

Двтор едр.
Д 14

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ УССР

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

ДАККАК АБДУЛ МАЖИД ДИБ

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ ЛУКА И КОРНЕПЛОДОВ
В РАЗВИТОЙ СТАДИИ КИПЯЩЕГО СЛОЯ

Специальность 05.18.13 – Технология консервирования
пищевых продуктов

(Диссертация написана на русском языке)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Одесса – 1974

~~1974~~
МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ УССР

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

ДАККАК АБДУЛ МАЖИД ДИБ

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ ЛУКА И КОРНЕШЛОДОВ
В РАЗВИТОЙ СТАДИИ КИПЯЩЕГО СЛОЯ

Специальность 05.18.13 – Технология консервирования
пищевых продуктов

(Диссертация написана на русском языке)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

ОНАХТ 21.07.11
Исследование процесс



v012370

Одесса - 1974

V012370

Одесский технологический
институт пищевой промышлен-
ности имени М.В. Ломоносова

Работа выполнена в Одесском технологическом институте
пищевой промышленности имени М.В.Ломоносова.

Научный руководитель : Кандидат технических наук,
доцент М.А.ГРИШИН

Официальные оппоненты :

Доктор технических наук, профессор
А.Ф. ФАН-ЮНГ

Кандидат технических наук, доцент
В.А. ЗАГОРУЙКО

Ведущее предприятие -- Одесское производственное объеди-
нение консервной промышленности

Автореферат разослан "29" октября 1974 г.

Защита диссертации состоится 29 ноября 1974 года на
заседании Совета Одесского технологического института пище-
вой промышленности имени М.В.Ломоносова, ауд. 272.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке инсти-
тута.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные
печатью организации, просим направлять по адресу:
г.Одесса, 270039, ГСП-510, ул. Свердлова, 112.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ СОВЕТА
канд. технич. наук

Л.А.ЗАПОРОЖЕЦ

ВВЕДЕНИЕ

Овощи относятся к необходимым продуктам питания, обладают высокой пищевой и диетической ценностью, содержат почти все необходимые человеку элементы пищи в легко усвояемой форме. Большая влажность свежих овощей способствует развитию микроорганизмов и деятельности ферментов, химическому взаимодействию составных частей. В результате этого наблюдаются большие потери. Подсчитано, что свыше 30% урожая сочного растительного сырья пропадает в результате порчи.

К древнейшему способу консервирования относится сушка. В результате снижения влажности плодов и овощей до 8-14% прекращается развитие микроорганизмов, ферментативные и химические процессы и сушеные продукты сохраняются в течение длительного времени.

Сушеные продукты хранятся при обычных условиях и содержат питательные вещества в наиболее концентрированном виде по сравнению с продуктами других методов консервирования.

Сирийская Арабская Республика только в 1946 г. стала самостоятельным государством, а с 1963 г. встала на путь строительства социализма. В Сирии сейчас успешно развивается промышленность и сельское хозяйство. Ликвидация крупного частного землевладения, создание кооперативных и государственных предприятий в сельском хозяйстве способствует значительному подъему производства. В стране значительно увеличилось производство плодов и овощей, и в целях сохранения их появляется необходимость в консервировании и сушке их.

В Сирии издавна плоды и некоторые овощи подвергают солнечной сушке в кустарных условиях и на небольших предприятиях. Большая длительность сушки, зависимость ее от погодных условий не

обеспечивает хорошую питательную ценность и потребность в сушеных плодах и овощах. Поэтому в стране приступили к строительству овощесушильных заводов. Первый овощесушильный завод, введенный в эксплуатацию в 1968 г., предназначен для производства сушеного лука и овощей. Сушка овощей на этом заводе осуществляется на сушильных установках французской линии "Серматек". Эти установки аналогичны по конструкции применяемым в Советском Союзе пятиленточным конвейерным сушильным установкам типа СПК-4Г-90.

По рекомендации фирмы сушильная установка работает при низких температурах нагретого воздуха над лентами 40-55°C, поэтому продолжительность сушки лука до влажности 7-8% составляет более 6 часов, т.е. на 1,5-2 часа больше, чем на ленточных конвейерных сушильных установках Советского Союза, где применяют более высокие температуры агента сушки.

Все конструкции ленточных сушильных установок, как и другим аппаратам с неподвижным слоем материала, свойственны существенные недостатки. Ограниченная скорость воздуха до 0,5 м/с приводит к неравномерной сушке из-за неодинакового нагрева материала. Поэтому температура воздуха в этих установках не превышает 80°C, что приводит к длительной сушке, к незначительным удельным нагрузкам материала (5 - 16,5 кг/м²) и снижает производительность сушильных установок.

Улучшение качества сушеных овощей определяется сокращением продолжительности сушки, уменьшением теплового воздействия на материал, а также зависит от равномерности нагрева материала и степени снижения влажности материала в процессе сушки. Чем ниже влажность сушеных овощей, тем медленнее протекают ферментативные и химические процессы, тем лучше и дольше сохраняются они.

В данной диссертационной работе проведено исследование кинетики и технологии сушки лука, моркови, столовой свеклы и

пастернака в развитой стадии кипящего слоя. Непрерывное турбулентное движение и перемешивание частиц при этом методе сушки способствует равномерному нагреву максимальной поверхности контакта, что позволяет применить более высокие температуры агента сушки, значительно повышает удельные нагрузки материала в несколько раз, сокращает продолжительность процесса по сравнению с сушильными установками неподвижного слоя, позволяет произвести глубокую сушку овощей до остаточного содержания влаги 2-4% с сохранением высокого качества готового продукта.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов и приложения.

В первой главе рассматриваются лук и корнеплоды как объекты сушки. Здесь приводятся данные литературы по строению и химико-технологическим свойствам лука, моркови, столовой свеклы и пастернака. Приведены данные по теплофизическим свойствам плотности, удельной теплоемкости, коэффициентам температуропроводности и теплопроводности исследованных объектов в широком диапазоне, изменения влагосодержания и температуры материала. Рассматриваются равновесное влагосодержание и термодинамические параметры влагопереноса исследуемых овощей.

Вторая глава посвящена современным методам сушки лука и корнеплодов и задачам исследования.

В третьей главе приведены данные по технике и методике исследования сушки лука и корнеплодов в кипящем слое.

В четвертой главе приведены данные по исследованию кинетики и технологии сушки лука, моркови, столовой свеклы и пастернака в развитой стадии кипящего слоя. Здесь рассмотрены вопросы гидродинамики кипящего слоя нарезанных частиц овощей, тепло- и массообмена в процессе сушки лука и корнеплодов в развитой стадии кипящего слоя, приведены результаты исследования техноло-

гии сушки указанных материалов в развитой стадии кипящего слоя.

Эта работа выполнена на кафедре технологии сушки Одесского технологического института пищевой промышленности им. М. В. Ломоносова.

Лук и корнеплоды как объекты сушки

Лук, морковь, столовая свекла и пастернак, как и другие растительные материалы, отличаются от химических, строительных, топливных и других материалов неживой природы клеточным строением и сложным переменным химическим составом. Изменение химического состава и строения тканей связано с различием видов и сортов, степенью зрелости, а также с климатическими и почвенными особенностями выращивания их.

