

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ УКРАИНЫ

Киевский технологический институт пищевой промышленности

На правах рукописи

ЛИТВИНЕНКО Анатолий Михайлович

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ СУШКИ  
ПИЩЕВЫХ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Специальность 05.18.12 - Процессы, машины и агрегаты  
пищевой промышленности

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Киев - 1992



00814410 (I)

Робота виконана в Київському технологічному інституті харчової промисловості.

Научний керівник: доктор технічних наук,  
професор Орлов Л.А.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук  
професор Буляндра А.Ф.  
кандидат технічних наук  
Заборсин А.Ф.

Ведущая організація: Інститут технічної тепло-  
фізики АН України.

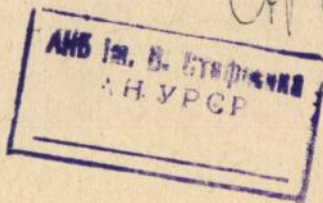
Захист дисертації состоится "16" декабря 1992 г. в 14<sup>00</sup> часов на засіданні спеціалізованого Ради Д 068.17.04 Київського технологічного інституту харчової промисловості по адресу: 252017, Київ-17, ул.Владимирская, 68, КТИПП.

С дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Київського технологічного інституту харчової промисловості.

Автореферат розослан "6" ноября 1992 г.

Учений секретар  
спеціалізованого ради  
канд.тех.наук, доцент

Н.М.Сороколит



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Перед народным хозяйством Украины с особой остротой стоят социально-экономические задачи, важнейшими из которых являются ускорение научно-технического прогресса и перевод экономики на интенсивный путь развития, экономия всех видов сырья, топливно-энергетических ресурсов, повышение производительности труда, более полное удовлетворение населения продуктами питания.

Одной из основных задач машиностроения для пищевой промышленности является техническое перевооружение производства, разработка и внедрение высокоэффективных машин и оборудования, обеспечивающих механизацию и автоматизацию технологических процессов, рациональное использование вторичного сырья, сокращение потерь при его переработке, а также улучшение качества выпускаемой продукции.

На технико-экономические показатели производства пищевых кристаллических материалов значительное влияние оказывает заключительная стадия производства - высушивание продуктов. Несмотря на большое количество теоретических и экспериментальных работ, посвященных теории сушки, гидродинамике, теплообмену и практическому применению сушильной техники в промышленности, исследования в этой области остаются весьма актуальными.

**Цель работы.** Изучение физико-химических и теплофизических свойств пищевых кристаллических материалов /лимонной кислоты, рафинированной лактозы и глюкозы/ и совершенствование на этой основе процесса и оборудования для сушки.

**Научная новизна работы.** На основании физико-химических исследований дифференцированы поверхностная и кристаллизационная вода в лимонной кислоте, рафинированной лактозе и глюкозе, определены температурные интервалы удаления каждого вида влаги. Предложены аналитические выражения для определения влагосодержания в исследуемых материалах по соотношению интегральных интенсивностей в спектрах ЯМР их расплавов. Установлено, что значения энергии связи влаги с материалом примерно на 20 % превышают удельную теплоту испарения свободной воды.

Проведена оценка исследуемых материалов как объектов сушки и рекомендован эффективный способ их обезвоживания в кипящем слое с конвективным подводом тепла и механическим перемешиванием.

Предложена замкнутая система уравнений для расчета кинетики непрерывного процесса сушки кристаллических дисперсных материалов в псевдооживленном слое, сведенная к двум трансцендентным уравнениям, определяющим среднюю температуру материала в слое и параметр экспоненциального распределения температуры теплоносителя по высоте слоя, и одному уравнению, определяющему равновесное влагосодержание материала.

Разработана методика проектного расчета сушилок кипящего слоя непрерывного действия, на основании которой рассчитаны конструктивные размеры сушильного аппарата для лимонной кислоты.

Практическая ценность и реализация результатов работы. Установлены рациональные режимы сушки лимонной кислоты и рафинированной лактозы в кипящем слое с конвективным подводом тепла и механическим перемешиванием. Разработаны методики расчета процесса сушки и проектного расчета сушилок кипящего слоя непрерывного действия. Выполнено рабочее проектирование сушильно-охладительного аппарата для лимонной кислоты.

Спроектирован и изготовлен на Донецком заводе "Продмаш" сушильно-охладительный аппарат кипящего слоя для лимонной кислоты. На базе аппарата внедрена на Скидельском сахкомбинате /Республика Беларусь/ поточная линия для сушки и упаковки лимонной кислоты производительностью 450-500 кг/ч. Годовой экономический эффект составляет 36,1 тыс. руб. /по ценам 1989 года/.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы доложены на Международной научно-технической конференции "Применение псевдооживленного слоя в пищевкусовой промышленности и биотехнологии", г. Пловдив, 1989 г.; VI симпозиуме по сушке, г. Лодзь, 1987 г.; Республиканской научно-технической конференции "Разработка прогрессивных способов сушки различных материалов и изделий на основе достижений теории тепло- и массообмена", г. Черкассы, 1987 г.; Республиканской научно-технической конференции "Дальнейшее повышение уровня механизации погрузочно-разгрузочных и транспортно-складских работ в отраслях пищевой промышленности", г. Ворошиловград, 1987 г.; ежегодных /1985-1989 г.г./ научных конференциях Киевского технологического института пищевой промышленности.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано II печатных работ, получено I авторское свидетельство и I решение Госпатента СССР о выдаче патента.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов и рекомендаций, списка использованной литературы, включающего 165 наименований, приложений. Работа изложена на 189 страницах основного текста, содержит 36 рисунков и 10 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, определена цель диссертационной работы, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе на основании критического обзора литературных источников дана краткая характеристика физико-химических и теплофизических свойств исследуемых продуктов, а также конструкций применяемого сушильного оборудования.

