

Автор ер.

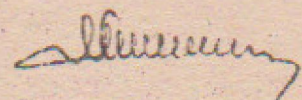
М 91

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

имени М.В.Ломоносова

На правах рукописи

МУРАДОВ Айдын Алекпер оглы



ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА СУШКИ ФУНДУКА

Специальность 05.18.13 – технология консервированных пищевых продуктов

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Одесса – 1992



Работа выполнена в Одесском технологическом институте пищевой промышленности имени М.В.Ломоносова и Закатальском орехоперерабатывающем заводе Азербайджанской республики.

Научный руководитель — доктор технических наук,
профессор М.А.Гришин

Официальные оппоненты — доктор технических наук,
профессор А.Ф.Буляндра

— кандидат технических наук,
доцент Т.В.Страхова

Ведущая организация — Черниговский овощесушильный
завод (г. Чернигов)

Защита состоится "21" февраля 1992 г. в 13⁰⁰ час. на заседании специализированного совета Д 068.35.01 при Одесском технологическом институте пищевой промышленности им.М.В.Ломоносова по адресу: 270039, г.Одесса, ул.Свердлова, 112.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Одесского технологического института пищевой промышленности им.М.В.Ломоносова.

Автореферат разослан "15" января 1992 г.

Егоров

ОНАХТ 13.09.12
Интенсификация проце



v016958

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы. Сохранение здоровья, долголетия, работоспособности, рост и гармоническое развитие человеческого организма достигается при полноценном разнообразном и рационально сбалансированном питании. Фундук — культурные сорта лесного или лесного ореха, является концентратом хорошо сбалансированных белков, жиров и токоферолов, хорошим источником витаминов и минеральных веществ. Ядра фундука широко используются в кондитерской и консервной промышленности при изготовлении высокоценных продуктов питания.

Ответственным и решающим этапом технологического процесса переработки фундука является сушка, определяющая качество готового продукта, его сохранность и затраты энергии. Отечественное производство фундука не обеспечивает потребности промышленности, поэтому для сокращения импорта необходимо не только увеличить производство орехов, но и сократить потери при хранении и транспортировке. Незначительное содержание влаги в высушенном фундуке приостанавливает развитие микроорганизмов, предохраняет орехи от бактериальной, ферментативной и химической порчи.

Как отечественные, так и новейшие импортные сушильные установки громоздки, малопроизводительны, не отвечают современным требованиям к ним. Длительная двухсуточная сушка орехов в этих установках при температурах сушильного агента 45...60 °С создают благоприятные условия для развития микробиологических и ферментативных процессов, ухудшает качество сушеных орехов, увеличивает затраты теплоты и энергии.

Актуальность работы объясняется тем, что при интенсивной сушке фундука во взвешенном слое продолжительность процесса сокращается в десятки раз (с 48-50 до 0,4-1,5 ч), улучшается качество, лучше сохраняется биохимический и химический состав орехов, значительно снижаются затраты теплоты и энергии.

Цель и задачи исследования. Целью диссертации является разработка научно обоснованной технологии интенсивной сушки фундука. Исходя из этого, задачами диссертации являются:

- исследовать закономерности механизма интенсивной сушки фундука во взвешенном слое: влияние различных факторов на процесс, кинетику и тепломассообмен в процессе сушки.
- Для определения оптимальных условий хранения и транспортировки фундука и ядер орехов и нахождения термодинамических параметров влагопереноса исследовать равновесное влагосодержание.
- Для установления оптимальных режимов сушки орехов во взвешен-

0.016958
Одесский технологический институт пищевой промышленности

ном слое изучить изменения химических и биохимических показателей в зависимости от температуры и потенциала сушки нагретого воздуха.

— С целью дальнейшей интенсификации процесса сушки фундука исследовать влияние предварительной электрофизической обработки орехов.

— Для полной характеристики фундука как объекта сушки определить термодинамические параметры влагопереноса и состав полисахаридов.

Научная новизна. Впервые установлены закономерности процесса интенсифицированной сушки фундука: исследованы кинетика процесса, тепломассообмен в процессе сушки, изменение химических и биохимических показателей материала. Дано математическое описание процесса сушки, позволяющее рассчитать с достаточной точностью продолжительность сушки до любого требуемого влагосодержания.

