

Автор едр.

Г 83

Министерство высшего и среднего специального образования УССР

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
им. И. В. СТАЛИНА

---

*Аспирант М. А. ГРИШИН*

**ИССЛЕДОВАНИЕ  
ПРОЦЕССА СУШКИ ОВОЩЕЙ  
В ВИХРЕВОМ ПОТОКЕ ВОЗДУХА  
(в полувзвешенном состоянии)**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель  
доктор технических наук  
профессор Г. К. ФИЛОНЕНКО.

ОДЕССА — 1960

Авторефер  
Г 83

Министерство высшего и среднего специального образования УССР

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
им. И. В. СТАЛИНА

Аспирант М. А. ГРИШИН

ИССЛЕДОВАНИЕ  
ПРОЦЕССА СУШКИ ОВОЩЕЙ  
В ВИХРЕВОМ ПОТОКЕ ВОЗДУХА  
(в полувзвешенном состоянии)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель  
доктор технических наук  
профессор Г. К. ФИЛОНЕНКО.

ОНАХТ 04.07.11  
Исследование процесс



v017971

176101  
ОНАХТ  
БІБЛІОТЕКА

Экспериментальное исследование выполнено в  
Одесском технологическом институте пищевой и  
холодильной промышленности.

ОДЕССА  
1957

Коммунистическая партия и Советское правительство всегда придавали первостепенное значение вопросам внедрения передовой техники и технологии в народное хозяйство страны. В исторических решениях XXI съезда КПСС ставится задача дальнейшего технического прогресса во всех отраслях народного хозяйства СССР, предусматривается комплексная механизация и автоматизация производственных процессов.

Состояние слоя, характеризуемое беспорядочным, непрерывным движением частиц в ограниченном объеме по высоте получило наименование: «кипящего», «псевдооживленного», «полувзвешенного». Эти термины полностью не отражают сути данного явления, тем более применительно к крупнозернистому материалу. Профессор Г. К. Филоненко предложил называть такое состояние вихревым процессом, отражающим характер движения частиц.

Независимость сопротивления вихревого состояния слоя от скорости воздушного потока, максимальная поверхность соприкосновения твердых частиц с потоком воздуха; турбулизация пограничного слоя и выравнивание температуры частиц и воздуха в результате непрерывного вращения и перемешивания частиц — значительно интенсифицируют технологические процессы многих производств, в том числе процесс вихревой сушки овощей.

В литературном обзоре диссертации, состоящем из 60 страниц машинописного текста, критически рассмотрено 69 работ советских и иностранных авторов, посвященных исследованиям: а) процессов вихревой сушки и сушки во взвешенном состоянии, б) процессов сушки овощей и в) гидродинамики и теплообмена в вихревом потоке воздуха. Из данных литературы можно сделать такие краткие выводы:

1. В литературе не отражены работы, связанные с исследованием вихревой сушки овощей.

2. Вопросы вихревой сушки наиболее полно отражены в работах И. М. Федорова и Е. О. Розенталь. Однако И. М. Федоров при исследовании вихревой сушки углей не показал влияния параметров сушильного агента на процесс, не дал урав-

нения продолжительности сушки. Исследования Е. О. Розенталя по вихревой сушке желатины были проведены только во втором периоде сушки, сушку в первом периоде постоянной скорости из-за слипания частиц автор проводил в неподвижном слое. Работы Е. О. Розенталя также не содержат уравнений продолжительности сушки.

3. Исследованиями, проведенными в США, установлено, что сроки хранения сушеных овощей примерно удваиваются при каждом уменьшении содержания влаги на 2% ниже 8%.

4. Хотя вопросы гидродинамики вихревого слоя отражены в многочисленных работах, но в большинстве из них данные приводятся для пылевидного и мелкозернистого материала с частицами размеров от сотых долей мм до 4—5 мм. Широкое исследование И. М. Федорова касалось и более крупных частиц, однако, критерий Федорова изменялся в пределах 40—200, что недостаточно для перевода крупнозернистого материала в вихревое состояние. В работе Е. О. Розенталя, проведенной с частицами желатины близкими по размерам и форме к принятым в нашем исследовании, была показана только качественная картина; количественных зависимостей гидродинамики автор не приводит.

5. По вопросам теплообмена в вихревом слое имеются различные мнения: 1) одни авторы считают, что коэффициент теплообмена вихревого слоя выше, чем неподвижного слоя при равных скоростях в свободном сечении канала, другие, — наоборот, доказывают обратную зависимость; 2) одни исследователи считают, что значение коэффициента теплообмена повышается с увеличением размера частиц; другие — придерживаются противоположной точки зрения.

Исходя из изложенного, были намечены следующие задачи работы:

1. Исследовать процесс вихревой сушки овощей:

а) изучить кинетику процесса вихревой сушки овощей в зависимости от температуры, влажности, скорости воздушного потока и удельной нагрузки сырья на рабочую поверхность сетки;

б) установить влияние формы и размера частиц на процесс вихревой сушки картофеля;

в) определить влияние повышенных температур воздуха (100—120°C) на процесс вихревой сушки овощей с анализом изменения витамина «С» в процессе сушки;

г) выяснить характер усадки овощей при вихревой сушке;

д) исследовать процесс вихревой сушки до возможно малой конечной влажности 3—5%.

