

Двторед,  
К 95

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ПИЩЕВОЙ  
ПРОМЫШЛЕННОСТИ им.М.В.ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

КУТАРОВ Владимир Владимирович

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ ГРАНУЛИРОВАННОГО  
КАРТОФЕЛЬНОГО ПЮРЕ НА ЛЕНТОЧНОЙ СУШИЛКЕ

Специальность 05.18.12 - процессы и аппараты  
пищевых производств

Перечет 1986

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

О д е с с а - 1986

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

Научный руководитель - доктор технических наук,  
профессор ЖИДКО В. И.

Официальные оппоненты - доктор технических наук,  
доцент КАЛЕНДЕРЬЯН В. А.

кандидат технических наук,  
доцент ОСТАПЧУК Н. В.

Ведущее предприятие: Научно-производственное объединение  
по производству продуктов из картофеля (г. Минск)

Защита диссертации состоится " 3 " июня 1980г.  
в 12 час. на заседании специализированного совета  
Д 068.35.01 при Одесском технологическом институте пищевой промышленности им. М. В. Ломоносова, 270039, Одесса, Свердлова, 112.

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

" 1 " июня 1980г.

ОНАХТ 13.11.12  
Исследование процесс



v013505

Актуальность темы определяется необходимостью выполнения важной народнохозяйственной задачи, сформулированной в материалах XXV съезда КПСС и последующих Постановлениях ЦК КПСС и Совета Министров СССР - интенсификации производства за счет совершенствования существующих процессов и аппаратов. Ленточные сушильные установки являются одним из основных элементов поточных линий на овощесушильных заводах (и, в частности, по производству сухого картофельного пюре). Отсутствие представительных данных о процессе сушки гранулированного картофельного пюре делает невозможным обоснованное проектирование новых и рациональную эксплуатацию существующих сушилок для гранулированного картофельного пюре. Возникает необходимость разработки методов расчета сушилок, основанных на кинетических зависимостях процесса сушки картофельного пюре.

Работа выполнялась в соответствии с общим планом научно-исследовательских работ ОТИПП им. М. В. Ломоносова по теме "Совершенствование технологии и оборудования пищевой и зерноперерабатывающей промышленности"

Цель работы. Комплексное исследование закономерностей влаго- и теплообмена при сушке гранулированного картофельного пюре в плотном слое, разработка на этой основе методов расчета ленточной сушилки для гранулированного картофельного пюре.

Научная новизна. В работе проведены теоретический анализ и экспериментальные исследования закономерностей влаго- и теплообмена при конвективной сушке гранулированного картофельного пюре в плотном слое при обычном и осциллирующем режимах. Разработан метод расчета сушилки для гранулированного картофельного пюре.

Научные положения, защищаемые автором. В работе выдвинуты научные положения о возможности обобщения кривых сушки различных материалов, сходных по биохимическому составу, капиллярной структуре

Одесский технологический институт пищевой промышленности им. М. В. Ломоносова

V 0 73505

и остроению.

Практическая ценность работы определяется:

- предложенным расчетным методом восстановления (прогнозирования) уравнения кривых сушки для различных материалов;
- предложенным методом расчета многоленточной сушилки при переменных параметрах по обобщенным кинетическим зависимостям;
- рекомендованными рациональными режимами сушки гранулированного картофельного пюре на ленточной сушилке.

Апробация работы. Основные результаты докладывались и обсуждались на:

1. III Всесоюзной конференции "Механика сыпучих материалов", г. Одесса, 1975.
2. Всесоюзной научно-технической конференции по интенсификации процессов сушки и использованию новой техники, г. Калинин, 1977.
3. Республиканском научно-техническом совещании "Разработка и внедрение высокоэффективных сушильных установок", г. Симферополь, 1978.
4. Научно-технических конференциях ОТИПП им. М. В. Ломоносова по итогам НИР в 1976, 1977, 1979 г.г.

Публикации. Материалы диссертации изложены в 7 работах.

Структура и объем диссертационной работы.

Диссертация состоит из введения (стр. 5-9), четырех глав (стр. 10-149), выводов (стр. 150-153), перечня использованной литературы, включающего 106 работ отечественных и 19 зарубежных авторов, 30 иллюстраций, 7 приложений.

В первой главе проведен обзор работ, посвященных современным методам анализа и расчета процесса конвективной сушки пищевых растительных материалов в плотном слое.

На основании изложенного сформулированы основные задачи настоящей работы:

1. Исследование процесса конвективной сушки гранулированного картофельного пюре в плотном слое с целью определения допустимых пределов изменения параметров процесса.

2. Исследование влаго- и теплообмена процесса сушки гранулированного картофельного пюре в плотном слое при обычном и осциллирующем режимах; получение зависимостей для расчета кинетики влаго- и теплообмена.

3. Разработка на основе комплексного экспериментального и теоретического исследования, методов расчета ленточной сушилки для гранулированного картофельного пюре.