В результате исследования равновесного влагосодержания фундука в широком диапазоне изменений относительной влажности воздуха при трех температурах впервые определены термодинамические параметры влагопереноса.

Доказано интенсифицирующее воздействие на процесс сушки фундука предварительной электрофизической обработки и определены параметры обработки.

Практическая ценность. Разработаны научно обоснованные режимы эффективной сушки орехов во взвешенном слое, сокращающие продолжительность сушки в 16-50 раз в зависимости от температуры сушильного агента по сравнению с отечественными и импортными промышленными сушильными установками.

В результате значительного сокращения продолжительности сушки, а, следовательно, и продолжительности теплового воздействия на орехи улучшаются органолептические и биохимические показатели, сокращаются затраты теплоты на процесс сушки.

Производственные испытания сушки орехов на Черниговском оводе-сушильном заводе в сушильном аппарате взвешенного слоя подтвердили результаты экспериментальных исследований.

Полученные результаты исследований будут внедрены на Закарпатском орехоперерабатывающем заводе.

Апробация диссертационной работы. Доложены и обсуждены на Всесоюзной конференции "Тепло-массообмен в технологических процессах" (сентябрь 1991 г.) в г. Юрмале Латвийской ССР; на Одесской областной межвузовской научно-практической конференции (октябрь 1989 г.); на ежегодных научных конференциях Одесского технологического института пищевой промышленности им. М.В. Ломоносова (г. Одесса, 1987-1991 гг.).

Публикации. По результатам исследований опубликовано 3 работы.

На защиту выносятся:

— Экспериментальные исследования и теоретическое обоснование процесса сушки фундука во взвешенном слое;

— экспериментальное исследование и теоретическое обоснование равновесного влагосодержания фундука;

— экспериментальное исследование предварительной электрофизической обработки фундука перед сушкой во взвешенном слое;

— результаты исследования изменения биохимических показателей фундука в процессе сушки;

— аналитические зависимости кинетики процесса и тепломассообмена в процессе сушки фундука во взвешенном слое;

— аналитические зависимости термодинамических параметров влагопереноса.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка использованной литературы, приложений.

Содержание работы

Во введении обоснованы актуальность темы, цели и задачи исследования.

Первая глава диссертации посвящена современному состоянию и перспективам совершенствования сушки фундука. В ней описаны свойства фундука как объекта сушки: строение ореха, химический состав, в котором дана характеристика белков, жиров, углеводов, витаминов и минерального состава, приведены данные по сортам фундука, подготовке его к промышленной сушке. Производится анализ промышленной переработки и сушки фундука на отечественном и современном импортном (итальянском) оборудовании, показаны недостатки технологии и сушильных установок. Особое внимание уделено анализу длительной низкотемпературной 48-50 ч сушки, показана ошибочность этой тенденции.

В связи с тем, что в литературе отсутствуют данные об интенсифицированной сушке фундука, в первой главе дан раздел анализа интенсификации сушки других растительных материалов. В этом разделе анализируются процессы сушки на промышленных сушильных установках как отечественных, так и зарубежных. Значительное внимание уделено интенсифицированной сушке во взвешенном слое при активных гидродинамических режимах.

На основании аналитического обзора литературы даны краткие выводы и поставлены задачи исследования данной диссертации.

Во второй главе приведены описания экспериментальной установки взвешенного слоя и методика проведения эксперимента по исследованию процесса сушки и проведения химических и биохимических анализов, а

также определения равновесного влагосодержания фундука.

В третьей главе приводятся сведения о теплообмене в процессе сушки фундука: роль потенциала сушки нагретого воздуха, расчетные уравнения перемещения влаги внутри материала, система дифференциальных уравнений А.В.Лыкова переноса влаги и теплоты в процессе сушки коллоидно-капиллярных материалов. Эта система дифференциальных уравнений характеризует физические законы процесса сушки, выявляет наиболее существенные стороны процесса. Но даже современные ЭВМ не дают законченного решения данной системы из-за переменных членов уравнений, находящихся в сложных, часто неопределенных, зависимостях от влагосодержания и температуры материала. Поэтому, зная, на основании системы уравнений, внутренние связи между физическими величинами и не решая ее, пользуются инженерными методами решения.

Количественные закономерности процесса сушки орехов и ядер фундука, расчет продолжительности сушки производится на основе метода приведенной скорости сушки профессора Г.К.Филоненко.