2. Изучить гидродинамику крупнозернистого материала в вихревом потоке воздуха.

3. Выявить закономерности теплообмена при вихревой сушке овощей.

4. На основании экспериментальных данных работы и известных из теории сушки зависимостей получить расчетные уравнения продолжительности вихревой сушки овощей в зависимости от различных факторов ведения процесса.

Исследование проводилось с 1955 г. по 1959 г.

Экспериментальная часть работы состоит из 3-х основных глав: 1) Гидродинамика крупнозернистого материала в вихревом потоке воздуха, 2) тепло- и массообмен в процессе вихревой сушки овощей и 3) исследования процесса вихревой сушки овощей.

### Экспериментальная установка и методика исследования

Экспериментальная, рециркуляционная, вихревая сушильная установка представляет собой замкнутый контур, состоящий из центробежного вентилятора среднего давления, электронагревательной камеры и съемной рабочей камеры, соединенных воздуховодами.

Рабочая камера представляет собой прямоугольный стакан сечением  $100 \times 100$  и высотой 400 мм. Для визуальных наблюдений одна сторона рабочей камеры сделана стеклянной с делениями для фиксирования высоты слоя; торцы камеры ограничены сетками, верхняя сетка съемная для загрузки продукта. Крепление камеры к трубопроводам — фланцевое. Необходимая плотность соединения рабочей камеры с воздуховодами обеспечивается двумя спиральными пружинами.

Регулировка температуры воздуха обеспечивалась автоматически с помощью милливольтметра МРЩ-Пр 54 и автотрансформаторов типа ЛАТР-1. Точность регулирования температуры составляет  $\pm 1^\circ$ . Замер температуры по «сухому» и «мокрому» термометрам ценой деления  $0,5^\circ$  осуществлялся перед рабочей камерой и после нее.

Регулировка скорости воздуха производилась с помощью шибера. Измерение скорости воздуха осуществляется с помощью тарированной острой диафрагмы, соединенной с микроманометром ММН. Соппротивление слоя измерялось другим микроманометром ММН, соединенным с датчиками, находившимися перед рабочей камерой и после нее.

Перед началом процесса сушки картофель и свекла подвергались очистке, резке на строго определенные формы и размеры, а зерна зеленого горошка освобождались от стручков. Затем все указанные овощи подвергались бланшировке паром и промывались холодной водой.

Перед началом каждого опыта устанавливался заданный режим работы: строго определенные температура и скорость воздушного потока, не изменяющиеся на протяжении опыта.

В процессе вихревой сушки через интервалы в 5 минут в первые 1—1,5 часа сушки, затем через 10 и 15 минут производились замеры: веса материала, скорости воздушного потока, сопротивления и высоты слоя, температуры «сухого» и «мокрого» термометров на входе в рабочую камеру и выходе из нее, в некоторых опытах температура внутри частицы.

Влажность готового продукта определялась путем досушки пробы, пропущенной через мельницу, в сушильном шкафу при температуре 105°C до постоянного веса. По влажности и изменению веса материала в процессе вихревой сушки строились кривые сушки для каждого опыта.

Измерение веса материала в процессе сушки производилось взвешиванием съемной рабочей камеры с продуктом на весах типа ВЦН с ценой деления 2 г. Продолжительность взвешивания составляла 6—9 сек. Прямые опыты показали, что период взвешивания на весах практически не влияет на продолжительность сушки. Контроль изменения веса материала в процессе вихревой сушки определяется показаниями величины сопротивления слоя.

Как известно, сопротивление слоя в вихревом потоке воздуха не зависит от скорости воздушного потока. Исследование сопротивления слоя при вихревой сушке овощей при различных скоростях и температурах воздуха и удельных нагрузках материала показало прямую зависимость между изменением веса материала в процессе сушки и сопротивлением слоя.

Так для кубиков картофеля и свеклы 8×8×8 мм изменение сопротивления слоя в процессе вихревой сушки для различных первоначальных удельных нагрузок материала (от 20 до 120 кг/м<sup>2</sup>) и независимо от величины скорости воздуха выражается единым уравнением:

$$\Delta p = 0,78 \frac{G}{F} \quad (1)$$

Аналогично для зеленого горошка:

$$\Delta p = 0,83 \frac{G}{F}, \quad (2)$$

где  $G$  — вес материала кг;

$F$  — рабочая поверхность сетки м<sup>2</sup>.

Таким образом, зная величину рабочей поверхности сетки аппарата, можно знать вес материала в любой момент вихревой сушки по величине сопротивления слоя, показываемого микроманометром.

Исследование гидродинамики частиц определенной формы и размеров производилось помещением определенной навески (5—40 кг/м<sup>2</sup>) в рабочую камеру и продувкой ее воздухом при различных скоростях потока. При каждой фиксированной ско-

рости воздушного потока проводились замеры сопротивления, высоты слоя частиц и визуальные наблюдения за характером движения частиц в слое.