Вода в цитоплазме растительной клетки находится в виде коллоидных растворов, образует эмульсии с растворенными веществами, находится в соединении с другими химическими элементами клетки. Такую влагу удалить труднее, чем свободную. Кроме того, снаружи клетка окружена трехслойной наружной оболочкой, каждый структурный элемент ее — полупроницаемыми мембранами. Наружная клеточная оболочка и мембраны делят клетку на замкнутые отдельные объемы водной фазы и удаление влаги из них требует преодоления полупроницаемости мембран, что замедляет диффузию влаги внутри материала.

В литературе отсутствуют данные зависимости коэффициентов температуропроводности от влагосодержания материала. В. З. Жадаш приводит данные по определению теплофизических характеристик некоторых свежих плодов и овощей, не подвергнутых сушке, тепловой и механической обработке. А. Н. Вышелесский и М. А. Громов определяли теплофизические характеристики очищенных и неочищенных картофеля, моркови и свеклы с учетом изменения их в процессе варки и обжаривания в пределах изменения влажности от 40 до 80%, что

недостаточно при производстве сушеных овощей. И.Т.Кретов и А.И. Плешков определили теплофизические коэффициенты лука, свеклы и моркови при одной начальной влажности, не рассматривая их изменения при сушке.

В лаборатории кафедры технологии сушки Одесского технологического института пищевой промышленности имени М.В.Ломоносова под руководством М.А.Гришина определили теплофизические коэффициенты пищевых растительных материалов в том числе лука, моркови, столовой свеклы в широком диапазоне изменений влагосодержания от сухого до влажного состояния материала и температуры до 75°C . В работе приводятся табличные данные коэффициентов температуропроводности лука, моркови, свеклы при различных влагосодержаниях и температурах материала.

Анализируя эти данные, можно сделать выводы: 1. С повышением температуры материала величины коэффициентов температуропроводности и теплопроводности лука, моркови и свеклы возрастают. 2. Величина коэффициента температуропроводности неравномерно увеличивается с понижением влагосодержания лука и моркови и несколько уменьшается у свеклы. 3. Бланширование моркови и свеклы приводит к увеличению значения коэффициента температуропроводности. 4. Плотность лука, моркови и свеклы, высушиваемых в развитой стадии кипящего слоя при температурах агента выше 105°C с понижением влагосодержания уменьшается. Это объясняется пористым строением безусадочных частиц. 5. Величина коэффициента теплопроводности уменьшается в процессе сушки при уменьшении влагосодержания.

Установлены значения гигроскопического влагосодержания — равновесного влагосодержания при относительной влажности воздуха 100% — верхнего предела равновесного состояния материала: лука 53–90%, свеклы 80–100%, моркови 47–80%. Колебания связа-

ны с изменениями температуры. С повышением температуры величина гигроскопического влагосодержания уменьшается. В работе приведены табличные данные равновесного влагосодержания и термодинамических параметров влагопереноса лука, моркови и свеклы: удельной изотермической влагоемкости и термоградиентного коэффициента в зависимости от относительной влажности воздуха (в пределах 10–90 %), полученные из данных литературы Л.М.Никитиной, Г.К.Филоненко, М.А.Гришина, А.И.Чуприны и М.З.Захарчевой и А.И.Странд-кева.

При обработке этих данные получены значения экспериментального потенциала влагопереноса исследуемых овощей в зависимости от величины равновесного влагосодержания при различных температурах. Линейные зависимости между потенциалом влагопереноса и влагосодержанием выражается полученными уравнениями:

$$\text{для лука при температуре } 30^{\circ}\text{C} : \quad \theta = 335 U_p \quad (1)$$

$$\text{для моркови при температуре } 20^{\circ}\text{C} : \quad \theta = 4 + 138 U_p \quad (2)$$

$$\text{для моркови при температуре } 37^{\circ}\text{C} : \quad \theta = 10,5 + 138 U_p \quad (3)$$

Среднее квадратичное отклонение расчетных величин от опытных уравнений (1) $\pm 1,42$ (3,45%), (2) $\pm 0,3$ (1,1%), (3) $\pm 1,35$ (4,05%).

Современные методы сушки лука и задачи исследования

Современная теория сушки разработана советскими учеными А.В.Лыковым, Г.К.Филоненко, П.Д.Лебедевым, С.М.Липатовым, П.А.Решиндером, А.А.Гухманом, П.Г.Романковым, В.В.Красниковым, Ю.А.Михайловым, И.М.Федоровым, Б.М.Смольским, А.С.Гинзбургом, О.А.Кременевым, Э.И.Гуйго, Ю.Л.Кавказовым и др.

В диссертации прорецензированы работы Г.В. фон Лезеке, Ф.И. Ковальчука, В.В.Крюсса, А.А.Бильневича, Н.Д.Волика и Т.Н.Насаки-

на, С.А.Генина, В.Д.Корчагина, Н.С.Рыбина, Е.Н.Волкова и Т.И.Пятигорской, Л.Н.Бугровой, И.Т.Кретьева и А.И.Плешкова, Х.А.Левигера, А.Л.Дюфо, Н.Х.Эйзенхардта, Г.Д.Саравакоса и Чама С.Е., В.Б.Ван Арсдела, А.Р.Рахмана, Е.Рольфа, М.Захарчевой и А.Странджева, Р.Ф.Кейна, Ф.Шимазу и др., Ф.К.Слейда, в которых отражены вопросы технологии сушки плодов и овощей, либо процессы сушки в неподвижном слое, либо теоретические обоснования сушки пищевых материалов в неподвижном слое, либо аппаратное оформление сушки овощей в неподвижном слое, либо результаты испытаний ленточных конвейерных сушильных установок.

Некоторые авторы – Г.В.Лезеке и А.Л.Дюфо – считают, что для получения сушеных овощей высокого качества необходимо применять при сушке возможно низкие температуры воздуха порядка 45–60°C. Однако, низкотемпературная сушка всегда длительна (продолжительность сушки мелконарезанных овощей до стандартной влажности 12–1 % составляет более 8 часов). Опыты М.А.Гришина показали, что при низких температурах агента сушки нельзя ускорить процесс обезвоживания за счет повышения скорости, либо уменьшения влажности воздуха. Эти факторы оказывают ускорение только в периоде постоянной скорости сушки.

Тепловая порча продукта является следствием как температуры, так и продолжительности теплового воздействия. Исследования М.А.Гришина и наши опыты показали, что суммарная температура при высоких температурах воздуха значительно меньше, чем при умеренных температурах агента. Кроме того, в процессе длительной низкотемпературной сушки создаются оптимальные условия для роста бактерий, плесеней, повышается ферментативная активность, что также приводит к ухудшению качества сушеных овощей. Низкотемпературная сушка приводит к увеличению затрат тепла на испарение влаги по сравнению с высокотемпературной сушкой.

Исследованию интенсификации процесса сушки овощей посвящены работы М.А.Гришина, И.Ф.Пикуса, А.И.Плешкова, З.А.Кац, А.П.Рысина, В.М.Кравченко, З.Ю.Мазяка, В.Е.Добромирова, Д.Ф.Фаркаса и М.Д.Лазара и др.