Приведенная скорость сушки ψ исключает влияние параметров сушильного агента, определяется только физико-химическими свойствами материала и энергией связи влаги с материалом находится отношением скорости сушки при данном влагосодержании $dw/d\tau$ к максимальной скорости сушки N периода постоянной скорости:

$$\psi = \frac{1}{N} \frac{dw}{d\tau} = \frac{(W - W_p)^m}{A + \beta (W - W_p)^m} \quad (1)$$

Преобразуя уравнения (1), находим продолжительность сушки

$$\tau = \frac{1}{N} \left[(W_1 - W_2) + A \int_{W_2}^{W_1} \frac{dw}{(W - W_p)^m} + \beta (W_k - W_2) \right] \quad (2)$$

Здесь N — максимальная скорость сушки I периода, %/мин; W_1 ; W_2 , W_k , W_p — соответственно влагосодержание материала: начальное, текущее, конечное, критическое и равновесное, %; A , β , m — массообменные характеристики.

Показатель степени m для данного материала является постоянной величиной, характеризует энергию связи влаги с материалом. При испарении свободной влаги в периоде постоянной скорости сушки $m=0$. Исследованиями М.А.Гришина, его сотрудников и учеников при сушке разнообразных пищевых материалов различными способами в широком диапазоне изменений параметров сушильного агента установлены четыре значения m : 0,5; 1,0; 1,5 и 2,0.

Исследование процесса сушки фундука и обработка экспериментальных данных показало, что для фундука (ядра и орехов) $m = 0,5$, при котором уравнение (2) примет вид:

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

Для решения уравнения (3) необходимо определить составляющие его члены. В результате обработки экспериментальных данных определены уравнения скорости постоянного периода сушки:

$$\text{орехов: } N = 0,15 + 0,83 \cdot U_n \cdot E_{cp} \cdot v_p \cdot F/M_c \quad (4)$$

$$\text{ядер орехов: } N = 0,2 + 0,46 U_n \cdot E_{cp} \cdot v_p \cdot F/M_c \quad (5)$$

Средние квадратические отклонения расчетных величин от экспериментальных уравнения (4) $\pm 0,0866$ (7,9 %), уравнения (5) $\pm 0,107$ (13 %).

Скорость постоянного периода сушки ядра фундука и ореха в скорлупе прямо пропорциональна произведению начального влагосодержания U_n , кг/кг сухого вещества, среднему значению потенциала сушки E_{cp} , °C; массовой скорости воздуха v_p , кг/(м²·C) и обратной величине удельной нагрузки орехов F/M_c , м²/кг сух. вещества. В мало-влажных орехах колебания начального влагосодержания U_n оказывает существенное влияние на скорость постоянного периода сушки, поэтому этот член введен в состав уравнений (4) и (5).

Массообменные коэффициенты A и β и величина критического влагосодержания W_k для фундука в виде ядра и в скорлупе изменяются в зависимости от температуры и потенциала сушки нагретого воздуха и аппроксимируются уравнениями:

$$\text{для орехов: } A = 318 - 3,3 E_{cp} \quad (6) \quad \beta = 0,43 E_{cp} - 48 \quad (7)$$

Средние квадратические отклонения расчетных величин от опытных составляют соответственно: $\pm 17,5$ и $\pm 1,94$ (9,1 %)

$$\text{Для ядер фундука } A = 126 - 1,37 E_{cp} \quad (8) \quad \beta = 0,5 E_{cp} - 46,5 \quad (9)$$

Средние квадратические отклонения расчетных величин от опытных составляют соответственно: $\pm 0,129$ (15,5 %) и $\pm 2,36$ (17,2 %)

$$\text{Критическое влагосодержание: } W_k = 21 - 1,8 E_{cp} / W_n \quad (10)$$

Среднее квадратическое отклонение расчетных величин критического влагосодержания от опытных составляет $\pm 1,9$ (10,3 %).

В уравнении (10) W_n — начальное влагосодержание фундука, %, учитывающее различное начальное влагосодержание в разные сроки уборки. Величина критического влагосодержания фундука с повышением температуры и потенциала сушки уменьшается.