Показано, что приведенные данные о физико-химических свойствах, кинетике и температурных режимах сушки характеризуются неполнотой исследований, разногласиями и требуют дальнейшего уточнения. В работах отсутствуют сведения о величине энергии связи поверхностной влаги в лимонной кислоте, лактозе и глюкозе. Рассмотрение известных методов и средств определения энергии связи влаги с материалом позволяет сделать вывод о возможности решения этой задачи и повышения точности инженерных расчетов.

При рассмотрении конструкций аппаратов, применяемых для высушивания лимонной кислоты, лактозы и глюкозы, выявлены их основные недостатки и намечены пути совершенствования. Показано, что актуальной задачей является также разработка надежных методов расчета процесса сушки и аппаратов.

С учетом вышеизложенного с целью совершенствования процесса и оборудования для сушки лимонной кислоты, рафинированной лактозы и глюкозы определены задачи исследования.

Вторая глава посвящена изучению различных форм связи влаги с материалом и ее состояния в объектах исследования, энергии связи влаги, кинетике обезвоживания пищевых продуктов.

С помощью методов высушивания в сушильном шкафу, термогравиметрического анализа и ЯМР дифференцирована вода в исследуемых объектах, определено ее количественное содержание /табл. I/.

Таблица I  
Содержание влаги в пищевых кристаллических материалах

Образец	Рассчитанное содержание кристаллизационной воды, %	Массовая доля влаги, %					
		Общая	Свободная	Свободная	Кристаллизационная	Общая	Кристаллизационная
Лактоза	5,00	16,20	11,20	10,50	4,76	-	-
Глюкоза	9,09	13,70	4,61	4,44	8,58	13,82	9,45
Лимонная кислота	8,57	9,98	1,41	1,30	8,40	10,03	8,31

Характерной особенностью полученных кривых дегидратации, представленных на рис. 1, является быстрое удаление влаги в начальный период сушки, которое затем замедляется. Равновесное состояние достигается для глюкозы через 120 мин, для лактозы требуется период времени в два раза меньше. Лимонная кислота теряет воду значительно медленнее и равновесное состояние достигается только после 26-27 ч сушки.

Из кривых дегидратации невозможно получить достаточно достоверные данные о наличии разных форм связи влаги и количественном ее содержании, а также точно установить, когда заканчивается полная дегидратация и начинается разложение материала.

Для исследования физико-химических явлений, происходящих при нагревании в продуктах, был проведен термогравиметрический анализ на дериватографе. Как следует из кривых, представленных на рис. 2, обезвоживание кристаллогидратов протекает в два этапа. Первый этап начинается при комнатных температурах и заканчивается для лимонной кислоты, глюкозы и лактозы, соответственно, при 316, 328 и 342 К. При этом происходит удаление свободной /поверхностной/ влаги, которая слабо связана с материалом. Окончание первого этапа характеризуется появлением горизонтального участка на кривой ТГ.

После удаления поверхностной влаги в некотором диапазоне температур потеря массы образцов не наблюдается, а затем начинается удаление кристаллизационной /связанной/ воды. Из глюкозы и лактозы она удаляется в интервале температур, соответственно, 336-383 и 383-446 К. Разложение лимонной кислоты является относительно сложным



Рис. 1. Кривые дегидратации при 378 К: 1 - лактоза; 2 - глюкоза; 3 - лимонная кислота.

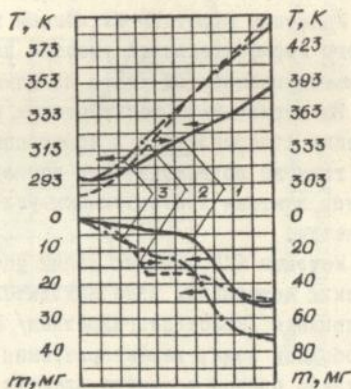


Рис. 2. Термогравитогаммы: 1 - лимонная кислота; 2 - лактоза; 3 - глюкоза.

