

Автор евр.  
к 56

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ УССР

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ПИЩЕВОЙ  
ПРОМЫШЛЕННОСТИ ИМЕНИ М. В. ЛОМОНОСОВА

---

На правах рукописи

Инженер КОВАЛЕВ В. С.

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ  
ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ГИДРОДИНАМИКИ  
И МАССООБМЕНА ПРИ СУШКЕ  
КАРТОФЕЛЬНОЙ КРУПКИ В КИПЯЩЕМ СЛОЕ

Специальность № 05.175 — машины и аппараты  
пищевых производств

АВТОРЕФЕРАТ  
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ  
КАНДИДАТА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

Одесса — 1970 г.

С/В

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ УССР

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ПИЩЕВОЙ  
ПРОМЫШЛЕННОСТИ ИМЕНИ М. В. ЛОМОНОСОВА

---

На правах рукописи

Инженер КОВАЛЕВ В. С.

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ  
ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ГИДРОДИНАМИКИ  
И МАССООБМЕНА ПРИ СУШКЕ  
КАРТОФЕЛЬНОЙ КРУПКИ В КИПЯЩЕМ СЛОЕ

Специальность № 05.175 — машины и аппараты  
пищевых производств

Переучет 1987 г.

АВТОРЕФЕРАТ  
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ  
КАНДИДАТА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

УД 011769

Одесский технологический  
институт  
им. М. В. Ломоносова  
БИБЛИОТЕКА

Одесса — 1970 г.

Работа выполнена в Донецком институте советской торговли.

**НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ —**

кандидат технических наук, доцент **ЖИДКО В. И.**

**ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ —**

доктор технических наук, профессор **БУРЕНКОВ Н. А.**

кандидат технических наук, доцент **ГРИШИН М. А.**

Ведущее предприятие — Черниговский овощесушильный завод.

Автореферат разослан « . . . » . . . . . 1971 г.

Защита диссертации состоится « . . . » . . . . . 1971 г. на заседании Совета Одесского технологического института пищевой промышленности имени М. В. Ломоносова.

Отзывы на автореферат диссертации (в двух экземплярах) просим направлять по адресу: г. Одесса, 39, ул. Свердлова, 112, ОТИПП им. М. В. Ломоносова.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Ученый секретарь Совета

**Л. А. ЗАПОРОЖЕЦ**

## ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с решениями Коммунистической партии и Советского правительства важнейшими задачами пищевой промышленности, в том числе консервной и овощесушильной, являются дальнейшая интенсификация, механизация и автоматизация производственных процессов, разработка и освоение новых экономически целесообразных методов обработки пищевых продуктов.

Одним из основных методов обработки пищевых продуктов, в том числе продуктов из картофеля, является процесс сушки. Интенсификация процесса сушки за счет внедрения прогрессивных методов обезвоживания и разработки новых конструкций сушильных аппаратов имеет большое народнохозяйственное значение.

В настоящей работе рассматривается комплекс вопросов, аналитическое и экспериментальное решение которых потребовалось для разработки опытно-промышленного образца сушильной установки с кипящим слоем по сушке картофельной крупки в поточной линии производства сухого картофельного пюре по методу ВНИИКОП.

Диссертация включает пять глав, излагающих состояние вопроса и теоретические предпосылки, описание экспериментальных установок по изучению гидродинамических характеристик кипящего слоя, кинетики сушки картофельной крупки, методики исследований и производственную проверку лабораторных исследований на экспериментальной установке непрерывного действия.

Работа выполнена на 143 страницах основного текста, содержит 15 таблиц, иллюстрирована 46 рисунками.

### 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Современные масштабы и перспективы развития промышленного производства сухого картофельного пюре в виде крупки, например по методу двухкратной сушки (метод ВНИИКОП), естественно требуют внедрения высокоинтенсивных способов его обезвоживания и создания новых конструк-

ций сушильных аппаратов непрерывного действия большой единичной мощности при полной автоматизации процесса.