Массообменные коэффициенты A и β определяют перемещение связанной влаги внутри орехов в периоде падающей скорости сушки. Значения этих коэффициентов определяются длиной пути перемещаемой влаги,

т.е. размером и формой орехов, а также фазовым состоянием влаги (жидкость, пар, парожидкостная смесь), являющейся функцией температуры и потенциала сушки нагретого воздуха. С повышением температуры и потенциала сушки воздуха величина коэффициента λ фундука уменьшается. Коэффициент β при сушке фундука имеет отрицательные значения и с повышением температуры и потенциала сушки нагретого воздуха величина коэффициента β приближается к положительному значению.

Полученные уравнения (4,5,6,7,8,9,10) позволяют достаточно просто, быстро, с достаточной точностью решать основное уравнение кинетики процесса (3) — продолжительности сушки орехов и ядра фундука.

Равновесное влагосодержание характеризует свойство материала удерживать воду, достигается равенством давления водяного пара над материалом с парциальным давлением пара в окружающей воздушной среде при одинаковых температурах материала и воздушной среды. При достижении равновесного влагосодержания дальнейшую сушку при данном способе, температуре и влажности воздуха проводить нецелесообразно, так как снижения влажности материала не произойдет. По этой причине значение равновесного влагосодержания входит в расчетные уравнения продолжительности сушки (3).

Равновесное влагосодержание орехов в скорлупе и ядер фундука определяли тензиметрическим методом. В таблице I приведены значения равновесного влагосодержания U_p , кг/кг сухого вещества при относительной влажности воздуха, доли единицы.

Таблица I

Разновидность фундука	U_p при φ									
	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	
орехи	0,028	0,043	0,063	0,077	0,091	0,104	0,116	0,134	0,165	
—"	0,013	0,024	0,041	0,054	0,068	0,082	0,098	0,116	0,137	
—"	0,1	0,021	0,036	0,046	0,055	0,065	0,081	0,099	0,125	
ядра	0,007	0,015	0,025	0,032	0,04	0,045	0,053	0,06	0,068	

Из табл. I следует, что при всех величинах относительной влажности воздуха равновесное влагосодержание ядер фундука меньше орехов из-за преобладания в ядрах гидрофобного жира. С повышением температуры равновесное влагосодержание фундука уменьшается при всех величинах относительной влажности воздуха.

Термодинамические параметры влагопереноса. Академик А.В. Лыков исходя из взаимосвязанных процессов теплообмена и влагообмена между

материалом и сушильным агентом в процессе сушки предложил по аналогии с теплофизическими коэффициентами ввести термодинамические параметры влагообмена (ТВВ). ТВВ определяются в результате комплексного исследования взаимосвязанных процессов переноса теплоты и влаги.

По аналогии с температурой-потенциалом переноса теплоты введены потенциалы влагопереноса: химический потенциал, μ , Дж/моль и экспериментальный потенциал переноса влаги, θ , $^{\circ}\text{м}$ (массообменные градусы).

По аналогии с удельной теплоемкостью введена удельная изотермическая влагоемкость c_m , моль/Дж — характеристика влагоаккумулирующей способности материала.

Термоградиентный коэффициент δ , I/K определяет переход влагосодержания Δu при изменении температуры в один градус под влиянием градиента температуры ΔT при отсутствии влагопереноса:

$$\delta = \left(\frac{\Delta u}{\Delta T} \right); = 0 \quad (II)$$

Во влажном материале вода находится в двух состояниях: влажном и гигроскопическом. Границей между влажным и гигроскопическим состоянием является гигроскопическое влагосодержание W_r — равновесное влагосодержание при максимальной относительной влажности воздуха $\varphi = 100\%$. В фундуке, как маловлажном материале, вода находится только в гигроскопическом состоянии. Гигроскопическое состояние ($W_r - W_p$) охватывает диапазон влаги, наиболее прочно связанной с материалом и на удаление этой влаги приходится основное время сушки.

Химический потенциал μ в области влажного состояния, соответствующий потенциалу свободной воды, равен нулю.

В гигроскопической области: $\mu = RT \ln \varphi$ (I2)
где R — универсальная газовая постоянная, Дж/(кг·К); T — абсолютная температура, К; φ — относительная влажность, доли единицы.

Экспериментальный потенциал влагопереноса θ применяется в области влажного и гигроскопического состояния. В гигроскопической области θ изменяется от 0 до 100°м .

В области гигроскопического состояния

$$c'_m = \left(\frac{\partial u}{\partial \mu} \right)_T \quad (I3)$$

$$\delta = c'_m \left(\frac{\partial \mu}{\partial T} \right)_u \quad (I4)$$

где $\partial \mu / \partial T$ — температурный коэффициент химического потенциала, Дж/(моль·К).