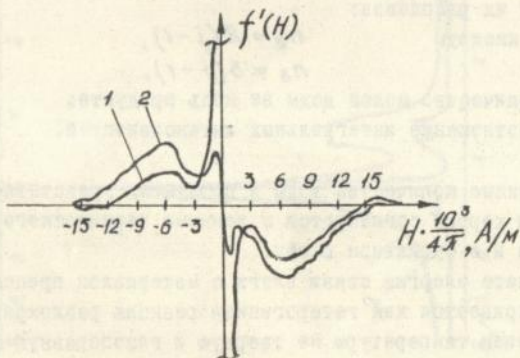


Рис. 3. Производные сигналов поглощения ЯМР протонов лимонной кислоты: влажной /1/ и высушенной при 323 К /2/.

процессом и протекает в три и более стадий /в зависимости от ее качества/ в интервале температур 320-419 К.

Удаление кристаллизационной воды заканчивается появлением второго горизонтального участка на кривой ТГ. Содержание свободной и кристаллизационной влаги по данным ТГА приведено в табл. I.

Из термических исследований вытекает важный вывод о том, что удаление поверхностной и кристаллизационной воды из лимонной кислоты и глюкозы происходит при температуре 378 К, тогда как при высушивании лактозы в аналогичных условиях кристаллизационная вода не удаляется.

Методом ЯМР широких линий установлено, что во влажных кристаллических материалах вода находится в двух энергетических состояниях: неподвижная /кристаллогидратная/ вода - широкая полоса спектра - и свободная вода, характеризуемая высокой подвижностью - интенсивная узкая полоса в центре спектра /рис. 3/.

Содержание влаги в материалах определено по спектрам высокого разрешения их расплавов, а идентификация всех полос - по спектрам растворов этих продуктов в тяжелой воде /рис. 4/.

На основании отнесения полос и структурных формул исследуемых веществ предложены аналитические выражения для взаимосвязи между общим содержанием влаги в материалах и соотношением интегральных интенсивностей полос поглощения воды и органической части продукта в спектре ЯМР их расплавов:

для лимонной кислоты	$n_B = 2(j-1),$	/1/
для глюкозы	$n_B = 3(j-1),$	/2/

где  $n_B$  - количество молей воды на моль продукта;  
 $j$  - соотношение интегральных интенсивностей.

Рассчитанные количества воды в продуктах представлены в табл. I. Как видно они хорошо согласуются с данными термического анализа на дериватографе и в сушильном шкафу.

При расчете энергии связи влаги с материалом процесс удаления влаги рассматривается как гетерогенная реакция разложения вещества под воздействием температуры на твердую и газообразную фазы, происходящая на поверхности раздела фаз или вблизи ее.

Для определения кинетических параметров процесса испарения используется неизотермическая кривая ТГ потери массы дериватограммы удаления поверхностной влаги, представленная на рис. 5, и кинетическое уравнение виде

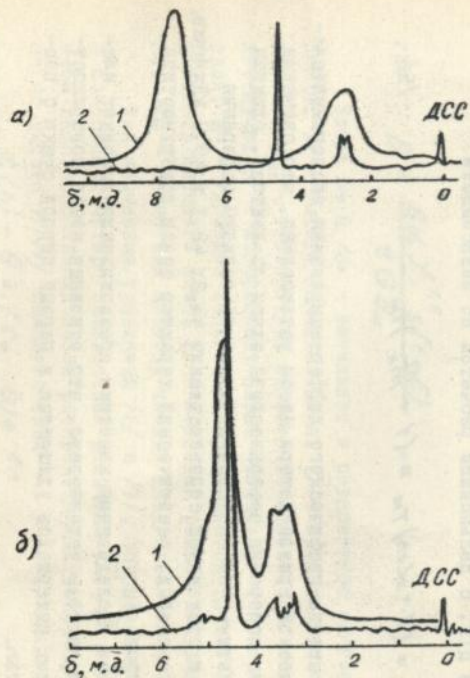


Рис. 4. ЯМР спектры лимонной кислоты /а/ и глюкозы /б/: 1 - в расплаве при температуре 397 К; 2 - в тяжелой воде при комнатной температуре.

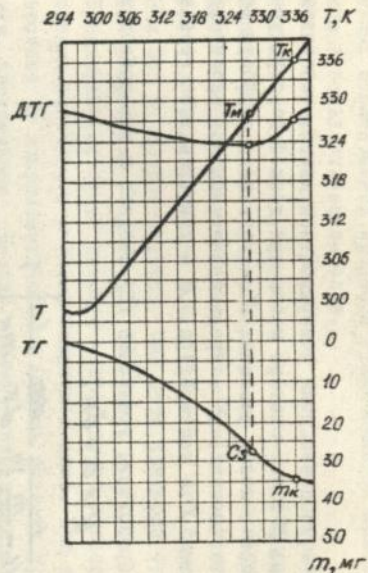


Рис. 5. Термогравитограмма удаления свободной влаги из лактозы.

$$\frac{d\alpha m}{d\tau} = K(1 - \alpha m)^n = Z \exp(-E/RT)(1 - \alpha m)^n, \quad /3/$$

где  $\alpha m = \frac{m}{m_k}$  - массовая доля поверхностной влаги, испарившейся к моменту времени  $\tau$ ;  $m$  - потеря массы при данной температуре;  $m_k$  - общая потеря массы в конце реакции;  $K$  - константа скорости реакции;  $n$  - порядок реакции;  $Z$  - предэкспоненциальный множитель;  $E$  - энергия активации;  $T$  - температура;  $R$  - универсальная газовая постоянная.