### Гидродинамика крупнозернистого материала в вихревом потоке воздуха

В результате экспериментальных исследований, проведенных с частицами разнообразных размеров (эквивалентным диаметром от 5,9 до 14 мм) и форм (кубики, параллелепипеды, цилиндры, шарики) сухого картофеля, а также зеленого горошка, установлены уравнения, определяющие границы и состояние слоя в вихревом потоке воздуха.

Переход слоя из неподвижного состояния в вихревое происходит при достижении потоком воздуха, проходящем сквозь слой материала снизу вверх, критической скорости  $V'_k$ , при которой давление воздушного потока уравновешивает вес частиц. При этом слой расширяется, частицы переходят в вихреобразное движение и перемешивание. При дальнейшем увеличении скорости воздуха сопротивление слоя не изменяется, лишь увеличивается высота и пористость слоя и движение частиц становится более интенсивным.

Исследованием на различных удельных нагрузках материала от 5 до 40 кг/м<sup>2</sup> установлено, что критическая скорость  $V'_k$  перехода слоя от неподвижного состояния в вихревое не зависит от величины удельной нагрузки материала. Определена критическая скорость  $V'_k$  перехода слоя от неподвижного состояния в вихревое для двух характерных точек: 1) начала перехода  $V'_{kI}$  и 2) интенсивного перемешивания частиц при высоте слоя, превышающей начальное неподвижное состояние слоя в два раза  $V'_{kII}$ :

$$V'_{kI} = 1,0 + 0,6 K_{\phi} d_s \quad (3)$$

$$V'_{kII} = 2,1 + 0,8 K_{\phi} d_s, \quad (4)$$

где  $d_s$  — эквивалентный диаметр частиц, выражающий длину пути перемещения влаги в материале:

$$d_s = \sqrt[3]{\frac{6G}{\pi \gamma_m n}} = 1,24 \sqrt[3]{V}. \quad (5)$$

$G$  — вес частиц пробы;

$V$  — объем частицы;

$n$  — число частиц в пробе;

$\gamma_m$  — удельный вес частиц;

$K_{\phi}$  — динамический коэффициент формы, равный отношению скорости витания частицы данной формы к скорости витания шара, равновеликого по объему.

(Значения  $K_{\phi}$ : 1) для шаровой формы и зеленого горошка 1,0; 2) для кубиков разных размеров 0,9; для параллелепипедов различных сечений, но длиной 30 мм 0,558; и длиной 20 мм 0,736 и т. д.).

В критериальной форме уравнения (3 и 4) выражаются соответственно:

$$Re'_{кI} = 4,75 Fe - 325 \quad (6)$$

и

$$Re'_{кII} = 8,4 Fe - 530, \quad (7)$$

где  $Re'_k = \frac{V'_k d_{\text{э}}}{\nu}$  — критерий Рейнольдса;

$Fe = d_{\text{э}} \sqrt[3]{\frac{4g}{3\nu^2} \left( \frac{\gamma_M}{\gamma_B} - 1 \right)}$  — критерий Федорова;

$\nu$  — кинематическая вязкость воздуха  $\text{м}^2/\text{сек}$ ;

$g$  — ускорение силы тяжести  $\text{м}/\text{сек}^2$ ;

$\gamma_B$  — удельный вес воздуха  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Верхним пределом существования вихревого слоя является скорость питания  $V''_k$ , выше которой весь слой уносится потоком воздуха из рабочей камеры, т. е. наступает явление пневмотранспорта.

Для частиц разнообразных форм и размеров установлена единая зависимость:

$$V''_k = 6,1 K_{\phi} \sqrt{d_{\text{э}} \frac{\gamma_M}{\gamma_B}} \quad (8)$$

$$Re''_k = 41,5 K_{\phi} Fe - 3000, \quad (9)$$

где  $Re''_k = \frac{V''_k d_{\text{э}}}{\nu}$

### Расчет процесса вихревой сушки

Количественные закономерности процесса вихревой сушки овощей можно рассчитать на основании применения теории приведенной скорости сушки Г. К. Филоненко, которая устанавливает связь между скоростью сушки и влажностью материала на основе анализа данных экспериментального исследования процесса сушки.

Отношение скорости сушки во 2-м периоде уменьшающейся скорости к максимальной скорости сушки первого периода постоянной скорости называется приведенной скоростью сушки  $\psi$ :

$$\psi = \frac{dW}{dZ} : N. \quad (10)$$

Приведенная скорость сушки  $\psi$  характеризует структуру материала, связь влаги с материалом, зависит только от физико-химических свойств и влажности материала, исключает влияние внешних факторов сушки, т. е. температуры, скорости и влажности сушильного агента.

Обобщив большее количество различных экспериментальных данных, Г. К. Филоненко определил основное уравнение приведенной скорости сушки:

$$\psi = \frac{(W - W_p)^m}{A + \beta(W - W_p)^m}, \quad (11)$$

где  $W$  — влажность на сухой вес в данный момент времени %;

$W_p$  — равновесная влажность материала %;

$A, \beta, m$  — постоянные коэффициенты для данного материала, не зависят от влажности материала.

Показатель степени  $m$  характеризует связь влаги с материалом, не зависит от размера и формы частиц. Коэффициенты  $A$  и  $\beta$  определяются величиной размера частиц.