В диссертации приведены таблицы значений химического потенциала, экспериментального потенциала влагопереноса, удельной изотермической влагоемкости орехов при температуре, $^{\circ}\text{C}$: 0, 10 и 40, ядер

фундука при 8-9 значениях равновесного влагосодержания и температурного коэффициента химического потенциала и термоградиентного коэффициента фундука при семи значениях равновесного влагосодержания и температурах 0...40 °C. На рис.1,б представлены зависимости термодинамических параметров влагопереноса фундука от равновесного влагосодержания. Величины химического потенциала уменьшаются с увеличением равновесного влагосодержания и с повышением температуры. В процессе сушки величина химического потенциала возрастает, так как увеличивается энергия связи влаги с материалом.

Наоборот, экспериментальный потенциал влагопереноса в процессе сушки уменьшается, увеличивается с повышением температуры. Удельная изотермическая влагосемкость фундука увеличивается с возрастанием равновесного влагосодержания и температуры.

Термоградиентный коэффициент находится в сложной зависимости от равновесного влагосодержания: сначала при увеличении равновесного влагосодержания от 0,02 до 0,1 δ возрастает до максимального значения, затем при дальнейшем увеличении W_p величина δ постепенно уменьшается.

В четвертой главе рассматриваются результаты исследования технологии и кинетики сушки фундука во взвешенном слое. Отмечается, что скорость воздуха 5 м/с является минимальной, обеспечивающей развитую стадию кипящего слоя и устойчивое фонтанирование.

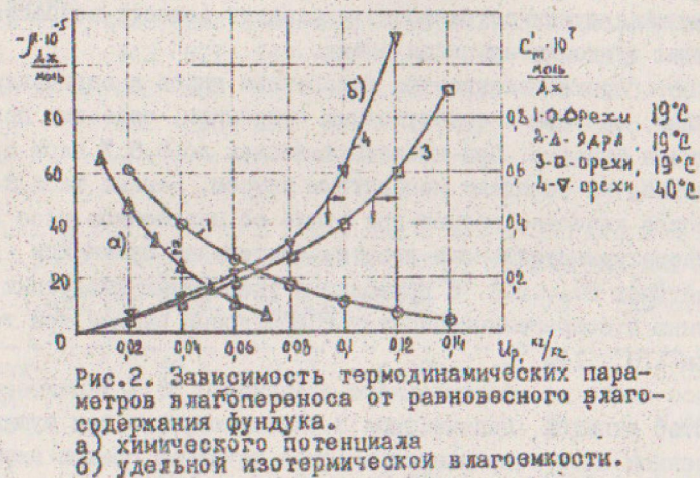
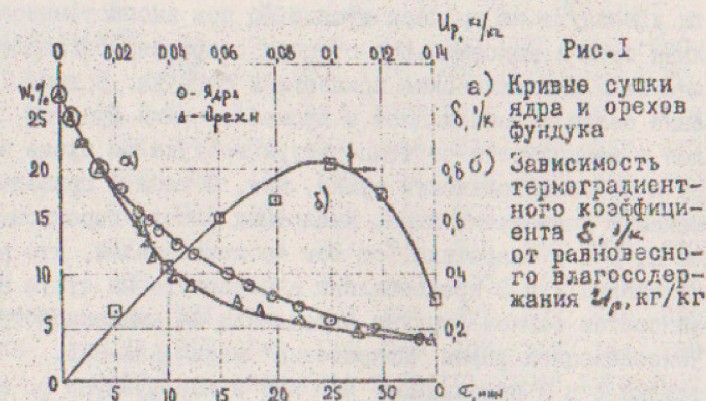
Применение высокотемпературной сушки фундука во взвешенном слое практически исключает влияние на процесс удаления влаги первоначального влагосодержания и только при применении умеренных температур 80 и 90 °C с уменьшением величин первоначального влагосодержания продолжительность сушки сокращается.

Установлено, что при активном гидродинамическом режиме во взвешенном слое сушка фундука, как и других пищевых материалов, происходит при повышенных удельных нагрузках материала на единицу рабочей поверхности, значительно превышающих удельные нагрузки материала в неподвижном слое.