После преобразований уравнение /3/ сведено к линеаризованному виду

$$y = a + bx, \quad /4/$$

где  $y = \ln \left[ \frac{1}{(1 - \frac{m}{m_k})^n} \cdot \frac{dm}{dT} \cdot \frac{1}{m_k} \right];$

$$\alpha = \ln \frac{Z}{C}; \quad b = \frac{E}{R}; \quad x = \frac{1}{T}.$$

Здесь  $C = \frac{dT}{d\tau}$  - линейная скорость нагрева.

Порядок реакции разложения  $n$  находится по точке перегиба  $C_S$  кривой ТТ /рис. 5/, определяемой по температуре  $T_m$ , соответствующей пику кривой ДТТ, с дальнейшим расчетом по зависимости

$$n \frac{1}{1-n} = C_S = (1 - \alpha m)_{T_m} = (1 - \frac{m}{m_k})_{T_m}. \quad /5/$$

С помощью метода графического дифференцирования экспериментальной нелинейной кривой потери массы установлено, что значения удельной теплоты испарения поверхностной влаги из лактозы, глюкозы и лимонной кислоты  $\sim$  на 20 % больше удельной теплоты испарения свободной воды и составляют соответственно 44,2; 48,1 и 49,7 кДж/моль, что указывает на слабый, осмотический характер связи поверхностной влаги с материалом.

На основании исследования кинетики обезвоживания лимонной кислоты, глюкозы и лактозы установлено, что основная масса поверхностной влаги из этих материалов удаляется в первый период сушки с постоянной скоростью.

Проведенные исследования позволили оценить изучаемые материалы как объекты сушки и рекомендовать наиболее эффективный способ их обезвоживания в кипящем слое.

В третьей главе приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса сушки пищевых кристаллических материалов в псевдооживленном слое.

На экспериментальной установке определены параметры процесса и установлено, что сушку лимонной кислоты и рафинированной лактозы наиболее рационально осуществлять при высоте неподвижного слоя на поддерживающей решетке 0,2 м, скорости теплоносителя в расчете на свободное сечение камеры 1,4 и 1,1 м/с и его температуре на входе 323 и 383 К, соответственно. При этом критерий Фруда должен находиться в пределах  $15,59-6,71 \cdot 10^{-3}$ .

Предложена методика расчета непрерывного процесса сушки кристаллических материалов в псевдооживленном слое. При этом используются известные из макрокинетического метода расчета уравнение кинетики сушки, определяющее среднее конечное влагосодержание  $\bar{U}_k$  высушиваемого материала

$$U_0 - \bar{U}_k = BH(\bar{t} - \bar{\theta}) \left[ 1 - \exp \frac{U_p - U_0}{BH(\bar{t} - \bar{\theta})} \right] \quad /6/$$

и уравнение, определяющее среднюю температуру  $\bar{\theta}$  материала в слое,

$$\bar{\theta} = t_{nr} \left\{ 1 - \exp \left[ \frac{U_p - U_0}{BH(\bar{t} - \bar{\theta})} \right] \right\} + \bar{t} \exp \left[ \frac{U_p - U_0}{BH(\bar{t} - \bar{\theta})} \right], \quad /7/$$

где  $B = \frac{6\alpha f^{1,5} S(1-\varepsilon)}{\tau G d_m}$ .

Здесь  $U_0$  и  $U_p$  - начальное и равновесное влагосодержание материала;  $H$  - высота кипящего слоя;  $\bar{t}$  - средняя температура теплоносителя;  $t_{nr}$  - температура мокрого термометра;  $\alpha$  - коэффициент теплоотдачи;  $f$  - коэффициент формы частиц;  $S$  - поперечное сечение слоя;  $\tau$  - удельная теплота испарения влаги из материала;  $\varepsilon$  - порозность кипящего слоя;  $G$  - массовый расход высушиваемого материала;  $d_m$  - расчетный диаметр частиц высушиваемого материала.

Для замыкания уравнений /6/ и /7/, описывающих процесс сушки и содержащих четыре неизвестные величины  $\bar{U}_k$ ,  $\bar{\theta}$ ,  $\bar{t}$  и  $U_p$ , принимаем экспоненциальный закон распределения температуры теплоносителя по высоте  $h(H)$  кипящего слоя

$$t(h) - \bar{\theta} = (t_0 - \bar{\theta})e^{-\delta h} \quad /8/$$

$$t \Big|_{h=0} = t_0, \quad ,$$

где  $t_0$  - начальная температура теплоносителя;  $\gamma$  - параметр, численное значение которого подлежит определению.