Анализируя данные обзора материала, можно сделать следующие краткие выводы.

В литературе не отражены работы по интенсификации сушки белых кореньев и лука, а имеющиеся сведения по интенсифицированной сушке моркови и свеклы не вскрывают в полной мере механизм сушки. Так, например, в этих работах не имеется сведений о расчете продолжительности сушки, о кинетике нагрева материала в процессе сушки, противоречивы сведения о влиянии удельной нагрузки в процессе сушки овощей в кипящем слое. Одни авторы утверждают, что продолжительность и скорость сушки овощей в кипящем слое пропорциональна величине удельной нагрузки материала. Другие авторы определили, что удельная нагрузка материала практически не влияет на продолжительность и скорость сушки в периоде падающей скорости сушки, в основном определяющим общую продолжительность сушки.

Противоречивы также сведения о характере процесса сушки: одни авторы утверждают, что сушка овощей протекает только в периоде падающей скорости сушки, другие — определили оба периода сушки овощей.

В связи с этим намечены следующие задачи работы:

I) Исследовать кинетику и тепло-массообмен в процессе сушки лука, моркови, столовой свеклы и пастернака в развитой стадии кипящего слоя:

а) изучить в широком диапазоне влияние формы и размера частиц, удельной нагрузки материала, скорости, температуры и потенциала сушки нагретого воздуха на процессе сушки указанных

овощей в развитой стадии кипящего слоя;

б) исследовать кинетику нагрева овощей в процессе сушки в кипящем слое, установить закономерности тепло- и массообмена в процессе обезвоживания;

в) получить надежные расчетные уравнения: 1) продолжительности сушки исследованных овощей до любого конечного влагосодержания; 2) температуры материала в любой момент сушки.

2. Определить изменения химико-технологических и органолептических показателей овощей в процессе сушки их в кипящем слое.

3. Исследовать процесс сушки лука, моркови, столовой свеклы и пастернака до возможно низких процессов остаточного влагосодержания.

Техника и методика исследования сушки лука и корне- плодов в кипящем слое

Экспериментальная установка состоит из центробежного вентилятора высокого давления, нагревательной камеры и рабочей камеры, соединенных трубопроводами. Нагрев воздуха производится тремя электрическими спиралями общей мощностью 24 квт. Регулирование температуры воздуха с точностью $\pm 1^\circ\text{C}$ осуществляется автоматически электронным регулятором. Центробежный вентилятор производительностью 550 м^3 воздуха в час и напором 8000 Па установлен после нагревательной камеры. Нагнетаемый вентилятором нагретый воздух определенной температуры по трубопроводу диаметром 100 мм подается в съемную рабочую камеру. Рабочая камера прямоугольной формы сечением 100×100 мм и высотой 400 мм с торцов ограничена съемными сетками, изготовлена из алюминия. Одна сторона рабочей камеры стеклянная — для визуальных наблюдений, имеет деления для фиксирования высоты слоя. Крепление камеры к трубопроводу фланцевое. Необходимая плотность соединения камеры с воздухопроводом

обеспечивается двумя спиральными пружинами. Регулирование скорости воздуха производится кассетным шибером. Измерение скорости осуществляется нормальной острой диафрагмой, соединенной датчиком с микроманометром ММН.

Овощи перед сушкой чистили, резали на частицы строго определенной формы и размера (лук — кружки толщиной 3–5 мм), частицы моркови и свеклы бланшировали паром и промывали.

Перед началом опыта устанавливался заданный режим работы: строго определенные температура и потенциал сушки воздуха на входе в рабочую камеру и скорость воздушного потока, которые на протяжении опыта не изменялись.

В процессе сушки через интервалы 2,3 либо 5 минут в начале сушки, затем через 10 и 15 минут производили замеры массы материала, фиксирование скорости воздуха, сопротивления и высоты слоя, температуры воздуха "сухим" и "мокрым" термометрами на входе в рабочую камеру и выходе из нее.

Измерение массы материала в процессе сушки производили взвешиванием рабочей камеры с материалом на весах типа ВЦН с ценой деления 2 г. Продолжительность взвешивания составляла 6–9 сек. Влажность сухого продукта определялась стандартным методом. По известной влажности и изменению массы материала в процессе сушки строили кривые сушки для каждого опыта.

Контроль изменения влажности материала осуществляли по величине сопротивления слоя. Сопротивление кипящего слоя материала не зависит от скорости воздуха и определяется величиной удельной нагрузки материала. Уменьшение массы материала в процессе сушки приводит к снижению величины сопротивления слоя.

Температура материала в процессе сушки имеет решающее влияние на качество готового продукта, поэтому при сушке необходимо

строго контролировать и регулировать ее. Непосредственное измерение температуры внутри частиц в условиях непрерывного хаотического движения и перемешивания их при сушке в кипящем слое вызывает большие затруднения. Определение температуры материала проводили по методике, разработанной М.А.Гришиным. Температуру в центре частиц моркови, свеклы и пастернака замеряли тонкими хромель-капелевыми термопарами диаметром 0,18 мм. Три термопары длиной 400 мм закрепляли на верхней сетке рабочей камеры, спай термопар вводили в центры трех частиц и закрепляли их тонкими проволоками. Контрольные частицы с закрепленными термопарами большой длиной свободного конца (400 мм) находились в одинаковых условиях с другими частицами: совершали непрерывное хаотическое движение на определенной высоте, обменивались импульсами ударов с другими частицами. Скоростная киносъемка подтвердила равнозначность гидродинамических условий контрольных и окружающих частиц в процессе сушки в кипящем слое.

Двумя термопарами, на слои одной из них надевали чехол из пористой керамики, смачиваемой дистиллированной водой, измеряли температуру воздуха внутри слоя материала по "сухому" и "мокрому" термометрам. Остальные семь термопар с открытыми слоями закрепляли в разных зонах рабочей камеры для замера температуры поверхности частиц материала. Измерение поверхности частиц производили через каждые 2,5 минуты в момент взвешивания рабочей камеры, при котором исключалось влияние нагретого воздуха, так как камера в момент взвешивания находилась вне сушильной установки.

Все температуры непрерывно записывались на ленточной диаграмме автоматического потенциометра ПСР I-20 с погрешностью $\pm 0,5\%$. Для определения оптимальных режимов сушки исследовали изменение химико-технологических показателей в процессе подготов-

ки и сушки овощей. Развариваемость и набухаемость сушилльных овощей определяли по ГОСТ 13340-67, кинетику набухания исследовали на приборе Догадкина.

Сахара определяют по методу Бертрана, общий азот — минерализацией навески по методу Кьельдаля.

При определении витамина С в виде свободной, связанной и дегидроаскорбиновой кислоты навеску материала экстрагировали 1% раствором соляной кислоты и 2% раствором метафосфорной кислоты. В неокрашенных луке и пастернаке витамин С определяли прямым титрованием краской 2-6 дихлорфенолиндофенола, а в окрашенных моркови и столовой свекле йодометрическим методом.

Витамины B_1 и B_2 определяли флуорометрическим методом. Гидролиз тиамина производили 0,1 N раствором серной кислоты с последующей обработкой препаратом *Asp. oguzae*. В качестве абсорбента использовали смолу СДВ - 3.