При сушке фундука во взвешенном слое удельная нагрузка материала достигает величины 150 кг/м², что значительно повышает эффективность процесса.

Решающее влияние на ускорение сушки фундука во взвешенном слое оказывает повышение температуры и потенциала сушки нагретого воздуха.

При высокотемпературной сушке (температура нагретого воздуха 120, 130, 140 °C соответственно среднему потенциалу сушки 76, 82, 91,3 °C) уменьшаются затраты теплоты на испарение влаги из материала, повышается эффективность процесса обезвоживания - сокращаются



расход теплоты и воздуха на процесс сушки. Но при высокотемпературной сушке должны быть в максимальной степени сохранены органолептические, химические и биохимические показатели фундука. В табл.2 показано изменение белка и аминокислот в процессе сушки фундука во взвешенном слое в зависимости от температуры воздуха на входе в сушильную камеру и продолжительности сушки, мин. В табл.3 приведены данные по изменению содержания жира, кислотных чисел, перекисных чисел, витаминов Е, С и β-каротина, от тех же показателей, что и в табл.2. Данные таблиц 2 и 3 представлены в пересчете на сухую массу. Аминокислотный состав белков фундука определяли на аминокислотном анализаторе Чехословацкой фирмы "Микротехна" марки ААА-381.

Данные таблиц 2 и 3 показывают, что при сушке фундука во взвешенном слое содержание белка, аминокислот, жира, витаминов Е, С и β-каротина практически мало изменяется. Однако с повышением температуры и потенциала сушки сохранность указанных веществ возрастает из-за сокращения продолжительности сушки.

Прогорклость орехов вызывается окислением жиров и определяется кислотным числом, связана с естественным старением, особенно при хранении влажного фундука. При кислотных числах до 0,5 % ядра орехов хорошего качества, не обладают неприятным вкусом. Данные табл.3 подтверждают высокое качество орехов при сушке во взвешенном слое независимо от температуры сушильного агента. Длительная сушка при умеренных температурах 60...100 °С приводит к увеличению кислотных чисел по сравнению с сокращением высокотемпературной сушкой при температуре воздуха 110...140 °С.

Перекисное число до максимального значения 0,35 % характеризуют хорошее качество липидов. Данные табл.3 указывают, что при сушке фундука во взвешенном слое сохраняется высокое качество орехов независимо от температуры нагретого воздуха, так как перекисные числа фундука значительно ниже указанного предела.

Таким образом, биохимические и химические изменения фундука при сушке во взвешенном слое незначительно, особенно при высокотемпературной сушке и сушеный продукт сохраняет высокую питательную и биологическую ценность.

В диссертации помещены кривые сушки фундука во взвешенном слое в зависимости от температуры и потенциала сушки воздуха при различных начальных влажностях орехов. При начальном влажностном содержании 27 % продолжительность сушки до остаточного влажностного содержания 5 %, в зависимости от температуры (°С) составляет: 90-260; 100-177; 110-86; 120-46, т.е. повышение температуры воздуха, начиная с 90 °С,

Таблица 2

Белок, %: До аминокислоты; суш- мг/100 г	При t _в , °С									
	60	70	80	90	100	110	120	130	140	κ мин
	362	336	252	181	200	170	120	68	60	
белок	17,1	15,9	15,9	16,1	17,0	16,6	16,7	16,8	16,9	16,2
валин	664	572	609	593	558	592	636	559	612	762
изолейцин	548	372	412	429	424	445	413	452	459	587
лейцин	956	781	862	961	949	906	795	955	919	1299
лизин	393	380	345	282	328	315	363	320	312	342
треонин	503	372	383	379	437	400	349	459	496	502
фенилаланин	624	511	554	528	584	571	573	588	618	750
гистидин	262	211	142	194	246	205	157	164	188	255
аргинин	2105	1642	1610	1786	1680	1718	1805	1710	1687	1968
аспарагин. кислота	1565	1173	1150	1348	1390	1275	1169	1432	1434	1548
глутаминов. кислота	4428	3145	3386	4068	3298	3637	3733	3830	4025	4105
пролин	443	311	248	338	366	379	385	429	440	437
глицин	648	533	596	617	609	635	563	600	631	973
аланин	652	530	612	584	616	619	543	575	652	812