Во второй главе приведены методика исследования и описание экспериментальной установки для исследования процесса конвективной сушки гранулированного картофельного пюре в плотном слое. Дан анализ погрешностей экспериментальных данных. Сушка гранулированного картофельного пюре осуществлялась в плотном неподвижном продуваемом слое в цилиндрической кассете ( $D = 0,2$  м). Для регистрации изменяющегося в процессе опыта веса высушиваемого слоя материала использовались весы технические, что обеспечивало точность взвешивания 5%.

Измерения температуры материала проводилось в трех сечениях слоя, термопары вводились в гранулу, находящуюся в нижнем (непосредственно у дна кассеты) слое, в центре всего слоя материала и в верхнем (у поверхности) слое. На выходе из слоя параметры отработанного агента сушки  $t_c$  и  $t_m$  определялись с помощью термопсихрометра. Все температурные измерения проводились хромель-копелевыми термопарами с диаметром электродов  $d = 0,2$  мм. Показания регистрировались многоточечным автоматическим потенциометром ЭПШ-09М (класс 0,5).

На основании предварительных исследований и анализа литературных данных был выбран диапазон изменения параметров процесса. Высота

слоя материала  $H=(0,01+0,04)M$ , диаметр гранулирования пюре в гранулы  $d=(0,003+0,007)M$ , скорость агента сушки  $U=(0,6+1,4)M/с$ .  
 Параметры осциллирования: при симметричном осциллировании период  $T=2,3,4,5$  мин; при несимметричном-полупериод нагрева  $T=5$  мин, полупериод охлаждения  $T_{охл}=2,3,4,5$  мин. В зависимости от конечного влагосодержания, задано по технологии ( $\bar{W}_k^c$ ), температура агента сушки - при односторонней продувке  $t=(70+130)^\circ C$  для  $\bar{W}_k^c=90\%$  и  $t=(70+100)^\circ C$  для  $\bar{W}_k^c=14\%$ ; при осциллирующем режиме  $t=(70+150)^\circ C$  для  $\bar{W}_k^c=90\%$  и  $t=(70+120)^\circ C$  для  $\bar{W}_k^c=14\%$ .  
 В обозначенной области изменения параметров было проверено влияние параметров процесса на качество готового продукта-крупки: коэффициент набухания  $K$ , процент содержания свободного крахмала, цвет крупки. Показано, что изменения параметров процесса в указанном диапазоне не влияет на показатели качества.

В третьей главе приведены результаты комплексного исследования процесса сушки гранулированного картофельного пюре в плотном слое. Предложена обобщенная форма уравнения кривой сушки для различных материалов:

$$\frac{\bar{W}_i^c}{\bar{W}_0^c} = 1 - \frac{N\tau}{1 + B N \tau}, \quad (1)$$

где:  $\bar{W}_0^c$  и  $\bar{W}_i^c$  - начальное и текущее среднееобъемное влагосодержание материала на сухую массу, %;  $\tau$  - текущее время, мин;

и построена по экспериментальным данным М.А.Гришина обобщенная кривая сушки пищевых растительных материалов. Рис.1

$$\frac{\bar{W}_i^c}{\bar{W}_0^c} = f(B N \tau), \quad (2)$$

Коэффициент  $B$ , использованный для построения безразмерной переменной  $B N \tau$  не зависит от режима и способа сушки и для данного конкретного материала есть величина постоянная с точностью полу-

чения экспериментальных данных. Коэффициент  $B [I/\%]$  определяет процесс сушки материала в периоде падающей скорости сушки и, по физическому смыслу представляет собой комплексную характеристику материала, как объекта сушки.

При этом условии:

$$(B N \tau) \left( \frac{\bar{W}_i^c}{\bar{W}_0^c} \right) = const \quad (3)$$

соблюдается лишь внутри группы "подобных" по биохимическому составу, структуре и строению материалов.

Получено уравнение расчета безразмерной переменной  $B N \tau$  для овощных и плодовых культур:

$$B N \tau = 0,82 \frac{1 - \frac{\bar{W}_i^c}{\bar{W}_0^c}}{1 - 0,82 \left( 1 - \frac{\bar{W}_i^c}{\bar{W}_0^c} \right)} \quad (4)$$

Используя обобщенную форму уравнения кривой сушки, можно полностью рассчитать семейство кривых сушки нового материала (из группы "подобных") по минимальным экспериментальным данным. А именно уравнение (1) содержит две неизвестные величины  $N$  и  $B$ . Обычно зависимость  $N$  от параметров процесса конвективной сушки описывается функцией вида:

$$N = A (\bar{W}_0^c)^m t^n (\rho v)^k (H\theta)^p \left( \frac{D}{d} \right)^e, \quad (5)$$

где:  $N$  - максимальная скорость сушки -  $\frac{\%}{\text{мин}}$ ;  
 $d$  - насыпная масса продукта.