Из уравнения (10) определяется общее уравнение скорости сушки:

$$- \frac{dW}{dZ} = N\psi. \quad (12)$$

Подставляя сюда значение  $\psi$  из (11), находим продолжительность сушки  $Z$ :

$$Z = \frac{1}{N} [(W_1 - W_k) + A \int_{W_2}^{W_k} \frac{dW}{(W - W_p)^m} + \beta(W_k - W_2)]. \quad (13)$$

Исследованием установлено, что для картофеля, свеклы, моркови, капусты и зеленого горошка показатель степени  $m=1$ .

Тогда уравнение (13) будет иметь вид:

$$Z = \frac{1}{N} [(W_1 - W_k) + A \cdot 2,3 \lg \frac{W_k - W_p}{W_2 - W_p} + \beta(W_k - W_2)] \quad (14)$$

Основное уравнение продолжительности сушки (14) соответствует разнообразным опытным данным вихревой сушки овощей. Тем самым, подтверждается применение метода приведенной скорости сушки в исследовании вихревого способа сушки овощей.

### Тепло- и массообмен в процессе вихревой сушки овощей

Исследование процесса тепло- и массообмена при сушке основано на определении коэффициента теплоотдачи, учитывая все особенности процесса. Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  исследован для периода постоянной скорости сушки.

Исходя из того, что сушка является тепловым процессом:

$$Q = \alpha \cdot F \cdot \Delta t \cdot Z = Wr, \quad (15)$$

отсюда

$$\alpha = \frac{Wr}{F \cdot \Delta t \cdot Z}, \quad (16)$$

где  $W$  — количество испарившейся влаги кг;  
 $r$  — скрытая теплота парообразования:  $r = i_n - \vartheta = 595 + 0,47t - \vartheta$  ккал/кг;  
 $t$  — температура воздушного потока °С;  
 $\vartheta$  — температура поверхности материала °С;  
 $F$  — поверхность материала м<sup>2</sup>;  
 $\Delta t$  — средняя разность температур между потоком нагретого воздуха и частицами материала °С;  
 $Z$  — продолжительность сушки в часах.

В процессе вихревой сушки происходит непрерывное хаотическое движение и перемешивание частиц, в результате которого происходит выравнивание температуры как воздуха, так и частиц материала по всему объему вихревого слоя. Эта особенность упрощает определение температурной разности:

$$\Delta t = t_{\text{ср}}^c - \vartheta.$$

Так как в первом периоде постоянной скорости сушки температура частиц постоянная и равна температуре «мокрого» термометра воздушного потока:

$$\Delta t = t_{\text{ср}}^c - t_{\text{ср}}^m = E_{\text{ср}}, \quad (17)$$

где  $t_{\text{ср}}^c$  и  $t_{\text{ср}}^m$  — соответственно средние температуры нагретого воздуха по «сухому» и «мокрому» термометрам до рабочей камеры и после нее;  
 $E_{\text{ср}}$  — средний потенциал сушки °С.

Тогда уравнение (16) примет вид:

$$\alpha = \frac{W \cdot r}{F \cdot E_{\text{ср}} \cdot Z}. \quad (18)$$

Период нагрева материала при вихревой сушке слишком кратковременный, чтобы его учитывать. В процессе вихревой сушки материала расход тепла осуществляется только на испарение влаги из материала.

В результате экспериментального исследования установлено, что значение коэффициента теплоотдачи при вихревой сушке овощей в первом периоде постоянной скорости сушки прямо пропорционально весовой скорости воздуха  $v\gamma$  в первой степени, что указывает на значительную интенсивность процесса вихревой сушки:

а) для кубиков картофеля  $8 \times 8 \times 8$  мм:

$$\alpha = 7 + 9,4 v\gamma$$

$$Nu = 2,6 + 0,0077 Re. \quad (19)$$

б) для зеленого горошка:

$$\begin{aligned} \alpha &= 34 + 5,9 v\gamma \\ \text{Nu} &= 9,5 + 0,0048 \text{Re}. \end{aligned} \quad (20)$$

Уравнения (19) и (20) действительны в пределах изменения весовой скорости воздуха от 2,5 до 7,0 кг/м<sup>2</sup> сек и числа Re от 850 до 3200.

Специально поставленными опытами было исследовано влияние истинной скорости воздушного потока в условиях процесса вихревой сушки и сушки в неподвижном слое. В последнем случае в рабочую камеру вводилась дополнительная сетка, фиксирующая неподвижное состояние слоя при скоростях воздуха, соответствующих вихревому состоянию. В результате обработки экспериментальных данных были получены уравнения тепло- и массообмена:

а) в условиях сушки картофеля в неподвижном слое:

$$\text{Nu} = 11,2 + 0,00138 \text{Re}' \quad (21)$$

б) в условиях вихревой сушки картофеля:

$$\text{Nu} = 6,0 + 0,0047 \text{Re}', \quad (22)$$

где  $\text{Re}' = \frac{Vd_p}{\varepsilon \cdot \nu}$  и  $\varepsilon$  — пористость слоя, равная отношению пустых промежутков между частицами к общему объему слоя:  $\varepsilon = \frac{V - V_0}{V}$ .