Таблица 3

t _в , °С	κ, мин	Общее		Кислот.		Перекис.		Витамины, мг/100 г		
		количест- во жира, %	число мг КОН г	число кислот. г	число кислот. /100	Е	β-каротин	С		
до сушки		69,9	0,11	0,009		35	0,025	1,34		
60	263	67,6	0,27	0,039		32,2	0,02	0,74		
70	252	68,9	0,26	0,019		31,0	0,015	0,58		
80	240	68,4	0,24	0,024		29,4	0,017	0,7		
90	180	68,7	0,28	0,026		31,0	0,017	0,85		
100	200	68,2	0,28	0,031		28,1	0,018	0,8		
110	170	68,7	0,2	0,017		28,6	0,02	0,87		
120	141	69	0,16	0,019		33,4	0,023	0,97		
140	50	69	0,17	0,011		33,4	0,023	0,97		

на 10 °С сокращает продолжительность сушки в 1,5 раза, на 20 °С – в 3 раза и на 30 °С – 9,3 раза. Такая же тенденция наблюдается и при других начальных влагосодержаниях фундука. Так, при начальном $W_1 = 16\%$ в зависимости от температуры воздуха (°С), τ сушки (мин) и во сколько раз сокращается τ сушки (в скобках) по отношению к 70 °С: 70–110; 90–75 (1,5 раза); 110–47 (2,3 раза); 130–20 (в 5,5 раз).

Продолжительность сушки, мин ядра фундука от $w_1 = 6\%$ до $w_2 = 2\%$ (в скобках указано во сколько раз сокращается τ сушки) составляет: 80–57; 100–26 (2,2 раза); 120–10,5 (5,4 раза); 140–6,5 (8,8 раза). Быстрая высокотемпературная сушка ядра фундука во взвешенном слое до низкого остаточного $W_2 = 2\%$ имеет перспективу для замены обжаривания ядра орехов в кондитерской промышленности. При обжаривании до остаточной влажности 2,5% ядра фундука приобретают коричневый цвет из-за реакции меланоидинообразования. При этом ухудшаются свойства орехов. При сушке этого не происходит: сохраняется естественный цвет и биологические свойства орехов.

В работе приведены результаты специального исследования сушки ядра и орехов в скорлупе при высоком одинаковом начальном влагосодержании 27% при температурах воздуха на входе в сушильную камеру 120°, среднем потенциале сушки 76–77 °С, скорости воздуха 5 м/с и удельной нагрузке материала 80 кг/м². Целью этого исследования была проверка технологической инструкции итальянской фирмы Брамбати, не допускающей при сушке фундука температуры сушильного агента выше 60 °С, так как "... резкое испарение воды внутри ядра в скорлупе не дает выхода воде из скорлупы и орех превращается в своего рода кипящую кастрюлю с крышкой".

При высокотемпературной сушке испарение воды происходит во всем объеме ореха, а не только с поверхности при низкотемпературной сушке. На рис. 1, а показаны кривые сушки: ядра, ореха в скорлупе. Удаление влаги от $W_1 = 27\%$ до $W_2 = 18\%$ происходит одинаково для ядер и орехов; затем на участке образуется петля гистерезиса: быстрое удаление воды из ореха в скорлупе, вопреки утверждению фирмы. Это ускорение объясняется воздействием возникшего градиента давления пара. В точке конечного влагосодержания 4% кривые снова соединяются. Таким образом, скорлупа не является препятствием.

Предварительная пятиминутная электрофизическая обработка орехов напряжением 10...12 кВ перед сушкой ускоряет последующую сушку фундука во взвешенном слое при температуре воздуха 80 °С в 2,16 – 2,24 раза; при 100 °С – в 1,65 – 1,73 и при высокотемпературной сушке 120 и 130 °С – в 1,07 – 1,13 раза. Таким образом, предваритель-

ная электрофизическая обработка эффективна при последующей низкотемпературной сушке, когда преобладает перемещение влаги внутри материала в виде жидкости. При этом электрический ток, очевидно, воздействует на скорлупу и клеточные стенки ядра фундука, увеличивая проницаемость их.

Выводы

1. Сушка фундука в виде ядра и орехов в скорлупе во взвешенном слое обеспечивает равномерный тепломассообмен, позволяет применять высокие температуры воздуха до 130...140 °С, что значительно интенсифицирует процесс сушки.