Показатели степени  $m, n, k, p, e$  зависят лишь от способа сушки (при сушке в плотном неподвижном слое показатели степени для любых материалов соответственно  $m=1, n=1, k=0,50, p=-0,55, e=0,2$ ).

В координатах  $N = f \left[ (\bar{W}_0^c)^m, t^n, (\rho v)^k, (H\theta)^p, \left( \frac{D}{d} \right)^e \right]$  зависимость

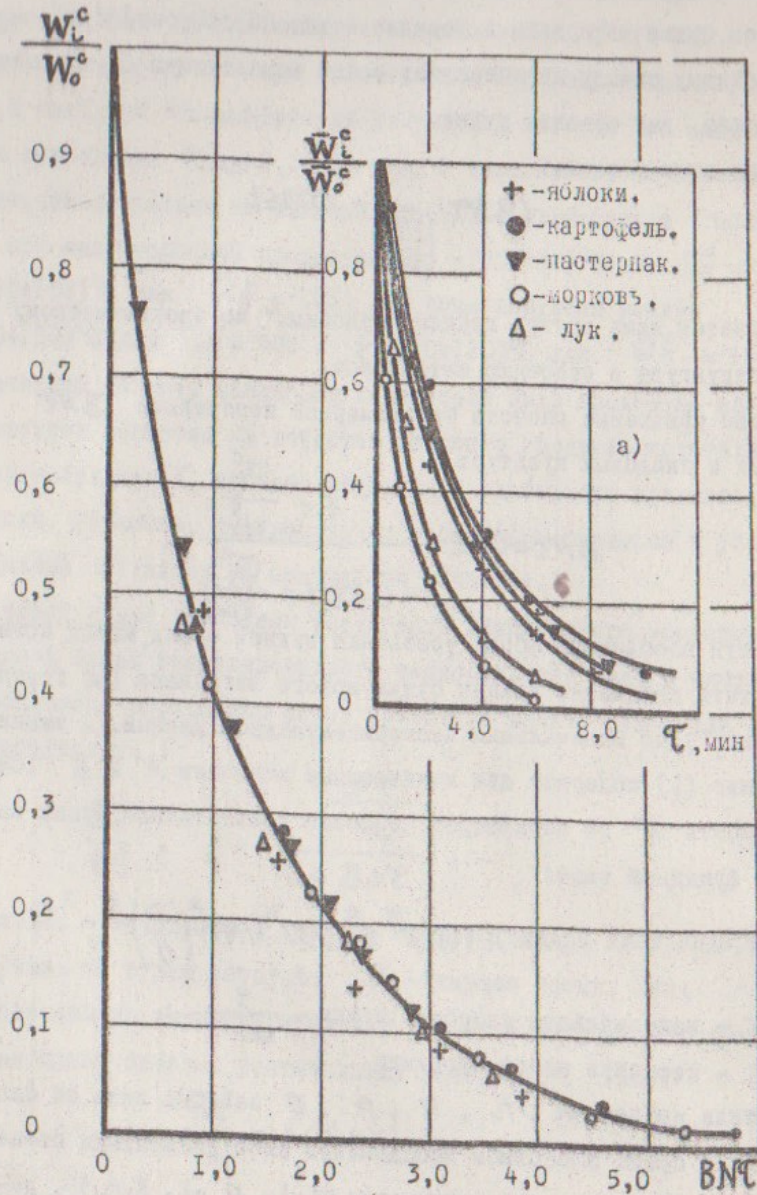


Рис.1. Зависимость относительного влагосодержания от времени (а) и обобщенной переменной (б).

представляет прямую линию, выходящую из начала координат с угловым коэффициентом  $A$ . Для надежности его определения достаточно опытным путем получить значение  $N$  при двух различных режимах. С учетом необходимости определения величины  $B$  исходной, для получения уравнения кривой сушки исследуемого материала, является система уравнений:

$$\begin{cases} N = \frac{1}{\tau} \left[ \frac{1 - \frac{1}{m} \sum \frac{\bar{W}_i^c}{\bar{W}_0^c}}{\frac{1}{m} \sum \frac{1}{\bar{W}_0^c} - B \left( 1 - \frac{1}{m} \sum \frac{\bar{W}_i^c}{\bar{W}_0^c} \right)} \right], \\ B N \tau = f \left( \frac{\bar{W}_i^c}{\bar{W}_0^c} \right). \end{cases} \quad (6)$$

записанная для параллельных  $m$ -опытов. Первое уравнение системы получено путем решения относительно  $N$  уравнения (1). Решение системы уравнений (6) дает значение  $N_1$  и  $N_2$  и, следовательно, коэффициент  $A$  в соотношении (5), т.е. устанавливает зависимость величины  $N$  от параметров процесса, и величину  $B$ .

Среднее квадратическое отклонение при расчете кривых сушки по предложенному методу от данных, полученных экспериментальным путем, составляет  $\sigma = \pm 10\%$ .