Уравнения (21) и (22) действительны в пределах изменения  $\text{Re}'$  от 2000 до 11700.

Таким образом, процесс теплообмена в зависимости от истинной скорости воздуха, омывающей частицы, более интенсивен в условиях вихревой сушки овощей по сравнению с сушкой в неподвижном слое при прочих равных условиях.

Экспериментально установлено, что значение коэффициента теплоотдачи при вихревой сушке овощей уменьшается с увеличением размера частиц, а значение критерия Нуссельта Nu возрастает с увеличением размера частиц (критерия Федорова Fe).

#### Экспериментальное исследование процесса вихревой сушки овощей.

**Скорость постоянного периода вихревой сушки.** В результате экспериментального исследования процесса вихревой сушки овощей установлено единое уравнение скорости постоянного периода вихревой сушки для всех видов овощей:

$$N = C \left( 10 + E \cdot v\gamma \cdot \frac{F}{G_c} \right), \quad (23)$$

где  $N$  — скорость постоянного периода сушки  $\%/\text{мин}$ ;  
 $C$  — постоянный коэффициент, зависящий от вида материала, формы и размера частиц;  
 $E = t^c - t^m$  — потенциал сушки; отражающий совместное влияние температуры и влажности воздуха  $^{\circ}\text{C}$ ;  
 $v\gamma$  — весовая скорость воздуха  $\text{кг}/\text{м}^2 \text{сек}$ ;  
 $G_c$  — вес абсолютно сухого материала  $\text{кг}$ ;  
 $F$  — рабочая поверхность сетки  $\text{м}^2$ .

При вихревой сушке скорость постоянного периода сушки прямо пропорциональна весовой скорости воздуха  $v\gamma$  в первой степени, а не  $\sqrt{v\gamma}$ , как при других способах конвективной сушки. Вследствие увеличения скорости потока воздуха возрастает интенсивность перемешивания, вызывающая турбулентные пульсации, которые обеспечивают ускорение процесса сушки при удалении свободной влаги.

Постоянный коэффициент  $C$  при сушке картофеля и свеклы различных форм и размеров определяется уравнением:

$$C = 0,85 - 0,0252\varphi_{\phi}d_3, \quad (24)$$

где  $\varphi_{\phi} = \frac{f_{\text{ч}}}{f_{\text{ш}}}$  — коэффициент формы, равный отношению поверхности частицы данной формы  $f_{\text{ч}}$  к поверхности шара  $f_{\text{ш}}$  равновеликого по объему (для кубиков разных размеров  $\varphi_{\phi} = 1,24$ )  
 $d_3$  — эквивалентный диаметр частицы, определяемый уравнением (5).

Коэффициент  $C$  для зеленого горошка = 0,73

**Влияние формы и размера частиц.** В работе исследовалось влияние формы и размера частиц на процесс вихревой сушки картофеля при прочих равных условиях. Показано, что продолжительность сушки кубиков картофеля по сравнению с параллелепипедами одинакового сечения, но различной длины, сокращается на 41,6%. Причиной значительного уменьшения продолжительности сушки кубиков по сравнению с параллелепипедом одинакового сечения является увеличение общей поверхности частиц на 19—25% и характер движения их. Если параллелепипеды при вихревой сушке стремятся занять горизонтальное положение по отношению к потоку воздуха, совершая более или менее спокойные колебания, то кубики в процессе вихревой сушки находятся в непрерывном вращении вокруг своих осей. Благодаря вращению частиц происходит срыв пограничного слоя и процесс сушки протекает более интенсивно. Поэтому при вихревой сушке картофеля лучшей формой резки является резка на кубики.

Экспериментально установлено, что отношение продолжительности вихревой сушки частиц картофеля одинаковой фор-

мы, но различных размеров приблизительно равно отношению их эквивалентных диаметров в степени 1,5.

Постоянные коэффициенты  $A$  и  $\beta$  основного уравнения продолжительности вихревой сушки овощей (14) для различных размеров кубиков картофеля определяются уравнениями:

$$A = 500d_3^k - 200 \quad (25)$$

$$\beta = 1,8 - 2,07d_3^k \quad (26)$$

Так как коэффициенты  $A$  и  $\beta$  связаны со вторым периодом уменьшающейся скорости сушки, то за определяющий размер принят  $d_3^k$  — эквивалентный диаметр высушенных частиц, определяемый по уравнению (5) с учетом усадки картофеля.

**Влияние удельной нагрузки материала.** Экспериментальное исследование влияния удельной нагрузки овощей на рабочую поверхность сетки проводилось при одинаковых параметрах: 1)  $v\gamma = 5,0 \text{ кг/м}^2 \text{ сек.}$  2)  $E = 25^\circ\text{C}$  и 3) температуре по входе в рабочую камеру  $t_{вх}^c = 90^\circ\text{C}$  при удельной нагрузке картофеля: 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100 и 120  $\text{кг/м}^2$  и — зеленом горошке: 20, 40, 60 и 80  $\text{кг/м}^2$ .