Каротин определяют модифицированным колориметрическим методом Мурри.

Тепло- и массообмен в процессе сушки лука и корнеплодов в развитой стадии кипящего слоя

Дифференциальные уравнения переноса тепла и влаги в процессе сушки влажных материалов, впервые сформированные А.В.Лыковым, до настоящего времени практически не разрешены. Это связано с тем, что теплофизические коэффициенты, термодинамические параметры влагопереноса, коэффициенты диффузии и термодиффузии, градиенты влагосодержания и термовлагопроводности являются переменными величинами в процессе сушки, находятся в сложной зависимости от переменных температур и влагосодержания материала. При сушке овощей, как и других растительных материалов, эти параметры, кроме того, зависят от изменений химического состава и строения

тканей, обусловленных различием видов и сортов, степени зрелости, погодными и почвенными условиями выращивания их, а также способами сушки и параметрами агента.

Количественные закономерности процесса сушки овощей в развитой стадии кипящего слоя нами установлены применением метода приведенной скорости сушки Г.К.Филоненко. Этот метод исключает влияние параметров агента сушки и уравнения скорости и продолжительности сушки, полученные в результате исследования процесса на опытных стендах, могут быть использованы в инженерных расчетах производственных сушильных установок.

Общее уравнение продолжительности сушки:

$$\tau = \frac{1}{N} \left[(W_1 - W_k) + A \int_{w_2}^{w_k} \frac{dW}{(W - W_p)^m} + \beta (W_k - W_2) \right] \quad (4)$$

Показатель степени m является для данного материала постоянной величиной, не зависит от параметра агента сушки, ни от способа сушки, ни от формы и размера частиц, он характеризует энергию связи влаги с материалом. В результате обработки опытных данных по сушке лука, моркови, столовой свеклы и пастернака подтверждено, что показатель степени $m = 1$, как и для других овощей. Тогда уравнение продолжительности сушки (4) примет более простой вид:

$$\tau = \frac{1}{N} \left[(W_1 - W_k) + A \cdot 2,3 \lg \frac{W_k - W_p}{W_2 - W_p} + \beta (W_k - W_2) \right] \quad (5)$$

Коэффициенты A и β уравнения (5) определяются из экспериментальных данных. Методика определения этих коэффициентов приведена в работе.

Результаты наших исследований подтвердили вывод, что коэффициенты A и β являются массообменными характеристиками, определяющими перемещение влаги внутри материала в периоде па-

дающей скорости сушки и зависят как от размера и формы частиц, т.е. от длины пути перемещаемой влаги, так от температуры и потенциала агента сушки, характеризующих фазовое состояние перемещаемой влаги.

При сушке лука, моркови, столовой свеклы и пастернака в кипящем слое величины коэффициентов A и β определяются уравнениями:

$$A = c - dE \quad (6)$$

$$\beta = eE - f \quad (7)$$

Коэффициенты c, d, e, f зависят от вида материала, размера и форм частиц, их значения приведены в работе. Относительные средние квадратические отклонения опытных данных от расчетных составляют $\pm 1,37-17,7\%$.

Коэффициенты A и β при сушке лука и корнеплодов частиц определенного размера и формы в развитой стадии кипящего слоя определяются только величиной потенциала сушки E воздуха и не зависят от скорости воздуха и удельной нагрузки материала, так как эти параметры не влияют на скорость и продолжительность процесса в периоде дающей скорости воздуха.

В результате экспериментального исследования установлено, что скорость постоянного периода сушки N лука и корнеплодов прямо пропорциональна потенциалу сушки E и массовой скорости воздуха $v\rho$ и обратно пропорциональна удельной нагрузке абсолютно сухого материала $\frac{M_c}{F}$:

$$N = a + b \cdot E \cdot v\rho \cdot \frac{F}{M_c} \quad (8)$$

В работе приведены значения коэффициентов a и b , зависящих от вида материала, формы и размера частиц.

Относительные среднеквадратичные отклонения опытных данных от расчетных значений составляют $2,5-9,3\%$.

Введением дополнительного отношения поверхности частиц S к их объему V в уравнении (8) получены единые уравнения скорости постоянного периода сушки для всех размеров частиц моркови, столовой свеклы и пастернака:

$$N = n + p E \cdot v p \cdot \frac{F}{M_c} \cdot \frac{S}{V} \quad (9)$$

Коэффициенты n и p соответственно равны: для моркови 16 и 0,186; столовой свеклы 13 и 0,123; пастернака 6,5 и 0,1. Средние квадратичные отклонения расчетных частиц от опытных данных составляют: для моркови $\pm 6,5$ (12,8%), свеклы $\pm 3,85$ (10,7%) и пастернака $\pm 1,95$ (8,5%).

Критическое влагосодержание W_k , определяющее границу между периодами постоянной и падающей скорости сушки, при сушке лука и корнеплодов в развитой стадии кипящего слоя с повышением температуры агента уменьшается и находится в линейной зависимости от потенциала сушки нагретого воздуха:

$$W_k = k - \ell E \quad (10)$$

Коэффициенты k и ℓ определяются видом материала, размером и формой частиц, причем величины коэффициента " k " близки к значению начального влагосодержания материала. В работе приведены значения этих коэффициентов для всех исследованных овощей, форм и размеров частиц.

Относительное среднее квадратичное отклонение расчетных значений от опытных составляет 0,4-12,7%.

Установленные зависимости (6-10) позволяют просто и с достаточно высокой степенью точности решить основное уравнение продолжительности сушки (5) всех исследованных овощей.

В результате непосредственного замера температуры материала установлены основные закономерности кинетики нагрева лука,

с VCO 12 3 70

моркови, столовой свеклы и пастернака в развитой стадии кипящего слоя.

Исследование показало, что для всех материалов независимо от размера частиц с повышением температуры агента возрастает разность температур между центральными и периферийными слоями частиц в течение всего периода сушки. Это связано с тем, что центральные слои материала нагреваются медленнее при сушке с более высокими температурами воздуха ($100-160^{\circ}\text{C}$) по сравнению с низкотемпературной сушкой ($60-90^{\circ}\text{C}$). При интенсивной сушке с применением высоких температур воздуха ($100-160^{\circ}\text{C}$) происходит испарение влаги во всем объеме частиц, на которое затрачивается основное тепло агента сушки, поэтому в момент интенсивного испарения наблюдается период постоянной температуры в центре частиц.

Среднеобъемную температуру материала в любой момент сушки рассчитывают определением зависимости критерия Ребиндера от удаляемой влаги. В результате проведенного исследования определены значения и установлены зависимости критерия Ребиндера от удаляемой влаги. Если при сушке с умеренными температурами нагретого воздуха ($60-100^{\circ}\text{C}$) наблюдается одна линейная зависимость логарифма критерия Ребиндера ($\lg Rb$) от удаляемой влаги, то при высокотемпературной сушке ($110-160^{\circ}\text{C}$) на графике зависимости от удаляемой влаги начиная с влагосодержания 25-33% появляется вторая зависимость.

Это объясняется тем, что при высокотемпературной сушке замедляется и прекращается рост температуры материала в периоде интенсивного испарения, но в конце сушки, когда основная влага удалена, происходит быстрый нагрев материала.