В дальнейшем, приведенный выше метод был использован при анализе процесса сушки гранулированного картофельного пюре ( $\bar{W}_0^c = 325-335\%$ ). Были проведены по два параллельных опыта при следующем наборе параметра -  $t = 70^\circ\text{C}$ ;  $v = 0,6 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ ;  $H = 0,04 \text{ м}$   $d = 0,007 \text{ м}$ ;  $t = 130^\circ\text{C}$ ;  $v = 1,4 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ ;  $H = 0,01 \text{ м}$ ;  $d = 0,003 \text{ м}$ ; и получены четыре пары значений ( $\bar{W}^c, \tau$ ). При этом решение системы (6) дало следующие числовые значения для коэффициентов  $A = 0,78$ ,  $B = 2,5 \cdot 10^{-3}$ . Используя значения коэффициентов в уравнениях (1)

и (5) без дополнительных экспериментов рассчитано семейство кривых сушки гранулированного картофельного пюре во всем диапазоне параметров.

Анализ кинетики влагообмена процесса сушки гранулированного картофельного пюре в плотном слое проведенный по разработанному методу, а также результаты контрольных опытов показали, что, процесс сушки протекает в периоде падающей скорости сушки. Рис. 2. Для расчета величины безразмерной скорости сушки получено следующее уравнение:

$$N^* = \frac{N_i}{N} = \frac{1}{N} \frac{d\bar{W}_i^c}{dt} = - \frac{1}{(1 + B N t)^2} \quad (7)$$

Следует отметить, что кривые скорости сушки - плавные кривые, могут быть представлены ломаной линией из двух отрезков с абсциссой точки излома, не зависящей от параметров процесса и равной:  $\bar{U}_r = 1,9 \pm 0,05$  кг/кг. Эта особая точка имеет важное значение при дальнейшем анализе процесса. Проведены исследования по изучению кинетики процесса сушки гранулированного картофельного пюре в плотном слое при осциллирующем режиме. Для определения полного времени процесса в условиях осциллирующего режима был разработан метод, основанный на построении усредненной кривой сушки осциллирующего режима, т.е. кривой, которая проходит через точки, соответствующие началу ( $\bar{W}_0^c; 0$ ) и окончанию ( $\bar{W}_k^c; \tau_k$ ) процесса, и, при этом, аппроксимирует кривую наилучшим образом. Для усредненной кривой применяется уравнение (I). При этом показано, что полученный для усредненной кривой сушки коэффициент  $B$  не зависит от параметров процесса во всем диапазоне их изменения и равен  $B = 0,0025 \pm 0,0003$ , т.е. совпадает со значением коэффициента  $B$  при непрерывном режиме. Величина  $N_0$ , полученная при обработке усредненных кривых характеризует величину начального импульса некоторого условного процесса описываемого усредненной

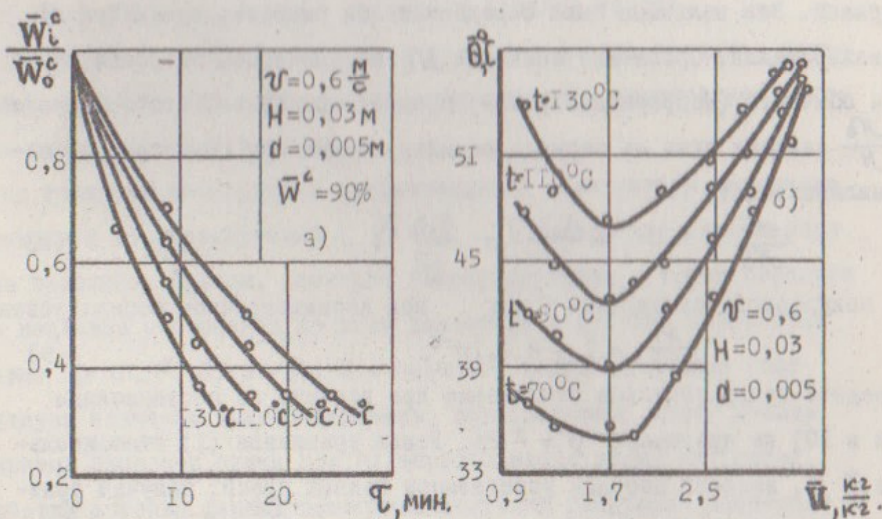


Рис. 2. Изменение относительного влагосодержания (а) в процессе сушки и температурные кривые (б)

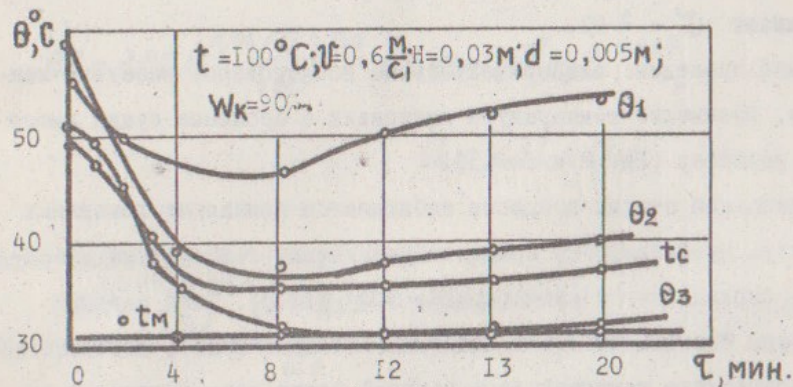


Рис. 3. Изменение в процессе сушки локальных температур материала (1, 2, 3), температуры сухого  $t_c$  и мокрого термометра  $t_m$ .