В настоящее время в действующих поточных линиях по производству сухого картофельного пюре обезвоживание крупки-полуфабриката производят в шахтных сушилках системы ВИС. Опыт эксплуатации этих сушилок показывает, что они не обеспечивают в полной мере качественную сушку такого специфического пищевого продукта, как картофельная крупка.

Анализ литературных данных по различным способам сушки сыпучих полидисперсных материалов, в том числе и картофельной крупки, показал, что метод кипящего слоя может быть перспективным для организации процесса сушки крупки-полуфабриката в поточной линии ее производства.

Отсутствие исследований гидродинамических свойств и кинетических закономерностей сушки данного продукта в условиях кипящего слоя, а также недостаточная обоснованность методов расчета сушильных аппаратов непрерывного действия потребовали постановки комплекса исследований, состоящего из следующих этапов:

1. Изучение основных гидродинамических закономерностей кипящего слоя картофельной крупки, включающих экспериментальное определение критических скоростей псевдооживления крупки узких фракций, гидравлических сопротивлений слоев, коэффициентов формы частиц в зависимости от их размера, динамики выноса мелких фракций из кипящего слоя полидисперсного состава.

2. Исследование влияния основных режимных параметров сушки на скорость процесса обезвоживания крупки в кипящем слое в нестационарных условиях.

3. Выбор режимных параметров сушки для конкретно заданной начальной и конечной влажности крупки.

4. Разработка метода расчета процесса сушки в кипящем слое по непрерывному циклу (с постоянной загрузкой и выгрузкой материала) с использованием экспериментальных зависимостей, полученных при сушке крупки в нестационарных условиях.

5. Проверка полученных результатов исследований в производственных условиях на экспериментальной однозонной сушильной установке непрерывного действия.

6. Разработка опытно-промышленного образца сушильной установки непрерывного действия для сушки крупки в кипящем слое в поточной линии ее производства.

## II. ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КИПЯЩЕГО СЛОЯ КАРТОФЕЛЬНОЙ КРУПКИ

В работе приведен краткий обзор теоретических исследований по гидродинамике кипящего слоя и дан критический анализ двух принятых в литературе модельных представлений о характере движения газовой среды в промежутках между частицами твердой фазы в кипящем слое (внешняя и внутренняя задача). Представление о фильтрации газа через кипящий слой как обтекание совокупности частиц (внешняя задача) имеет более универсальные возможности для установления основных гидродинамических закономерностей.

Как показали исследования У. Ц. Андреса, Г. П. Гупало, В. М. Дементьева и др., внешняя задача позволяет установить универсальную зависимость  $Re = f(\varepsilon \cdot Ar)$ , справедливую во всем диапазоне существования кипящего слоя. Наиболее приемлемое обоснование зависимости  $Re = f(\varepsilon \cdot Ar)$  показано в теоретических исследованиях Б. М. Граховского, которое основано на фундаментальных работах в области микрореологии суспензий, принадлежащих А. Эйнштейну, В. Ванду.

Положив в основу первое модельное представление о характере движения газовой среды относительно твердой фазы в кипящем слое, нами была проведена обработка опытных данных по критическим скоростям псевдооживления ряда узких фракций картофельной крупки в виде зависимости:

$$\frac{Re}{\varepsilon} = f(\varepsilon^{k-1} \cdot Ar) \quad (1)$$

Опыты по определению критических скоростей псевдооживления картофельной крупки различных фракций и гидравлических сопротивлений слоев продукта различной высоты проводили на плексигласовых моделях, имеющих формы цилиндра диаметром 100 мм и обращенного усеченного конуса с углом раскрытия  $\alpha = 16^\circ$  и диаметром нижнего основания 150 мм. Газораспределительная решетка была выполнена из перфорированного металлического листа, покрытого сверху проволочной сеткой 035 (ГОСТ 3584—53). Установка была оборудована измерительными приборами для определения расхода воздуха, гидравлического сопротивления слоя.