Только в периоде постоянной скорости сушки наблюдается уменьшение скорости вихревой сушки с увеличением удельной нагрузки овощей. Начиная с критической влажности  $W_k$  скорость сушки практически не зависит от величины удельной нагрузки материала.

Одно из преимуществ процесса вихревой сушки овощей по сравнению с сушкой в неподвижном слое состоит в том, что удельная нагрузка материала может достигать значительной величины. Если при сушке в неподвижном слое, осуществляемой в ленточных, туннельных, шкафных сушилках, рекомендуемая нагрузка овощей составляет от 5,0 до 16,5  $\text{кг/м}^2$ , так как при большей нагрузке производительность сушильных установок уменьшается, то при вихревой сушке овощей нагрузка сырого материала может достигать величины 100—120  $\text{кг/м}^2$ , что почти не увеличит продолжительности сушки. Отсюда — большие возможности повышения производительности вихревых сушильных установок по сравнению с сушилками с неподвижным материалом.

Постоянные коэффициенты  $A$  и  $\beta$  основного уравнения продолжительности вихревой сушки овощей (14) в зависимости от удельной нагрузки абсолютно сухого картофеля выражаются уравнениями:

$$A = 383 + 4700 \frac{F}{G_c} \quad (27)$$

$$\beta = -0,57 - 19,8 \frac{F}{G_c} \quad (28)$$

**Влияние скорости воздушного потока.** Экспериментальное исследование влияния скорости воздушного потока на процесс вихревой сушки овощей проводилось при постоянных параметрах: а) температуре на выходе в рабочую камеру  $t_{ex}^c = 90^\circ\text{C}$ ; б) потенциале сушки  $E = 37,5^\circ\text{C}$ ; в) первоначальных удельных нагрузках материала  $\frac{G}{F} = 30$  (или 60)  $\text{кг/м}^2$  и охватывали области скоростей воздушного потока: 1,0  $\text{м/сек}$  (неподвижный слой); 2,0  $\text{м/сек}$  (переходное состояние) и вихревое состояние материала: 2,5; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0 и 7,0  $\text{м/сек}$ .

Экспериментальные данные показывают, что процесс сушки в вихревом состоянии происходит значительно интенсивнее по сравнению с сушкой в неподвижном слое, благодаря увеличению поверхности соприкосновения частиц материала с потоком нагретого воздуха.

Анализируя данные опытов, можно сделать вывод, что вихревую сушку овощей следует вести при минимальной скорости воздуха, обеспечивающей вихревое состояние слоя. С увеличением скорости воздушного потока удаление влаги происходит более интенсивно в периоде постоянной скорости сушки, но во втором периоде сушки при удалении связанной влаги уменьшение влажности почти не зависит от величины скорости воздуха.

**Влияние температуры воздуха, потенциала сушки на процесс вихревой сушки овощей.** Потенциал сушки  $E$  выражает совместное влияние температуры и влажности воздуха. При вихревой сушке за величину потенциала сушки принимаются среднеарифметические показания разностей температур «сухого» ( $t_c$ ) и «мокрого» ( $t_m$ ) термометров перед рабочей камерой и после нее:

$$E = t_{cp}^c - t_{cp}^m \quad (29)$$

При сушке овощей в неподвижном слое верхним пределом нагревания воздуха является температура  $60\text{--}80^\circ\text{C}$ , выше которой происходит подгорание продукта, ухудшение технологических показателей высушенных овощей, вследствие неравномерного нагревания материала, местных перегревов и длительного соприкосновения продукта с нагретой металлической сеткой.

При вихревой сушке каждая частица равномерно омывается потоком нагретого воздуха со всех сторон. Интенсивное перемешивание частиц в вихревом потоке воздуха выравнивает температуру нагретого воздуха и частиц, исключает местные перегревы материала.

Экспериментальное исследование процесса вихревой сушки овощей подтвердило возможность применения повышенных температур нагретого воздуха в  $100\text{--}120^\circ\text{C}$ , вследствие чего резко сокращается продолжительность сушки.

Опыты по исследованию влияния температуры воздуха и потенциала сушки проводились на кубиках  $8 \times 8 \times 8$  мм картофеля сорта «Юбель», столовой свеклы и на зеленом горошке при постоянной скорости воздуха, удельной нагрузки материала; температуры воздуха, постоянные в каждом опыте, изменялись от  $60^\circ$  до  $120^\circ$  через каждые  $10^\circ\text{C}$ . При постановке данной серии опытов исследовалось содержание витамина «С» в картофеле и зеленом горошке до начала сушки после бланшировки овощей и по окончании процесса вихревой сушки. Содержание витамина «С» пересчитывалось на сухой вес. Таблица характеризует зависимость продолжительности сушки и содержания витамина С от температурного режима сушки.