кривой. Эта величина была определена как скорость сушки при осцилляции. Сравнение значения  $N_0$  со значением скорости сушки обычного (непрерывный режим) процесса показало, что отношение  $\frac{N_0}{N}$  зависит лишь от периода осцилляции при симметричном осцилляции:

$$\frac{N}{N_0} = 1,075 + \frac{0,350}{T} - \frac{9,0}{T^2}; \quad (8)$$

и полупериода охлаждения  $\tau_{охл}$  при несимметричном осцилляции:

$$\frac{N}{N_0} = 1 + 4,0 \cdot 10^{-2}. \quad (9)$$

Среднее квадратическое отклонение при расчете по соотношениям (9 и 10) не превышает  $\sigma = \pm 8\%$ . Решив уравнение (1) относительно  $\tau$  и, записав его для усредненной кривой сушки, получим уравнение для расчета продолжительности процесса сушки при осциллирующем режиме ( $\tau_k^0 = \text{мин}$ ):

$$\tau_k^0 = \frac{1 - \frac{\bar{W}_k^c}{\bar{W}_0^c}}{\frac{1}{\bar{W}_0^c} - B \left( 1 - \frac{\bar{W}_k^c}{\bar{W}_0^c} \right)}. \quad (10)$$

Среднее квадратическое отклонение при расчете по уравнению (10) не превышает  $\sigma = \pm 9\%$ .

Затем было проведено экспериментальное исследование кинетики теплообмена. Изменение температуры материала в процессе сушки имеет сложный характер (Рис.2 и Рис.3).

В начальной стадии процесса наблюдается понижение локальных температур. Наибольшее по величине уменьшение температуры наблюдается в верхней части слоя (кривая 3 на рис.3). Темп падения температуры составляет  $3,5^\circ\text{C}/\text{мин}$  (максимальный темп). Значительно меньше понижается температура в средней части слоя (кривая 2 на рис.3) максимальный темп изменения температуры  $2,2^\circ\text{C}/\text{мин}$ , и незначительно понижается температура в нижней, у дна кассеты, части слоя (кривая 1 на рис.3). Первой достигает минимума температура

в нижней части слоя, затем в средней и верхней частях.

По достижении определенного среднеобъемного влагосодержания материала уменьшение его температуры прекращается и температура материала начинает увеличиваться.

На графиках зависимости среднеобъемной температуры материала от текущего влагосодержания ( $\bar{\theta} - \bar{u}$ ) выделяется характерная точка перегиба. Причем, значение влагосодержания в точке перегиба есть величина постоянная во всем диапазоне изменения параметров и равна  $\bar{u}_r = 1,9 \pm 0,03$  кг/кг. Это значение влагосодержания соответствует значению влагосодержания, определяющему точку излома на кривых скорости сушки при их аппроксимации двумя отрезками. Обработка массива данных позволила получить следующие расчетные соотношения:

- для критерия  $R_B$ :

$$R_B = 3,92 H^{0,82} \left(\frac{d}{D}\right)^{0,6} (1 - 0,59 \cdot 10^{-2} t) \bar{u}^2, \quad \bar{u}_r \leq \bar{u} \leq \bar{u}_0. \quad (11)$$

$$R_B = 1,88 H^{0,88} \left(\frac{d}{D}\right)^{0,6} (3,13 - 10^{-2} t) \bar{u}^{-0,64}, \quad \bar{u}_k \leq \bar{u} \leq \bar{u}_r.$$

- для среднеобъемной температуры материала ( $^\circ\text{C}$ ):

$$\bar{\theta} = \bar{\theta}_0 - \frac{63 H^{0,82} \left(\frac{d}{D}\right)^{0,6} (24 - 0,054 t - 0,052 \cdot 10^{-4} t^2)}{\bar{u}_0} (\bar{u}_0^{2,05} - \bar{u}^{2,05}), \quad \bar{u}_r \leq \bar{u} \leq \bar{u}_0. \quad (12)$$

$$\bar{\theta} = \bar{\theta}_r - \frac{78,3 H^{0,88} \left(\frac{d}{D}\right)^{0,6} (0,123 t + 0,052 \cdot 10^{-4} t^2 - 5,19)}{\bar{u}_r} (\bar{u}^{-0,34} - \bar{u}_r^{-0,34}), \quad \bar{u}_k \leq \bar{u} \leq \bar{u}_r.$$

Среднее квадратическое отклонение при расчете величины критерия  $R\bar{B}$   $\sigma = \pm 8\%$  и  $\bar{\theta} \sigma = \pm 10\%$ . Кинетика теплообмена в условиях применения осциллирующего режима изучалась на основании экспериментальным образом полученных температурных кривых  $(\bar{\theta}-\tau)$  и  $(\bar{\theta}-\bar{u})$ . Количественный анализ процесса не приводился. В работе так же приведены соотношения для расчета локальных температурных кривых и локального влагосодержания в слое материала (поля температуры и влагосодержания).