В результате обработки экспериментальных данных получены уравнения для всех размеров и форм частиц:

А) При сушке в диапазоне температуры воздуха $60-100^{\circ}\text{C}$ во

всех пределах влагосодержания материала и при температурах воздуха 110–160°C в пределах влагосодержания от начального до 25% для моркови, 33% для пастернака, 30% свеклы и лука:

$$1) \text{ Для моркови: } \lg R_b = 0,144 (U - U_p) - 1,782 \quad (11)$$

$$R_b = -0,0165 \exp [0,3316 (U - U_p)] \quad (12)$$

Среднее квадратичное отклонение опытных данных от расчетных составляет $\pm 0,147$ (7,9%).

$$2) \text{ Для свеклы: } \lg R_b = 0,224 (U - U_p) - 2,053 \quad (13)$$

$$R_b = -0,00885 \exp [0,516 (U - U_p)] \quad (14)$$

Среднее квадратичное отклонение расчетных величин от опытных составляет 0,0775 (4,3%).

$$3) \text{ Для пастернака: } \lg R_b = 0,243 (U - U_p) - 1,935 \quad (15)$$

$$R_b = -0,0116 \exp [0,56 (U - U_p)] \quad (16)$$

Среднее квадратичное отклонение расчетных величин от опытных составляет $\pm 0,227$ (13,4%).

$$4) \text{ Для лука: } \lg R_b = 0,164 (U - U_p) - 1,907 \quad (17)$$

$$R_b = -0,0124 \exp [0,378 (U - U_p)] \quad (18)$$

Среднее квадратичное отклонение расчетных величин от опытных составляет $\pm 0,263$ (15,7%).

Б) При высокотемпературной сушке при удалении остаточной влаги в диапазоне влагосодержания: 25–2% моркови, 30–2% свеклы и лука и 33–2% пастернака (равновесное влагосодержание при высокотемпературной сушке $U_p = 0$).

$$1) \text{ Для моркови: } \lg R_b = -0,3 - 4,8 U \quad (19)$$

$$R_b = 0,5 \exp (-11,15 U) \quad (20)$$

Среднее квадратичное отклонение расчетных величин от опытных составляет $\pm 0,13$ (10,7%).

$$2) \text{ Для свеклы: } \lg R_b = 0,43 - 8,47 U \quad (21)$$

$$R_b = 2,69 \exp (-19,5 U) \quad (22)$$

Среднее квадратичное отклонение расчетных величин от опытных составляет $\pm 0,158$ (9,8%).

$$3) \text{ Для пастернака: } \lg Rb = -0,984 - 2,645 U \quad (23)$$

$$Rb = 0,104 \exp(-6,11 U) \quad (24)$$

Среднее квадратичное отклонение расчетных величин от опытных составляет $\pm 0,238$ (14,2%).

$$4) \text{ Для лука: } \lg Rb = -0,693 - 3,7 U \quad (25)$$

$$Rb = 0,203 \exp(-8,53 U) \quad (26)$$

Среднее квадратичное отклонение расчетных величин от опытных составляет $\pm 0,1515$ (11,1%).

По уравнениям (II-26) можно рассчитать среднеобъемную температуру всех исследованных материалов в процессе сушки их в развитой стадии кипящего слоя. Эти уравнения показывают, что величины критерия Ребиндера при сушке овощей в кипящем слое определяется только влажностью материала и не зависит от параметров агента сушки, удельной нагрузки материала, формы и размеров частиц.

Технология сушки лука, моркови, столовой свеклы и пастернака в развитой стадии кипящего слоя

В сушильных установках неподвижного слоя, в том числе наиболее совершенных из них — ленточных конвейерных аппаратах, практически ускорить процесс сушки невозможно. Плохое распределение воздуха по лентам приводит к неодинаковому распределению тепла и влаги, служит причиной местных перегревов овощей, подгорания и порчи продукта. Поэтому при сушке овощей на этих аппаратах принимают незначительные температуры воздуха до 45–75°C над лентами. Это, в свою очередь, приводит к малым удельным нагрузкам материала от 4,5 до 16 кг/м² и к длительной сушке до влажности 8–12%: лука в течение 4,5 часов, моркови и пастернака до 5,3 часа, свеклы до 6 часов.

Нами исследована интенсифицированная сушка в развитой стадии кипящего слоя. Исследовано влияние различных факторов на процесс

сушки: формы и размера частиц, удельной нагрузки материала, скорости, температуры и потенциала сушки нагретого воздуха.

Влияние формы и размера частиц. Исследовано на моркови, столовой свекле и пастернаке. Лук для этой цели не подходит: чешуйчатое строение ткани исключает придание различной формы.

При одинаковых значениях удельной нагрузки материала 60 кг/м^2 скорости воздуха $5,0 \text{ м/с}$ исследовали влияние температуры и потенциала агента сушки на следующие размеры в мм и формы частиц: кубики $5 \times 5 \times 5$, $8 \times 8 \times 8$, $10 \times 10 \times 10$, $12 \times 12 \times 12$, $15 \times 15 \times 15$, $20 \times 20 \times 20$ и цилиндры диаметром 10 мм и длиной 20 мм .

Сравнение процесса сушки моркови и пастернака в виде кубиков размером $10 \times 10 \times 10 \text{ мм}$ и цилиндров диаметром 10 мм и длиной 20 мм при одинаковых температурах и потенциалах сушки воздуха показывает, что продолжительность сушки кубиков сокращается по сравнению с частицами одинакового сечения, но в форме цилиндров при всех температурах нагретого воздуха в $1,2-1,6$ раза. Это связано как с увеличением удельной поверхности кубиков по сравнению с цилиндрами, а также с характером движения частиц в процессе сушки в кипящем слое. Если удлиненные частицы — цилиндры совершают плавные спокойные колебания, стремясь занять горизонтальное положение по отношению к потоку воздуха, то кубики в процессе сушки находятся в состоянии вращательного движения. Это вызывает срыв пограничного слоя испаряющейся влаги и более интенсивную сушку. Поэтому при сушке в кипящем слое корнеплодов как и других овощей, лучшей формой резки являются кубики.

Установлено, что отношение продолжительности сушки различных размеров кубиков моркови, свеклы и пастернака приблизительно равно отношению их эквивалентных диаметров в степени $1,5$.

Влияние удельной нагрузки материала. Исследовано при постоянных параметрах скорости воздуха 5,0 м/с и температурах и потенциале сушки воздуха на входе в рабочую камеру соответственно для лука в виде кружков толщиной 3 мм 100° и 58°С, моркови кубики 8x8x8 мм, свеклы кубики 8x8x8 мм и пастернака кубики 10x10x10 мм — 120 и 73°С.

Это исследование показало, что величина удельной нагрузки всех материалов в пределах от 30 до 120 кг/м² практически не влияет на продолжительность сушки. Так, например, в таблице I приведены данные по продолжительности сушки моркови и свеклы в зависимости от величины первоначальной удельной нагрузки материала до остаточного влагосодержания 12 и 5%.