Температура воздуха	Потенциал сушки $E^\circ\text{C}$	Продолжительность сушки в минутах	Содержание витамина С $\text{мг}\%$		Потери витамина С при сушке $\%$
			после бланшировки	после сушки	

Картофель (кубики размером  $8 \times 8 \times 8$  мм)  
от  $w_1=410\%$  до  $w_2=10\%$

60	20	448	33,05	18,60	43,60
70	22,90	440	36,15	23,20	35,80
80	29,60	283	31,10	24,70	20,60
90	36,00	190	29,27	23,30	20,65
100	41,40	135	34,58	28,60	17,30
110	49,80	96	36,20	29,47	18,60
120	56,60	70	33,90	30,00	11,50

Зеленый горошек  
от  $w_1=340\%$  до  $w_2=12\%$

70	25,30	177	77,50	44,25	42,80
80	28,30	133	59,80	42,20	29,30
90	36,50	102	81,00	66,80	17,50
100	42,50	86	76,00	61,50	19,00
110	49,00	55	70,20	61,65	12,10
120	54,00	37,5	61,80	58,00	6,20

Из данных таблицы видно, что потери витамина С при вихревой сушке овощей значительно уменьшаются при применении температурных режимов нагретого воздуха  $110$  и  $120^\circ$ , вследствие резкого уменьшения продолжительности сушки, следовательно, с меньшим соприкосновением с кислородом воздуха, разрушающим витамин «С».

В работе был исследован процесс вихревой сушки овощей до содержания влаги  $3-5\%$  в зависимости от различных температур нагретого воздуха. Из опытов следует, что по мере повышения температуры воздушного потока и соответственно потенциала сушки, продолжительность процесса вихревой сушки овощей до содержания влаги  $3-5\%$  уменьшается. Так для уменьшения влажности кубиков картофеля размером  $8 \times 8 \times 8$  мм при удельной нагрузке материала  $60 \text{ кг}/\text{м}^2$ ; весовой

скорости воздуха  $v \gamma = 5,0 \text{ кг/м}^2 \text{ сек.}$  от  $W=12\%$  до  $W=8\%$  требуется: при температурах воздуха:  $60^\circ$  — 185 минут;  $80^\circ$  — 140 минут;  $90^\circ$  — 70 минут;  $100^\circ$  — 46 минут;  $110^\circ$  — 18 минут;  $120^\circ$  — 10 минут. Таким образом, в результате экспериментального исследования процесса вихревой сушки овощей установлена возможность применения нагретого воздуха до  $110$  и  $120^\circ$ , вследствие чего резко сокращается продолжительность сушки и лучше сохраняются первоначальные химико-технологические показатели овощей.

**Усадка овощей в процессе вихревой сушки.** Овощи относятся к числу коллоидных капиллярно-пористых материалов и при сушке с температурным режимом ниже  $100^\circ\text{C}$  дают значительную усадку с уменьшением объема частиц в 3—4 раза. Усадка происходит равномерно, как в первом, так и во втором периодах скорости сушки. Объемная усадка имеет линейный характер зависимости от влажности. В результате экспериментального исследования установлены зависимости изменения объема частиц картофеля в процессе вихревой сушки с температурным режимом нагретого воздуха ниже  $100^\circ\text{C}$ ,

а) для кубиков  $8 \times 8 \times 8 \text{ мм}$ :

$$\frac{V}{V_c} = 1 + \frac{W}{160} \quad (30)$$

б) для параллелепипедов  $8 \times 3 \times 30 \text{ мм}$ :

$$\frac{V}{V_c} = 1 + \frac{W}{100}, \quad (31)$$

где  $V$  — объем частицы в  $\text{см}^3$  в любой момент сушки;  
 $V_c$  — объем абсолютно сухого кусочка картофеля (при  $W=0$ ) для кубиков  $8 \times 8 \times 8 \text{ мм}$   $V_c = 0,16 \text{ см}^3$   
 для  $8 \times 8 \times 30$   $V_c = 0,52 \text{ см}^3$   
 $W$  — влажность на сухой вес в  $\%$ .

При вихревой сушке овощей с температурой нагретого воздуха в  $105^\circ\text{C}$  было обнаружено, что высушенные зеленый горошек и разнообразные формы (шарики, кубики, цилиндры, параллелепипеды) и размеры частиц картофеля и свеклы сохранили свою первоначальную форму и объем, не показали наружной усадки. При вихревой сушке с температурой нагретого воздуха в  $110$ — $120^\circ\text{C}$  объем частиц увеличивается по сравнению с первоначальным. Сохранение первоначальной формы частиц возможно только при вихревой сушке, т. е. при равномерном омывании частиц потоком нагретого воздуха со всех сторон.

Очевидно, при вихревой сушке с температурным режимом выше  $102^\circ\text{C}$  влага внутри частиц перемещается только в виде пара, внутреннее давление которого при вихревой сушке с температурой нагретого воздуха в  $105^\circ\text{C}$  равнялось усадочным

силам и частицы сохранили свою первоначальную форму и объем. При вихревой сушке с температурным режимом выше  $105^{\circ}\text{C}$ . внутреннее давление пара будет превышать усадочные силы и частицы увеличатся в объеме. При вихревой сушке в нагретом воздухе ниже  $100^{\circ}\text{C}$  влага в частицах будет перемещаться как в виде пара, так и в виде жидкости, внутреннее давление пара будет меньше усадочных сил, поэтому произойдет усадка материала.