Для определения величины безразмерного теплового потока на испарение влаги и нагрев материала было использовано основное уравнение кинетики процесса сушки:

$$Q^* = \frac{Q(\tau)}{Q_0} = N^* \frac{1+R\bar{B}}{1+R\bar{B}_0} \quad (13)$$

В уравнении (13) величины  $Q_0$  и  $R\bar{B}_0$  - тепловой поток и критерий в начальный момент времени.

Среднее квадратическое отклонение при расчете по уравнению (13) не превышает  $\sigma = \pm 15\%$ .

В процессе исследования установлена зависимость между характером изменения локальных температурных кривых и кривых изменения температур мокрого  $t_m$  и сухого  $t_c$  термометров. Температура мокрого термометра  $t_m$  на отрезке  $\bar{u}_r \leq \bar{u} \leq \bar{u}_0$  величина практически не зависящая от времени. Значение температуры сухого термометра  $t_c$  в начале процесса меньше температуры поверхности материала

$\theta_n > t_c$ , в точке  $\bar{u} = \bar{u}_r$   $\theta_n = t_c$  и в дальнейшем  $\theta_n < t_c$ .

Температура совпадает со среднеобъемной температурой материала. Причем это совпадение улучшается при уменьшении влагосодержания высушиваемого материала.

Среднее квадратическое отклонение величины  $t_c$  от среднеобъемной

температуры материала составляет  $\sigma = \pm 9\%$ . Температура мокрого термометра  $t_m$  на всем протяжении процесса определяется по соотношению:

$$t_m = 8,5 + 0,24 - 0,178 (N\tau) + 16,8 \left(\frac{d}{D}\right) \quad (14)$$

Среднее квадратическое отклонение при расчете по соотношению (14) не превышает  $\sigma = \pm 7\%$ .

В качестве основных показателей энергетического совершенства сушильного процесса были выбраны: удельный расход тепла  $Q_0$  и агента сушки  $Q_D$  и тепловой к.п.д.  $\eta_T$ .

Для расчета энергетических показателей получены соотношения, основанные на обобщенном уравнении кривой сушки (табл. I).

Дано частное решение для гранулированного картофельного пюре.

Тепловой к.п.д. сушильного процесса определялся по соотношению:

$$\eta_T = \frac{r}{Q_0} \quad (15)$$

Для графической иллюстрации зависимости энергетических показателей от параметров процесса были применены бинарные шкалы.

В четвертой главе рассмотрены вопросы расчета многоленточной сушилки. Обоснована возможность применения расчетного аппарата, полученного при исследовании процесса сушки при постоянных параметрах для процесса со ступенчатом изменении параметров. Показано, что расчет процесса сушки с переменными параметрами необходимо вести с использованием видоизмененной обобщенной кривой сушки - кривой сушки в координатах интервал удаляемого влагосодержания  $\Delta W$  (либо безразмерный интервал  $\frac{\Delta W}{W_0}$ ) - безразмерная переменная  $В\eta\tau$ .

Рассмотрены вопросы теплообмена слоя материала и расчет энергетических показателей процесса сушки при переменных параметрах.

Показано, что в общем случае, расчет многоленточной сушилки проводится по уравнениям, записанным для каждой зоны:

$$\begin{cases} G_n = \omega_n \cdot S \cdot H_n \cdot \sigma_n; \\ l = \omega_n \cdot \tau_k; \\ \tau_k = \frac{1}{B N_n} (B N \tau) \Delta W_n. \end{cases} \quad (16)$$

В этих уравнениях изменяющимися могут быть следующие параметры:  
 $G$  - производительность сушилки,  $\frac{кг}{час}$ ;  $\omega$  - скорость движения ленты,  $\frac{м}{час}$ ;  $\sigma$  - насыпная масса,  $\frac{кг}{м^3}$ ;  $H$  - высота слоя материала, м;  $\tau_k$  - время процесса, мин;  $\Delta W_n$  - интервал удаляемого влагосодержания, - для каждой из  $n$ -зон;  $S$  - полезная ширина, м и  $l$  - рабочая длина, м - ленты сушилки.