Интегрирование уравнения /8/ в пределах изменения  $h$  от нуля до  $H$  дает среднюю температуру теплоносителя в слое

$$\bar{t} - \bar{\theta} = \frac{t_0 - \bar{\theta}}{\gamma H} \cdot [1 - \exp(-\gamma H)] , \quad /9/$$

а подстановка в уравнение /8/ значения  $h=H$  позволяет определить конечную температуру теплоносителя

$$t_k = \bar{\theta} + (t_0 - \bar{\theta}) \exp(-\gamma H) . \quad /10/$$

Записываем уравнение теплового баланса слоя

$$\Delta C_r (t_0 - t_k) = Gz(U_0 - \bar{U}_k) + GC_m(\bar{\theta} - \theta_0) , \quad /11/$$

где  $\Delta$  - массовый расход теплоносителя;  $C_r$  - теплоемкость теплоносителя;  $C_m$  - теплоемкость материала;  $\theta_0$  - начальная температура материала.

При совместном решении уравнений /II/, /6/, /9/ и /10/ получаем

$$\frac{\alpha G \bar{\theta}}{\Delta C_r \gamma} \cdot \left\{ 1 - \exp \frac{(U_p - U_0) \gamma}{B(t_0 - \bar{\theta}) [1 - \exp(-\gamma H)]} \right\} + \frac{\alpha C_m}{\Delta C_r} \cdot \frac{\bar{\theta} - \theta_0}{t_0 - \bar{\theta}} \cdot \frac{1}{1 - \exp(-\gamma H)} = 1 . \quad /12/$$

Уравнение /7/ с учетом /9/ после выполнения соответствующих преобразований принимает вид

$$\frac{t_{nr}}{\bar{\theta}} \cdot \left\{ 1 - \exp \frac{(U_p - U_0) \gamma}{B(t_0 - \bar{\theta}) [1 - \exp(-\gamma H)]} \right\} + \left\{ 1 + \frac{t_0 - \bar{\theta}}{\bar{\theta} \gamma H} \cdot [1 - \exp(-\gamma H)] \right\} \exp \frac{(U_p - U_0) \gamma}{B(t_0 - \bar{\theta}) [1 - \exp(-\gamma H)]} = 1 . \quad /13/$$

Зависимость относительной влажности теплоносителя  $\varphi$  от влаго-содержания  $X$  и температуры  $t$  выражается уравнением

$$\varphi = \frac{X}{0,004 \exp(0,062t)} . \quad /14/$$

Рассматривая систему газ - твердое тело в состоянии равновесия записываем уравнения материального баланса

$$G(U_0 - U_p) = \Delta(X_p - X_0) , \quad /15/$$

теплового равновесия системы

$$\Delta C_r (t_0 - t_p) = Gz(U_0 - U_p) + GC_m(t_p - \theta_0) , \quad /16/$$

а также уравнение аппроксимации изотермы десорбции влаги .

$$\varphi = \varphi(U_p) . \quad /17/$$

В результате уравнение /14/ с учетом /15/, /16/ и /17/ принимает вид

$$\varphi(U_p) = \frac{x_0 + \frac{G}{L} \cdot (U_0 - U_p)}{0,004 \exp \left[ 0,062 \cdot \frac{\Delta C_T t_0 + G C_M \theta_0 - G x (U_0 - U_p)}{\Delta C_T + G C_M} \right]} \quad /18/$$

Таким образом, замкнутая система уравнений, включающих основные факторы, влияющие на процесс, сведена к системе двух трансцендентных уравнений /12/ и /13/, содержащих две неизвестные величины - параметр экспоненциального распределения температуры теплоносителя по высоте слоя и среднюю температуру материала в слое - и к одному уравнению /18/, определяющему равновесное влагосодержание материала. В результате их решения однозначно определяются все параметры процесса, в том числе и конечное влагосодержание материала по зависимости

$$\bar{U}_k = U_0 - \frac{B(t_0 - \bar{\theta})}{\gamma} \cdot [1 - \exp(-\gamma H)] \times \\ \times \left\{ 1 - \exp \frac{(U_p - U_0)\gamma}{B(t_0 - \bar{\theta}) [1 - \exp(-\gamma H)]} \right\} \quad /19/$$

В табл. 2 приведены результаты экспериментальной проверки методики расчета процесса сушки в лабораторных условиях, а также результаты расчетов параметров процесса сушки, осуществленных на ПЭВМ. Сопоставление опытных и расчетных данных указывает на удовлетворительное совпадение результатов.

Разработана методика проектного расчета односекционных сушилок кипящего слоя непрерывного действия, в которой в качестве первого приближения использовано значение площади поперечного сечения слоя, полученное из балансового расчета. По заданным величинам расхода материала и его конечного влагосодержания вычислены конструктивные размеры сушильного аппарата для лимонной кислоты.

В четвертой главе приведены результаты исследования процесса сушки лимонной кислоты в производственных условиях.

Выполнен рабочий проект, изготовлен и внедрен в производство лимонной кислоты сушильно-охладительный аппарат кипящего слоя, конструктивная схема которого приведена на рис. 6 /А.с. № 1089376/.