2. Установлено, что скорость воздуха 5 м/с является минимальной, обеспечивающей развитую стадию кипящего слоя и устойчивое фонтанирование. Удельную нагрузку орехов можно повысить до 150 кг/м², не увеличивая продолжительность сушки, что более чем в девять раз превышает удельную нагрузку фундука при сушке в неподвижном слое.

3. Начальное влагосодержание фундука оказывает влияние на длительность сушки только при умеренных температурах воздуха 80...90 °С: с понижением начального влагосодержания с 24 до 16% продолжительность сушки до конечного влагосодержания 5% сокращается при температуре 80 °С в 2,2 раза, при 90 °С – 1,64 раза. При высокотемпературной сушке (120 и 140 °С) такого сокращения не наблюдается.

4. Решающее влияние на ускорение процесса сушки оказывает повышение температуры и потенциала сушки нагретого воздуха. Так, например, продолжительность сушки, мин фундука $W_1 = 27\%$ до конечного $W_2 = 5\%$ в зависимости от температуры воздуха (°С) составляет 90–260; 100–177; 110–88; 120–28; т.е. повышение температуры воздуха, начиная с 90 °С; на 10° сокращает продолжительность сушки в 1,5 раза, на 20 °С – в 3 раза и на 30° – в 9,3 раза.

5. Установлено, что при высокотемпературной сушке скорлупа орехов не является препятствием при удалении влаги в виде пара.

6. Выяснено, что предварительная пятиминутная электрофизическая обработка фундука под напряжением 10...12 кВ сокращает продолжительность низкотемпературной сушки (80 °С) в 2,16–2,24 раза по сравнению с необработанными орехами, что указывает на увеличение проницаемости скорлупы и клеточных стенок.

7. Исследованием химических и биохимических изменений фундука при сушке во взвешенном слое установлено: при высокотемпературной сушке (110...140 °С) в связи со значительным сокращением продолжительности сушки хорошо сохраняется белок, аминокислота, жир, витамин Е, С, β -каротин; уменьшаются кислотные числа и перекисные чис-

ла, что указывает на отсутствие прогорклости ореха и сушеный фундук сохраняет высокую питательную и биологическую ценность (табл. 2 и 3).

8. Установлены закономерности кинетики и теплообмена в процессе сушки фундука во взвешенном слое: а) в результате математической обработки экспериментальных данных установлено значение показателя степени $m = 0,5$ уравнения продолжительности сушки (2), позволяющее рассчитать продолжительность сушки до любого влагосодержания (3); б) для решения общего уравнения продолжительности сушки (3) определены уравнения: скорости постоянного периода сушки орехов (4) и ядер фундука (5), уравнения расчета массообменных коэффициентов (6-9) и критического влагосодержания (10).

9. В результате экспериментального определения равновесного влагосодержания фундука (орехов и ядра) в широком диапазоне изменений относительной влажности воздуха при температуре ($^{\circ}\text{C}$): 0, 19 и 40, построены изотермы сорбции и десорбции, составлена таблица (1), позволяющая определить условия хранения фундука, вид тары для перевозки, виды связи влаги с материалом, термодинамические параметры влагопереноса.

10. Определены термодинамические параметры влагопереноса орехов и ядер фундука при различных температурах: химического потенциала, экспериментального потенциала влагопереноса, удельной изотермической влагосмкости, температурного коэффициента химического потенциала и термоградиентного коэффициента.

11. Производственные испытания сушки орехов во взвешенном слое подтвердили результаты экспериментальных исследований. Годовой экономический эффект от внедрения результатов исследований составит 160 тыс. руб.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Бризин М.А., Мурадов А.А. Интенсификация сушки орехов фундука // Тезисы докладов Одесской областной межвузовской научно-практической конференции: социально-экономические и научно-технические проблемы агропромышленного комплекса. — Одесса. — 1988. — С. 241.

2. Зеленская Л.Д., Мурадов А.А. Обоснование условий хранения фундука // Сборник научных трудов: Интенсификация процессов и новые технологии переработки, хранения и транспортировки в АПК. — Киев. — 1988. — С. 168-170.

3. Гришкин М.А., Зеленская Л.Д., Мурадов А.А. Равновесное влагосодержание лесного ореха // Научно-технические проблемы развития агропромышленного комплекса: Тезисы докладов юбилейной 50-й научно-практической конференции ОТМН им. И.В. Ломоносова. — Одесса. — 1990. — С. 53.

к.о. 16958