Здесь  $N_n \frac{\%}{мин}$  - скорость сушки в начале  $n$ -ой зоны.  
 Последнее уравнение в системе получено на основании обобщенной кривой. В конкретных условиях число переменных значительно меньше и не превышает трех. Остальные параметры выбираются и закрепляются на основании требований технологии и конструктивных соображений. Процедура расчета многоленточной сушилки по уравнениям (18) следующая: вначале уравнения (18) решаются для  $n = I$  (первая колонка табл. I); затем последовательно получаются решения для каждого  $n + I$  (вторая колонка табл. I).

Решения, в том виде как они представлены в табл. I могут быть использованы для расчета многоленточной сушилки для любого материала из группы, представленной обобщенной кривой сушки. В работе рассмотрена процедура расчета ленточной сушилки при использовании осциллирующего режима. Даны частные решения для гранулированного картофельного пюре.

Обоснованы рациональные зоны сушки для гранулированного картофельного пюре.

Изложена методика выбора рациональных параметров процесса для каждой зоны. Представлена блок-схема расчета ленточной сушилки.

Расчет многоленточной сушилки при переменных параметрах по обобщенным кинетическим зависимостям

Таблица I

	Первая зона	$n$ -я зона
$\omega, \frac{м}{час}$	$\left( \frac{S}{G_0} \right)^{1,22} \left[ \frac{60 \cdot A \cdot B \cdot l \cdot \sqrt{(PUG)_1} \cdot D^{0,92}}{(BNT)_{\Delta W_1}} \right]^{0,92}$	$\omega_n = \omega_{n-1} \left[ \frac{1 - B(\bar{W}_0 - \bar{W}_n^c)}{1 - B(\bar{W}_0 - \bar{W}_{n-1}^c)} \right]^2 \frac{(BNT)_{\Delta W_{n-1}}}{(BNT)_{\Delta W_n}} \cdot \left( \frac{t_n}{t_{n-1}} \right)^{0,55} \left( \frac{\bar{W}_0^c}{\bar{W}_n^c} \right)^{2,22}$
$H, м$	$\left[ \frac{60 \cdot A \cdot B \cdot S \cdot l \cdot \sqrt{(PUG)_1} \cdot D^{0,92}}{(BNT)_{\Delta W_1}} \right]$	$H_n = H_{n-1} \cdot \frac{\omega_{n-1}}{\omega_n}$
$t, ^\circ C$	$\frac{1,67 \cdot 10^{-2} \cdot \omega_1^{0,45} \cdot (BNT)_{\Delta W_1} (G_0)^{0,55} \cdot D^{0,92}}{A \cdot B \cdot l \cdot \sqrt{(PUG)_1} \cdot D^{0,92}}$	$t_n = t_{n-1} \left[ \frac{1 - B(\bar{W}_0^c - \bar{W}_{n-1}^c)}{1 - B(\bar{W}_0^c - \bar{W}_n^c)} \right]^2 \frac{(BNT)_{\Delta W_{n-1}}}{(BNT)_{\Delta W_n}} \cdot \left( \frac{\omega_n}{\omega_{n-1}} \right)^{0,45} \left( \frac{(PUG)_{n-1}}{(PUG)_n} \right)^{0,55} \cdot \left( \frac{\bar{W}_n^c}{\bar{W}_0^c} \right)$

*е.в.*  
 VOT 3505

Продолжение табл. I

$Q, \frac{\text{кДж}}{\text{кг. исп. вл.}}$	$\frac{60}{A \cdot B} \frac{\bar{W}_0^c - \bar{W}_1^c}{\bar{W}_0^c - \bar{W}_k^c} (B \cdot N \cdot t) \Delta w_k \cdot \frac{\sqrt{(P \cdot U)_1}}{t_1 (H \cdot r)_1}^{0,45} \cdot \left(\frac{D}{D}\right)^{0,2} \cdot [t_1 + 10^{-3} d (2949 + 1,97 t_1)]$	$\frac{60}{A \cdot B} \frac{\bar{W}_n^c - \bar{W}_n^c}{\bar{W}_0^c - \bar{W}_k^c} (B \cdot N \cdot t) \Delta w_n \cdot \frac{\sqrt{(P \cdot U)_n}}{t_n (H \cdot r)_n}^{0,45} \left(\frac{D}{D}\right)^{0,2} \cdot [t_n + 10^{-3} d (2949 + 1,97 t_n)]$
$\tau, \frac{\text{кг}}{\text{кг. исп. вл.}}$	$\frac{60}{A \cdot B} \frac{\bar{W}_0^c - \bar{W}_1^c}{\bar{W}_0^c - \bar{W}_k^c} (B \cdot N \cdot t) \cdot \frac{\sqrt{(P \cdot U)_1}}{t_1 (H \cdot r)_1}^{0,45} \left(\frac{D}{D}\right)^{0,2}$	$\frac{60}{A \cdot B} \frac{\bar{W}_n^c - \bar{W}_n^c}{\bar{W}_0^c - \bar{W}_k^c} (B \cdot N \cdot t) \Delta w_n \cdot \frac{\sqrt{(P \cdot U)_n}}{t_n (H \cdot r)_n}^{0,45} \left(\frac{D}{D}\right)^{0,2}$