Таблица 2

Результаты проверки методики расчета процесса сушки  
на опытной установке с применением ПЭВМ

$G \cdot 10^3$ , кг/с	$U_0 \cdot 10^2$ , кг/кг	$t_0$ , К	$L \cdot 10^2$ , кг/с	$H$ , м	$n_{\text{вр}}$ , с <sup>-1</sup>	$\bar{\theta}$ , К		$t_k$ , К		$\bar{U}_k \cdot 10^2$ , кг/кг	
						расчет- ное	экспе- римен- тальное	расчет- ное	экспе- римен- тальное	расчет- ное	экспе- римен- тальное
Лактоза											
1,25	11,5	363		0,20		330,1	325	330,1	328	1,36	1,20
0,83	12,4	383	I, II	0,25	0,73	355,5	352	355,5	352	0,70	0,79
0,42	12,1	403		0,30		387,3	385	387,3	384	0,43	0,55
Лимонная кислота											
3,89	1,38	314		0,20		305,6	305	305,6	306	0,60	0,52
3,33	1,39	323	I, 64	0,25	0,73	311,6	309	311,6	309	0,26	0,25
2,50	1,40	333		0,30		320,4	318	320,4	318	0,00	0,03

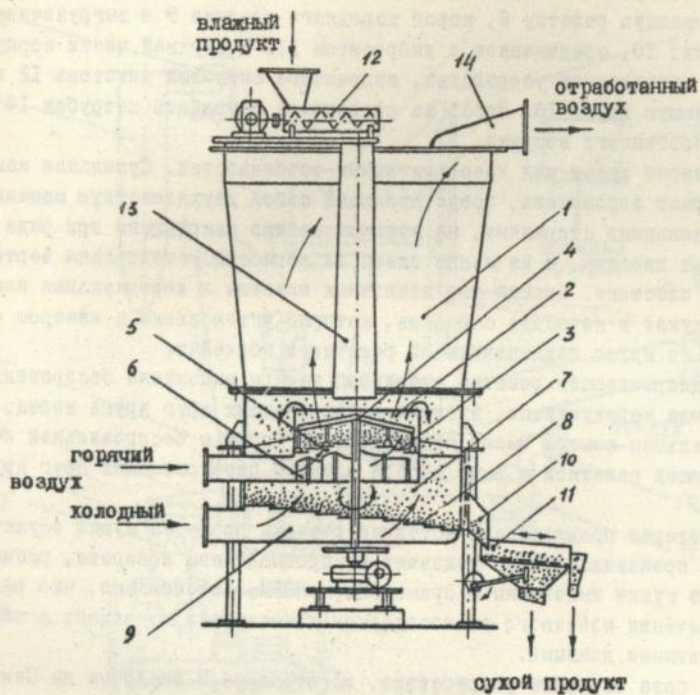


Рис. 6. Схема сушильно-охладительного аппарата непрерывного действия для лимонной кислоты.

Аппарат состоит из вертикального коническо-цилиндрического корпуса I, внутри которого расположена сушильная камера 2 со целевой поддерживающей решеткой 3, выполненной в виде усеченного конуса, и ворошителем 4. Под решеткой установлена камера для подвода горячего воздуха 5 с воздушераспределительным устройством 6. Охлаждающая камера 7 находится в нижней части корпуса и содержит целевую поддерживающую решетку 8, короб холодного воздуха 9 и выгрузочное устройство 10, соединенное с виброситом II. В верхней части корпуса имеется загрузочное устройство, включающее шнековый питатель 12 и направляющую трубу 13. Здесь же расположен отводящий патрубок 14 для отработанного воздуха.

Аппарат имеет ряд конструктивных особенностей. Сушильная камера содержит ворошитель, представляющий собой двухлопастную мешалку с вертикальными стержнями, на которых жестко закреплены три ряда наклонных пластин, а на конце одной из лопастей установлена вертикальная пластина. Нижний ряд наклонных пластин и вертикальная пластина служат в качестве скребков, которые установлены с зазором относительно колец поддерживающей решетки и обечайки.

Поддерживающая решетка сушильной камеры выполнена беспровальной в виде чередующихся, взаимно перекрывающих друг друга колец, а охлаждающая камера имеет прямоугольную форму с беспровальной поддерживающей решеткой в виде набора взаимно перекрывающих друг друга пластин.

Проверка предложенной методики расчета процесса сушки осуществлена в производственных условиях на промышленном аппарате, расчеты процесса сушки выполнены с применением ЭВМ. Установлено, что расчетные значения конечного влагосодержания материала совпадают с экспериментальными данными.

На базе аппарата разработана, изготовлена и внедрена на Скидельском сахкомбинате поточная линия для сушки и упаковки лимонной кислоты производительностью 450-500 кг/ч /рис. 7/.

Линия включает центрифугу I, шнековый конвейер 2, ковшевой элеватор 3, бункер-дозатор 4, сушильно-охлаждающий аппарат 5 марки РЗ-ОСС-02 с искрым пылеуловителем 14 /положительное решение о выдаче патента по заявке № 4932747/26 /020716/ от 06.03.1991 г./, калорифер 12, вентиляторы II, 13, фильтр 10 для очистки воздуха и систему регулирования температуры горячего воздуха 15, вибросито 6, разделительную течку 7, направляющие лотки 8 и устройства 9 для расфасовки и упаковки кислоты.

