 2, 1972.
35. М.А. ГРИШИН, Л.З. ВАСИЛЕНКО, В.К. ВАСИЛЬЕВ. Ускоренная сушка цикория. Консервная и овощесушильная промышленность. № 7, 1972.
36. М.А. ГРИШИН. Исследование температуры материала в процессах сушки растительных пищевых материалов в кипящем слое. Сборник "Повышение эффективности и совершенствование процессов и аппаратов химических производств", Львов, 1973.
37. М.А. ГРИШИН, Л.Д. МАРИУПОЛЬСКАЯ. Период постоянной скорости сушки некоторых овощей. Сборник "Повышение эффективности и совершенствование процессов и аппаратов химических производств. Львов, 1973.

Доклады об основных положениях диссертации
сделаны на следующих конференциях и совещаниях:

1. П, III, IV Всесоюзное совещание по тепло- и массообмену, Минск, 1964, 1968, 1972.
2. Всесоюзный семинар-совещание: "Характеристики массопереноса и методы их определения", Москва, 1966.
3. Всесоюзная научно-техническая конференция "Перспективы развития пищевого концентратного производства", Москва, 1968.
4. Всесоюзная научно-техническая конференция по производству пищевых продуктов из картофеля и дикорастущего сырья. Минск, 1966.
5. Межвузовская конференция по новым физическим методам обработки пищевых продуктов. Воронеж, 1968.
6. Республиканская конференция "Использование гидробиологических ресурсов Черного моря", Одесса, 1968.
7. Всесоюзное научно-техническое совещание по новой технике и прогрессивной технологии в процессах сушки. Москва, 1969.
8. Всесоюзное научно-техническое совещание по исследованию процессов тепло- и массообмена в кипящем слое, Иваново, 1969.
9. Всесоюзная Межвузовская конференция по термическим методам обработки при консервировании пищевых продуктов. Одесса, 1969.
10. Всесоюзное совещание по созданию высокоэффективных сушилок для многотоннажных производств, Москва, 1971.
11. Всесоюзное научно-техническое совещание работников овощесушильной промышленности, Минск, 1971.
12. Республиканский семинар по изучению опыта производства сушеных овощей и картофеля влажностью 6-8 %. Ровно, 1971.
13. Республиканская научно-техническая конференция "Основные направления по ускорению темпов научно-технического прогресса на предприятиях потребительской кооперации Украины", Черкассы, 1973.
14. Республиканская конференция "Повышение эффективности и совершенствование процессов и аппаратов химических производств", Львов, 1973.
15. Ежегодные отчетные научные конференции Одесского технологического института пищевой и холодильной промышленности (1960-1969) и Одесского технологического института пищевой промышленности имени М.В. Ломоносова (1970-1972).