Оптимальные удельные нагрузки: лука 80 кг/м²; моркови, столовой свеклы и пастернака 120 кг/м². Установленные оптимальные нагрузки больше *чем* в ленточных конвейерных сушильных установках неподвижного слоя (лука — в 5,9–8,9 раз, моркови — в 6,3–27 раз, свеклы — в 9,6–26,7 раз, пастернака — в 7,15–15 раз). Это указывает на значительное повышение производительности сушильных установок кипящего слоя по сравнению с сушильными установками неподвижного слоя.

Таблица I

Материал	W ₁ ^c - W ₂ ^c %	τ мин при $\frac{M}{F} = \text{кг/м}^2$									
		30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
Морковь	640-12	22	31	24	30,5	23,5	33,5	26,5	28	27,5	28
—"	640-5	29	40	38	43,5	36	42,5	—	39	40	35,5
Свекла	640-12	23	25,5	25	32	30,5	29	34	30,5	32,5	26
—"	640-5	—	37	34	49,5	38,5	42	—	41,5	44,5	35

Влияние скорости воздуха. При сушке лука, корнеплодов, как и других пищевых растительных материалов в кипящем слое, увеличение скорости воздуха интенсифицирует удаление свободной влаги в пе-

риоде постоянной скорости сушки. Увеличение скорости воздуха способствует разрушению агрегатов частиц, приводит к меньшему насыщению воздуха водяными парами. Агрегирование свойственно влажным частицам, но по мере сушки оно уменьшается и исчезает к моменту подсыхания поверхности частиц.

Период постоянной скорости составляет небольшую часть общей продолжительности сушки. Основное время занимает период падающей скорости сушки. Уменьшение влажности в этот период не зависит от скорости воздуха, так как увеличение ее не изменяет характера движения и перемешивания частиц.

Поэтому при сушке лука и корнеплодов нужно применять минимальную скорость воздуха, обеспечивающую развитую стадию кипящего слоя, при которой происходит устойчивое движение и перемешивание частиц в обоих периодах сушки. Для всех исследованных материалов и размеров частиц величина ее составляет 4–5 м/с.

Влияние температуры, потенциала сушки воздуха. Непрерывное хаотическое движение материала в процессе сушки в кипящем слое выравнивает температуру нагретого воздуха и частиц, исключает местные перегревы. Поэтому при сушке в кипящем слое можно применять более высокие температуры агента. С повышением температуры сокращается продолжительность сушки.

Исследование влияния температуры и потенциала сушки воздуха проводили на всех материалах при постоянной скорости воздуха 5,0 м/с, и удельные нагрузки материала составляли: лука 40 кг/м^2 , моркови, свеклы и пастернака на кубиках различных размеров при 60 кг/м^2 .

В таблице 2 приведены данные по продолжительности сушки: лука в виде кружков толщиной 3 мм, моркови и свеклы с частицами $12 \times 12 \times 12$ мм в зависимости от температуры и потенциала сушки воздуха.

Данные таблицы 2 указывают на значительное ускорение сушки

при температуре воздуха свыше 100°C . При высокотемпературной сушке овощей частицы не дают усадки, сохраняют свою первоначальную форму и размеры, имеют пористое строение. Пористое строение безусадочных частиц не препятствует удалению образовавшегося пара в окружающее пространство, способствует ускорению процесса сушки. Поэтому при высоких температурах агента свыше 100°C возможна сушка до низкого остаточного влагосодержания 4–6% за небольшой промежуток времени. Интенсификация удаления остаточной влаги объясняется также испарением влаги внутри частиц, что приводит к возникновению градиента давления внутри материала.

Таблица 2

$t_{\text{вх}}^{\circ}\text{C}$	$E^{\circ}\text{C}$	τ мин. до $W_2^{\circ}\%$							
		Лук		Морковь		Свекла		Пастернак	
		10	4	10	4	12	4	10	4
60	31	124	—	140	—	—	—	—	—
70	36	101	—	—	—	176	—	—	—
80	44	58,5	66	108	—	147	—	—	—
90	52	38	53	—	—	102	—	—	—
100	58	24	31	69,5	78,5	88	—	119	—
110	69	20,5	24,5	55	65	57	84	102,5	—
120	78	18	22	50	53,5	45	82	75	96
130	85	17	20	42	45	34	49,5	64	79
140	97	14	15,5	36	40	30,5	49	47	55
150	104	11	13	31,5	35	29	40	46,5	52

Для выбора оптимальных температур агента исследовали изменение химико-технологических и органолептических показателей. При сушке лука сортов Каратальский и Стригуновский-Носовский исследовали изменения содержания витамина С и общего сахара в зависи-

мости от температуры агента сушки. В работе приведены эти данные. Они показывают, что с повышением температуры сокращаются потери витамина С, содержание общего сахара мало изменяется при температурах нагретого воздуха 70–110°C. Таким образом, при сушке лука в развитой стадии кипящего слоя можно применять повышенные температуры воздуха. Оптимальная температура агента сушки составляет 100–120°C.

Изменение химико-технологических показателей моркови исследовали на двух сортах "Каротель" и "Нантская". Определяли содержание общего сахара, общего азота, витаминов С, В_I, В₂ и каротин в сырье, после бланширования и после сушки при различных температурах воздуха.

В таблице 3 приведены данные этих изменений на примере сорта "Нантская". Данные химических показателей пересчитаны на сухую массу.