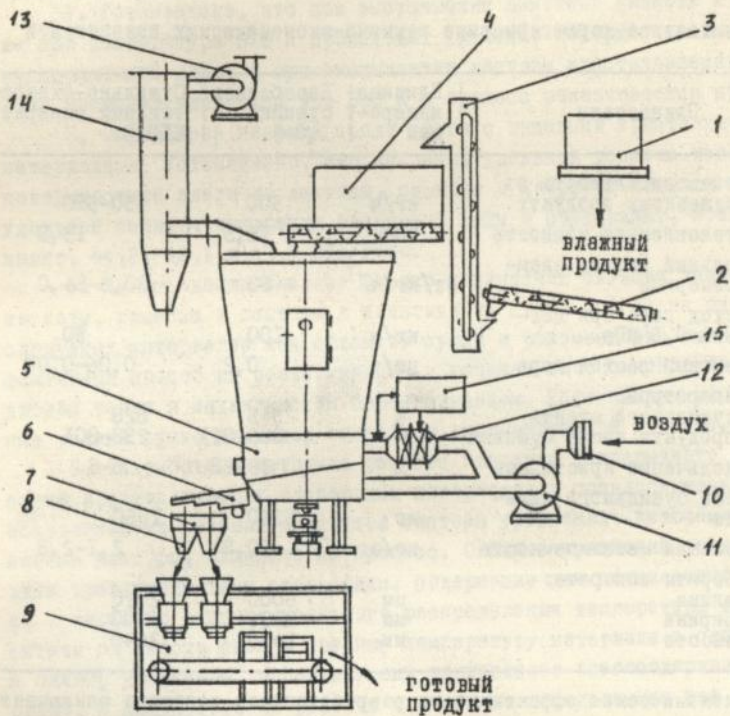


Рис. 7. Технологическая схема поточной линии для сушки и упаковки лимонной кислоты.

АНБ им. В. Стефанова  
АН УРСР

Сравнительная характеристика технико-экономических показателей работы предложенного сушильно-охлаждающего аппарата в сравнении с барабанной сушилкой представлены в табл. 3.

Таблица 3

Сравнительная характеристика технико-экономических показателей

№ п/п	Показатели	Единица измерения	Барабанная сушилка I,0-4	Сушильно-охлаждающий аппарат КТИП
1	Производительность по высушенному продукту	кг/ч	500	450-500
2	Установленная мощность	кВт	16,5	15,3
3	Удельный расход электроэнергии	Вт/кг·ч <sup>-1</sup>	33	30,6-34,0
4	Расход пара при давлении 0,6 МПа	кг/ч	100	30
5	Удельный расход пара	кг/ч	0,2	0,06-0,07
6	Температура:			
	- сушильного агента	К	343	323
	- продукта после сушилки	К	308-311	298-301
7	Измельчение кристаллов	%	18-23	6-8
8	Масса сушильного аппарата	кг	5160	1050
9	Удельная металлоемкость	кг/кг·ч <sup>-1</sup>	10,3	2,1-2,3
10	Габариты аппарата:			
	- длина	мм	6000	2310
	- ширина	мм	2125	1700
	- высота	мм	2450	2640

Экономическая эффективность разработанного аппарата заключается в улучшении качества и уменьшении потерь продукта, снижении энергетических затрат, а также уменьшении металлоемкости и габаритных размеров.

Реальный годовой экономический эффект от внедрения аппарата для завода мощностью 1,5 тыс. тонн лимонной кислоты в год составляет 36,1 тыс. руб. /в ценах 1989 года/.

## ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. С помощью методов высушивания в сушильном шкафу, ТГА и ЯМР дифференцирована поверхностная и кристаллизационная вода в лимонной кислоте, рафинированной лактозе и глюкозе. Определено количественное содержание каждого вида влаги и температурные границы ее удаления.

2. Установлено, что при высушивании лимонной кислоты и глюкозы при температуре 378 К происходит удаление поверхностной и кристаллизационной воды, а при высушивании лактозы кристаллизационная вода начинает удаляться при 383 К и процесс заканчивается при 446 К.

3. Определена энергия связи влаги с пищевыми кристаллическими материалами. Установлено, что значения удельной теплоты испарения поверхностной влаги из лактозы, глюкозы и лимонной кислоты больше удельной теплоты испарения свободной воды и составляют, соответственно, 44,2; 48,1 и 49,7 кДж/моль.

4. На основании анализа физико-химических свойств лимонной кислоты, глюкозы и лактозы и кинетики их сушки проведена оценка исследуемых материалов как объектов сушки и рекомендован наиболее эффективный способ их обезвоживания в кипящем слое с конвективным подводом тепла и механическим перемешиванием. Установлены рациональные режимы сушки лимонной кислоты и рафинированной лактозы.

5. Разработана методика расчета кинетики непрерывного процесса сушки кристаллических дисперсных материалов в псевдооживленном слое, основанная на решении замкнутой системы уравнений, включающих основные факторы, влияющие на процесс. Система уравнений сведена к двум трансцендентным уравнениям, содержащим две неизвестные величины - параметр экспоненциального распределения температуры теплоносителя по высоте слоя и среднюю температуру материала в слое, - и к одному уравнению, определяющему равновесное влагосодержание материала. В результате их решения однозначно определяются все параметры процесса.