Предложения для промышленности:

На основании результатов исследований для применения в научно-исследовательских, проектно-конструкторских организациях и на овощесушильных заводах предлагается:

1. Метод составления (прогнозирования) уравнения сушки для исследуемого материала;
  2. Метод расчета многоленточной сушильной установки при переменных параметрах по обобщенным кинетическим зависимостям;
  3. Рациональные режимы процесса сушки гранулированного картофельного пюре: на участке удаляемого влагосодержания от  $\bar{u}_0$  до  $\bar{u}_r$   $t = 110^\circ\text{C}$ , от  $\bar{u}_r$  до  $\bar{u} = 0,9 \text{ кг/кг}$  -  $t = 80^\circ\text{C}$ , от  $\bar{u} = 0,9 \frac{\text{кг}}{\text{кг}}$  до  $\bar{u} = 0,14 \frac{\text{кг}}{\text{кг}}$  -  $t = 70^\circ\text{C}$ .
- Применение на существующих сушильках рекомендованных режимов позволяет получить годовой экономический эффект (по затратам на испаренную влагу) при производительности линии 400 кг/час 18,800 руб. за счет интенсификации процесса сушки.

ВЫВОДЫ

1. Наиболее предпочтительным, при описании кривых сушки пищевых растительных материалов (овощные культуры) и, в частности, гранулированного картофельного пюре является дробно-рациональная функция зависимости  $W$  от  $\tau$  с двумя коэффициентами - постоянным коэффициентом  $B$  и коэффициентом  $N$ , зависящим от параметров процесса.

2. Для группы материалов, сходных по биохимическому составу, капиллярной структуре и строению не зависимо от способа и режима сушки все многообразие семейства кривых сушки может быть представлено одной обобщенной кривой сушки по безразмерной переменной  $B \cdot N \cdot t$ .

3. Получено обобщенное уравнение в безразмерных переменных кривой сушки овощных культур и, в частности, гранулированного картофельного пюре.

4. Для кинетики влаго- и теплообмена процесса сушки гранулированного картофельного пюре в плотном слое характерны две зоны, определяемые точкой перегиба на температурных кривых с граничным влагосодержанием  $U_r$  не зависящие от параметров процесса.

5. Для кинетики влаго- и теплообмена процесса конвективной сушки гранулированного картофельного пюре в плотном слое характерно:

- а) различие по зонам степени и характера влияния температуры агента сушки на материал;
- б) среднеобъемная температура материала определяется, в основном, локальной температурой слоя в нижней его части;
- в) характер изменения параметров агента сушки (температуры сухого термометра) на выходе из слоя материала аналогичен характеру изменения среднеобъемной температуры материала;

6. В результате проведенных исследований разработан метод расчета многоленточной сушилки при переменных параметрах по обобщенным кинетическим зависимостям.

7. Метод восстановления (прогнозирования) уравнения кривых сушки исследуемого материала внедрен во Всесоюзном научно-исследовательском институте комбикормовой промышленности (Украинский филиал).

8. Метод расчета многоленточной сушилки внедрен в ОКБ картофелеперерабатывающей промышленности (г. Минск).

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Жидко В.И., Кутаров В.В. Некоторые закономерности кинетики конвективной подсушки гранулированного картофельного пюре. - Известия вузов, Пищевая технология 1975, №5, с. 53-56.
2. Жидко В.И., Кутаров В.В. Расчет кинетики нагрева плотного слоя гранулированного пюреобразного материала при сушке. - Инж. физ. журн. 1976, №1, т. 31, с. 122-125.
3. Жидко В.И., Кутаров В.В. Влияние режимов конвективной подсушки гранулированного картофельного пюре на качество картофельной крупки. - В кн.: Пищевая промышленность, Киев, 1978, вып. 24, с. 79-82.
4. Жидко В.И., Кутаров В.В. Обобщенное уравнение кинетики сушки для различных материалов. В кн.: Материалы Всесоюзной научно-технической конференции по интенсификации процессов сушки и использованию новой техники. Теория сушки. Калинин, 1977, с. 95-99.
5. Жидко В.И., Кутаров В.В. Кинетика нагрева плотного слоя гранулированного пюреобразного материала при продувке его горячим воздухом. В кн.: Тезисы докладов III Всесоюзной конференции "Механика сыпучих материалов", 1975, с. 279-280, Одесса.
6. Жидко В.И., Кутаров В.В. Анализ эффективности сушильных процессов. - Известия вузов, Пищевая технология, 1977, №3, с. 14-15.
7. Кутаров В.В., Жидко В.И. Разработка рациональных режимов сушки картофельных гранул на модернизированных промышленных линиях. В кн.: Республиканское научно-техническое совещание. Разработка и внедрение высокоэффективных сушильных установок. Симферополь, ноябрь 1978.

Кутаров