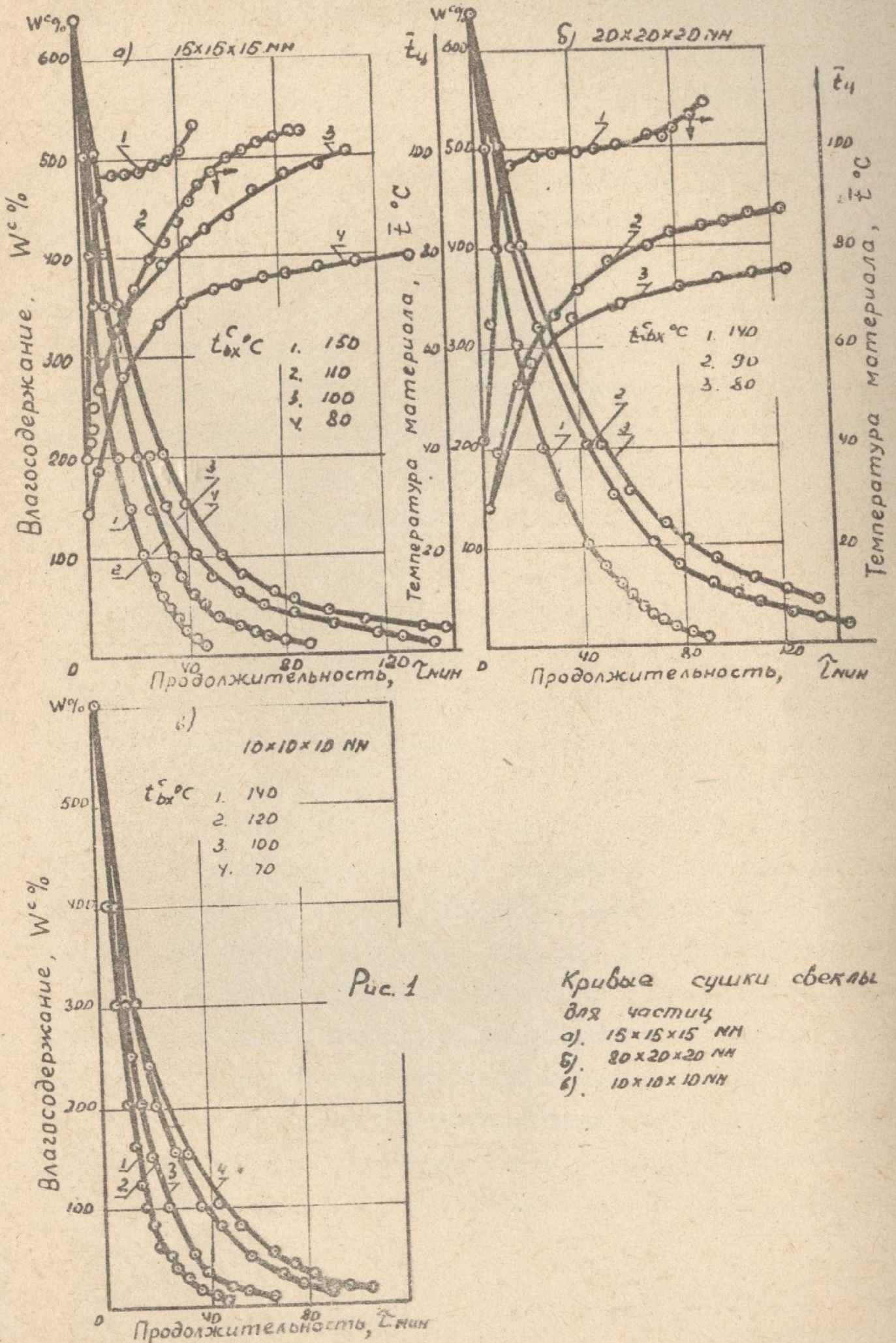
Анализируя данные этой таблицы, можно сделать вывод, что общие потери сахаров при сушке незначительны, потери азота, витаминов С, В_I и В₂ с повышением температуры агента сушки понижаются, а потери каротина при всех температурах незначительны. С повышением температуры воздуха выше 100°C при сушке моркови в кипящем слое значительно сокращается продолжительность разваривания и увеличивается набухаемость сушеной моркови.

Такие же закономерности обнаружены при сушке столовой свеклы и пастернака в кипящем слое. Данные об изменении химико-технологических показателей приведены в работе.

На рис. I приведены кривые сушки и кривые изменения температуры материала столовой свеклы при различных температурах нагретого воздуха. В процессе сушки свеклы (как и других исследованных материалов) происходит возрастание температуры материала в обоих периодах сушки. При температурах нагретого воздуха 140 и

Таблица 3

Показатели	$t_{bx}^{\circ C}$				
	60	80	100	120	140
W^c %	20	11,2	11	10,0	13,0
τ сушки, мин.	73	55	30	30	20
Сахар, после сушки	60,89	58,45	58,46	53,24	60,89
% потери, %	53,04	56,53	57,44	49,69	59,65
	12,7	3,3	1,6	6,6	1,7
после бланшировки	13,8	11,88	11,97	11,29	9,88
Азот, после сушки	7,98	8,36	8,55	8,34	8,66
% потери, %	42,1	29,5	28,7	26,1	12,3
после бланшировки	25,3	25,3	28,6	23,3	25,3
"С" после сушки	11,8	14,23	19,11	16,1	17,6
потери, %	53,3	43,6	33	30,9	30,3
Ви- тами- ны "В ₁ "	4,09	3,17	4,1	3,77	4,09
после сушки	1,08	1,16	1,51	2,09	1,96
мг/гт потери, %	77,9	63,8	63,1	44,5	52,1
после бланшировки	1,04	1,41	0,88	0,627	1,41
"В ₂ " после сушки	0,38	0,45	0,68	0,42	1,05
потери, %	63,5	68,1	22,8	33	25,5
ка- ро- тин	123	123	123	123	123
после сушки	110	110,4	104,3	102,2	112,7
потери, %	10,6	10,1	15	16,8	8,5
τ разваривания, мин.	14	12	11	6	5
Набухаемость, %	255,6	252,8	275,7	283,4	300,5



150°С на температурных кривых имеется участок постоянной температуры, соответствующий интенсивному испарению влаги во всем объеме частиц. Оптимальные температуры воздуха при сушке моркови, столовой свеклы находятся в пределах 120–140°С.

Суммарная среднеобъемная температура материала в течение всего процесса сушки при оптимальных температурах воздуха сокращается в 1,8–3,3 раза по сравнению с сушкой при повышенных температурах воздуха.

Продолжительность сушки в различной стадии кипящего слоя при оптимальных температурах воздуха сокращается по сравнению с сушкой в неподвижном слое при рекомендуемых температурах воздуха над лентами конвейерной сушильной установки: лука – 10,8–14,2 раза, столовой свеклы – в 6–7,5 раз, пастернака – в 7,8–10,5 раз.

ВЫВОДЫ

1. Доказано, что сушка лука, моркови, столовой свеклы и пастернака в развитой стадии кипящего слоя по сравнению с процессом в неподвижном слое позволяет значительно сократить продолжительность процесса, лучше сохранить первоначальные химико-технологические и органолептические показатели, произвести глубокую сушку до остаточного влагосодержания материала 2–4 % за относительно небольшой промежуток времени. Это связано с непрерывным движением и перемешиванием частиц в процессе сушки, что обеспечивает максимальную поверхность испарения; равномерный нагрев материала, возможность применения повышенных температур агента сушки.

2. Установлены оптимальные температуры воздуха при сушке исследованных овощей в развитой стадии кипящего слоя: 100–120°С для лука и 120–140°С для моркови, столовой свеклы и пастернака. При оптимальных температурах агента сушки сокращается суммарная температура продуктов в процессе сушки в 1,8–3,3 раза по сравнению

с сушкой при невысоких температурах воздуха 60–80°C.

Продолжительность сушки в развитой стадии кипящего слоя при оптимальных температурах воздуха сокращается в сравнении с сушкой в неподвижном слое при рекомендуемых температурах: лука в 10,8–14,2 раза, моркови в 5,8–8,6 раза, столовой свеклы в 6–7,5 раза, пастернака – в 7,8–10,5 раз.

3. Кратковременная сушка в развитой стадии кипящего слоя при оптимальных температурах нагретого воздуха способствуют лучшему сохранению первоначальных химико-технологических и органолептических показателей: сокращаются потери белка, витаминов С и каротина, не изменяется содержание сахаров, витаминов В₁ и В₂, сокращается продолжительность разваривания сушеных продуктов в 2,1 – 6 раз, увеличивается набухаемость на 28–186 % по сравнению с длительной низкотемпературной сушкой.

4. Применение оптимальных температур воздуха в пределах 110–140°C при сушке в развитой стадии кипящего слоя приводит к появлению безусадочного сухого продукта пористого строения вследствие интенсивного испарения во всем объеме частиц и повышения внутреннего давления пара. Это позволяет произвести глубокую сушку до остаточного влагосодержания 2–4 %: лука за 24–33 мин., моркови, свеклы, пастернака в течение 40–60 мин. Овощи, высушенные до низкого влагосодержания, сохраняются в несколько раз больше по сравнению с общепринятым влагосодержанием.