6. Проверка предложенной методики расчета процесса сушки проведена аналитически с применением ЭВМ и экспериментально в лабораторных и производственных условиях. Соответствие расчетных и опытных значений конечного влагосодержания материала, полученных на модельной и промышленной установках, свидетельствует о достоверности предложенной методики и возможности ее применения в практических расчетах.

7. Разработана методика проектного расчета сушилок кипящего слоя непрерывного действия, в которой в качестве первого приближения использовано значение площади поперечного сечения слоя, полученное из балансового расчета. По этой методике вычислены конструктивные размеры сушильного аппарата для лимонной кислоты, выполнено рабочее проектирование, изготовлен и испытан опытно-промышленный образец. Установлено, что аппарат обеспечивает проектную производительность и качественные показатели готового продукта, соответствующие требованиям стандарта.

8. Предложены аналитические выражения для взаимосвязи между общим содержанием влаги в материалах и соотношением интегральных интенсивностей в спектрах ЯМР их расплавов. Выполнены расчеты содержания поверхностной и кристаллизационной воды в лимонной кислоте и глюкозе по данным ЯМР.

9. На базе аппарата разработана, изготовлена и испытана поточная линия для сушки и улаковки лимонной кислоты производительностью 450-500 кг/ч.

Поточная линия с сушильно-охладительным аппаратом кипящего слоя внедрена в производство и эксплуатируется в цехе лимонной кислоты Скидельского сахкомбината республики Беларусь.

Реальный годовой экономический эффект от внедрения в промышленность результатов проведенной работы составляет 36,1 тыс. руб. для завода мощностью 1,5 тыс. тонн лимонной кислоты в год.

#### СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. А.с. 1089876 /СССР/. Установка для сушки и охлаждения дисперсных материалов /Орлов Л.А., Яровой С.Л., Литвиненко А.М., Яровой В.Л. и др. - Оpubл. в Б.И., 1984, № 16.
2. Манк В.В., Михайлик В.А., Орлов Л.А., Литвиненко А.М. Определение параметров сушки пищевых кристаллических материалов. - Пищевая пром-сть. - К.: 1986, № 3, с. 35-36.
3. Манк В.В., Орлов Л.А., Литвиненко А.М. Изменение состояния воды в пищевых кристаллических продуктах в процессе их сушки. - ДАН УССР, сер. Б, 1986, № 8, с. 37-39.
4. Литвиненко А.М., Манк В.В., Орлов Л.А., Михайлик В.А. Кинетика сушки пищевых моногидратов. - Промышленная теплотехника, 1987, т. 9, № 6, с. 59-62.

5. Орлов Л.А., Яровой В.Л., Литвиненко А.М., Кохановский В.Б. и др. Аппарат для сушки и охлаждения лимонной кислоты. - Хлебопекарная и кондитерская пром-сть, 1987, № 8, с. 19-20.

6. Литвиненко А.М., Мэнк В.В., Орлов Л.А., Михайлик В.А. Совершенствование техники и технологии сушки пищевых кристаллических продуктов. - Разработка прогрессивных способов сушки различных материалов и изделий на основе достижений теории тепло- и массообмена /Тез. докл. - К.: 1987, вып. 3, с. 32.

7. Орлов Л.А., Яровой В.Л., Литвиненко А.М. Совершенствование техники и технологии сушки пищевых кристаллических материалов. - Химическая инженерия. - Лодзь: 1987, № 15, с. 70.

8. Орлов Л.А., Яровой В.Л., Литвиненко А.М. Усовершенствование техники и технологии на сушеные хранительные продукты с кристаллизационной структурой. - Приложение на псевдо кипящий слой и флуидизированные системы в хранительно-вкусовые и биотехнологичные промышленности. - Пловдив: 1989, с. 27-28.

9. Орлов Л.А., Литвиненко А.М., Бондарь О.А. Механизация процессов сушки, упаковки и погрузки пищевых кристаллических продуктов. - Дальнейшее повышение уровня механизации погрузочно-разгрузочных и транспортно-складских работ в отраслях пищевой промышленности /Тез. докл. - К.: 1987, вып. 2, с. 4-5.

10. Литвиненко А.М., Кохановский В.Б., Хмелинина Р.Г. Линия для производства лимонной кислоты. - Наука, техника, практика, 1990, № 6, с. 35.

11. Вискребцов В.Б., Литвиненко А.М. Расчет тепломассообмена при сушке кристаллических материалов в псевдооживленном слое. - Промышленная теплотехника, 1991, т. 13, № 1, с. 84-87.



Подписано в печать 21.10.92г формат 60x84/16  
Бумага писчая. Усл.печ.л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № 1599  
Отпечатано ЦУОН ГНПП "Плодвинконсерв" г.Киев,Саксаганского,1

468754

AB 26.041

**AB 26.041**