### Выводы

На основании анализа и обобщения экспериментальных данных, установлено следующее:

1. Вихревой способ сушки овощей имеет значительные преимущества по сравнению с сушкой в неподвижном слое, являясь прогрессивным методом значительно интенсифицирующим данный процесс.
2. Лучшей формой частиц при вихревой сушке являются кубики, так как благодаря непрерывному вращению их в процессе вихревой сушки происходит срыв пограничного слоя и сушка протекает более интенсивно по сравнению с другими формами.
3. Отношение продолжительности вихревой сушки частиц одинаковой формы, но различных размеров приблизительно равно отношению их эквивалентных диаметров в степени 1,5.
4. Удельная нагрузка материала при вихревой сушке может достигать величины  $100\text{--}120 \text{ кг/м}^2$ , тогда как при сушке в неподвижном слое оптимальная нагрузка овощей составляет  $5\text{--}16,5 \text{ кг/м}^2$ .
5. Вихревую сушку овощей следует вести при минимальной скорости, обеспечивающей вихревое состояние слоя.
6. Применение повышенных температур нагретого воздуха  $110\text{--}120^{\circ}\text{C}$  при вихревой сушке овощей, вместо допускаемых при сушке в неподвижном слое  $60\text{--}80^{\circ}\text{C}$  приводит:
  - а) к резкому сокращению продолжительности сушки, к значительному уменьшению потерь витамина «С», к увеличению набухаемости овощей;
  - б) к возможности быстрой сушки до низкого содержания влаги в готовом продукте порядка  $3\text{--}4\%$ , вследствие появления интенсифицирующего фактора повышенного давления в частицах при низком содержании влаги в материале, начиная с  $W=50\%$ .
7. Расчет продолжительности процесса вихревой сушки овощей до заданной влажности производится на основании применения теории приведенной скорости сушки Г. К. Филоненко по основному уравнению (14). Многочисленные опытные данные по вихревой сушке овощей подтверждают данное уравнение.

8. Установлено единое уравнение скорости постоянного периода вихревой сушки овощей (23) и (24) для различных видов овощей, форм и размеров частиц.

9. Определено уравнение равновесной влажности при сушке картофеля:

$$W_p = 1,65 \sqrt{\varphi} \quad (32)$$

10. Получены уравнения постоянных коэффициентов  $A$  и  $\beta$  основного уравнения продолжительности вихревой сушки овощей в зависимости от размера частиц (25) и (26) и от величины удельной нагрузки материала (27) и (28). Подтверждено, что коэффициенты  $A$  и  $\beta$  не зависят от параметров сушильного агента.

11. Определены уравнения (30) и (31) зависимости объемной усадки частиц от влажности при вихревой сушке с температурным режимом нагретого воздуха ниже  $100^\circ\text{C}$ .

12. Установлены уравнения критической скорости воздушного потока, соответствующие переходу слоя крупнозернистого материала разнообразных форм и размеров от неподвижного состояния в вихревое, для двух характерных точек:

а) начала перехода слоя из неподвижного состояния в вихревое и б) интенсивного перемешивания частиц при высоте слоя, превышающей начальное неподвижное состояние слоя в два раза: (3), (4), (6) и (7).

13. Определено уравнение скорости витания для частиц разнообразных форм и размеров крупнозернистого материала — верхний предел существования вихревого слоя (8) и (9).

14. Сопротивление слоя при вихревой сушке овощей, независимо от величин скорости воздушного потока и удельной нагрузки материала, прямо пропорционально изменению веса материала в процессе сушки [уравнения (1) и (2)]. Отсюда можно определить вес материала в любой момент вихревой сушки по величине сопротивления слоя, не прибегая к взвешиванию.

15. Значение коэффициента теплообмена при вихревой сушке овощей в периоде постоянной скорости сушки прямо пропорционально весовой скорости воздуха в первой степени, что указывает на значительную интенсивность процесса вихревой сушки овощей (уравнения 19 и 20).

16. Значение коэффициента теплообмена уменьшается с увеличением размера частиц, а значение критерия Нуссельта ( $Nu$ ) возрастает с увеличением размера частиц (критерия Федорова  $Fe$ ).

17. Вихревая сушилка обеспечивает большую производительность, имеет напряжение по количеству испаренной влаги с  $1 \text{ м}^2$  рабочей поверхности сетки в 8—10 раз больше по сравнению с конвейерными ленточными сушилками, установлен-

ными на овощесушильных заводах. Вихревая сушилка проста по конструкции, изготовление ее возможно в механических мастерских любого завода.

ОСНОВНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ДИССЕРТАЦИИ  
ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ СТАТЬЯХ:

1. Гришин М. А., Экспериментальное исследование вихревой сушки овощей. Инженерно-физический журнал, № 5, 1960.
2. Гришин М. А., Гидродинамика крупнозернистого материала в вихревом потоке воздуха. Инженерно-физический журнал № 6, 1960.
3. Филоненко Г. К., Гришин М. А., Вихревая сушка овощей. Пищевая промышленность (консервная, овощесушильная и пищевая концентратная). Научно-технический сборник № 2, 1960.
4. Гришин М. А., Расчет процесса вихревой сушки овощей. Известия ВУЗ СССР (Пищевая технология), № 4, 1960.