5. Установлены закономерности кинетики сушки лука, моркови, свеклы и пастернака в развитой стадии кипящего слоя.

а) Лучшей формой резки частиц моркови, свеклы и пастернака являются кубики. По сравнению с другими формами одинакового сечения частиц продолжительность сушки кубиков уменьшается из-за увеличения удельной поверхности испарения и срыва пограничного слоя

испаряющейся влаги вследствие непрерывного вращения и турбулентного, хаотического движения.

б) Сушку всех исследованных материалов нужно проводить при минимальной скорости воздуха, обеспечивающей развитую стадию кипящего слоя.

в) Величина удельной нагрузки материала в пределах от 30 до 120 кг/м² практически не влияет на продолжительность сушки исследованных овощей в развитой стадии кипящего слоя. Оптимальная удельная нагрузка указанных материалов при сушке в кипящем слое в 5,9-27 раз больше, чем при сушке этих материалов в неподвижном слое. Это способствует значительному повышению производительности сушильных установок кипящего слоя по сравнению с сушильными установками неподвижного слоя.

г) Решающее влияние на ускорение процесса сушки овощей оказывают температура и потенциал сушки нагретого воздуха.

6. Расчет продолжительности сушки всех исследованных овощей до заданных пределов на основании применения метода приведенной скорости сушки Г.К.Филоненко. В результате обработки экспериментальных данных получены величины постоянных коэффициентов уравнения (4 и 5). Получены расчетные уравнения (6) и (7), позволяющие определить зависимость коэффициентов A и β от потенциала сушки нагретого воздуха всех исследованных материалов, форм и размеров частиц. Установлено, что при сушке исследованных материалов в развитой стадии кипящего слоя величины коэффициентов A и β не зависят от массовой скорости воздуха и удельной нагрузки материала. Это объясняется тем, что в периоде падающей скорости сушки скорость воздуха и удельная нагрузка материала не влияют на скорость сушки, а следовательно, и на массообменные характеристики A и β .

7. Обработкой экспериментальных данных определено, что скорость постоянного периода сушки N всех исследованных ово-

шей прямо пропорциональна массовой скорости воздуха $V\rho$, потенциалу сушки воздуха E и обратно пропорциональна величине удельной нагрузки абсолютно сухого материала. Получено уравнение (8), позволяющее рассчитать скорость постоянного периода сушки в зависимости от формы и размера частиц исследованных овощей. Введением отношения поверхности к объему частиц $\frac{S}{V}$ получены единые уравнения, позволяющие рассчитать скорость постоянного периода сушки, независимо от размера частиц моркови, столовой свеклы и пастернака (9).

8. Установлено, что критическое влагосодержание материала при сушке исследованных овощей в развитой стадии кипящего слоя изменяется в зависимости от температуры и потенциала сушки воздуха. С увеличением температуры и потенциала сушки величина критического влагосодержания материала уменьшается. Получено уравнение (10), позволяющее рассчитать критическое влагосодержание лука, моркови, свеклы и пастернака всех размеров частиц в зависимости от величины потенциала сушки нагретого воздуха.

9. Установленные закономерности кинетики сушки и полученные уравнения (6, 7, 8, 9, 10) позволяют достаточно просто, быстро и точно решить общее уравнение продолжительности сушки (5) лука, моркови, свеклы и пастернака в развитой стадии кипящего слоя, по известным величинам параметров воздуха.

10. В результате непосредственного замера температуры материала в центре и на поверхности частиц различных размеров в процессе сушки лука, моркови, свеклы и пастернака в развитой стадии кипящего слоя установлены закономерности кинетики нагрева.

Доказано, что независимо от температуры нагретого воздуха температура материала непрерывно увеличивается в периодах постоянной и падающей скорости сушки. Однако, температура материала в центральных слоях быстрее увеличивается при умеренных температу-

рах агента сушки $60-90^{\circ}\text{C}$, это объясняется испарением влаги только с поверхности частиц.

При интенсивной сушке с применением высоких температур воздуха ($100-160^{\circ}\text{C}$) замедляется рост температуры материала в центральных слоях и наблюдается период постоянной температуры при интенсивном испарении влаги во всем объеме частиц, на которое затрачивается основное тепло агента сушки.

II. Установлено, что при сушке с умеренными температурами нагретого воздуха $60-100^{\circ}\text{C}$ всех исследованных овощей имеется одна линейная зависимость логарифма критерия Ребиндера от удаляемой влаги во всем диапазоне влагосодержания. Но при сушке с высокими температурами воздуха $110-160^{\circ}\text{C}$ при низком влагосодержании (в пределах 30-2% лука и свеклы, 33-2% пастернака и 25-29% лука) имеется вторая линейная зависимость логарифма Ребиндера от удаляемой влаги.

Получены уравнения (II+26) зависимости критерия Ребиндера от удаляемой влаги в процессе сушки лука, моркови, свеклы и пастернака, позволяющие рассчитать среднеобъемную температуру материала и установить связь между тепло- и массообменом в процессе сушки независимо от формы и размера частиц.

12. Определены теплофизические характеристики: плотность, коэффициенты теплопроводности и температуропроводности, а также величины коэффициента влагопереноса лука, моркови, свеклы в (от сухого до влажного состояния) и изменение температуры материала до 75°C .

Установлено, что с повышением температуры материала величины коэффициентов температуропроводности и теплопроводности лука, моркови и свеклы возрастают.

Бланширование моркови и свеклы приводит к увеличению коэффи-

циента температуропроводности. Плотность материала с понижением влагосодержания уменьшается, что связано с отсутствием усадки и пористым строением. Значение коэффициента теплопроводности уменьшается в процессе сушки при уменьшении влагосодержания материала.

Установлена зависимость и получены уравнения (1+3), определяющие величину потенциала влагопереноса лука и моркови от влагосодержания их при некоторых температурах.

Принятые обозначения

θ - потенциал влагопереноса, °М; U_p - равновесное влагосодержание, кг/кг сухого вещества; τ - продолжительность сушки, мин.; N - скорость постоянного периода, %/мин; W_1 , W_k , W_2 и W_p - соответственно начальное, критическое, конечное, равновесное влагосодержание, %; $E = t^c - t^m$ - потенциал сушки воздуха, °С; t^c и t^m - соответственно температура агента сушки по "сухому" и "мокрому" термометрам; V_p - массовая скорость воздуха кг/м².сек; S - поверхность решетки, м²; M_c - масса сухого вещества, кг; S - поверхность частиц, м²; V - объем частиц, м³; $Rb = \frac{c}{z} \cdot \frac{dt}{dU}$ - критерий Ребиндера; C - приведенная теплоемкость материала: $C = C_{с.в.} + U$; $C_{с.в.}$ - теплоемкость сухого вещества, кДж/кг.град.; U - текущее влагосодержание, кг/кг; $\frac{dt}{dU}$ - температурный коэффициент сушки.

Результаты диссертационной работы докладывались на отчетных научных конференциях Одесского технологического института пищевой промышленности имени М.В.Ломоносова в 1971 и 1972 г.г. и на Республиканской конференции "Повышение эффективности и совершенствование процессов и аппаратов химических производств", Львов, 1973 г.