Исследования проводились на картофельной крупке фракций: 0,125—0,25; 0,25—0,45; 0,45—0,63; 0,63—0,8; 0,8—1,0; 1,0—1,25; 1,25—1,6; 1,6—2,0 мм. Результаты опытов пред-

ставлены в таблицах и обработаны в критериальной форме.

Сравнительный анализ экспериментальных данных по критическим скоростям псевдооживления частиц шаровой и неправильной форм дал возможность оценить коэффициент формы частиц в виде зависимости:

$$\psi = \frac{4}{3 \cdot b} \cdot \frac{\varepsilon_{к+1} \cdot A_{г}}{(Re/\varepsilon)^{2-p}} \quad (2)$$

Характерной особенностью для картофельной крупки является зависимость коэффициента  $\psi$  от размера частиц.

Второй задачей экспериментального исследования гидродинамики кипящего слоя было изучение некоторых закономерностей уноса твердой фазы из полидисперсного слоя.

На основании критического анализа различных физических моделей, объясняющих механизм уноса частиц из кипящего слоя, было установлено, что доминирующим фактором, определяющим скорость уноса твердой фазы из слоя, является отношение скоростей оживающего агента и витания частиц.

Нами была разработана методика и проведены эксперименты, которые позволили определить скорость уноса твердой фазы по отдельным фракциям из полидисперсного слоя в зависимости от скорости оживающего агента и времени продувки.

В соответствии с методикой эксперимента навески исходного материала определенного гранулометрического состава, поочередно помещенные в плексигласовую колонку  $\varnothing 300$  мм и  $H=1550$  мм с перфорированным дном, продували в течение фиксированного времени при различных скоростях воздушного потока. Частицы материала, вынесенные из слоя, улавливали циклонные отделители с тканевыми фильтрами. Вес уноса во времени фиксировали по изменению высоты осадка частиц в мерных цилиндрах.

После продувки навески унос частиц в осадочных цилиндрах разделяли по высоте, рассеивали по фракциям и взвешивали.

Для количественной оценки уноса частиц по фракциям из кипящего слоя полидисперсного состава при достаточной высоте надсепарационного пространства, обеспечивающей сглаживание турбулентных пульсаций скоростей воздушного потока, результаты опытных данных обработаны в безраз-

мерном виде в полулогарифмических координатах  $lq\beta = f(HO)$  и представлены зависимостью:

$$\beta = \exp(-\varphi \cdot HO), \quad (3)$$

где  $\varphi$  — экспериментальная константа уноса, определяемая зависимостью:

$$\varphi = 5,3 \cdot 10^{-8} \cdot \left(\frac{u}{u_B}\right)^6. \quad (4)$$

Экспериментальные исследования некоторых гидродинамических свойств кипящего слоя картофельной крупки в моделях в виде цилиндра и обращенного усеченного конуса с углом раскрытия  $\alpha = 16^\circ$  показали, что устойчивое псевдоожигение слоя заданного фракционного состава и влажности наблюдается при скорости ожижающего агента  $u = 1,0$  м/сек и высоте слоя  $H > 50$  мм.

### III. ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ СУШКИ КАРТОФЕЛЬНОЙ КРУПКИ

Опыты по сушке крупки проводили в нестационарных условиях на установке (рис. 1). Сушильная установка состоит из рабочей камеры в форме обращенного усеченного конуса, соединенной с настольными циферблатными весами, вентилятора, электрокалорифера, системы воздухопроводов с регулировочной задвижкой, устройств для измерения расхода и температуры агента сушки, а также температуры слоя крупки.

В опытах использовали крупку-полуфабрикат заводского производства фракций 0,63+1,0; 1,0—1,25 и 1,25—1,6 мм влажностью  $W = 47—60\%$ .

Из множества факторов, влияющих на скорость сушки крупки в условиях кипящего слоя, мы изучали влияние массовой скорости сушильного агента  $u\rho$ , потенциала сушки  $E$  и удельной нагрузки материала на газораспределительную решетку  $G/F_p$ . Эксперименты проводили в следующем диапазоне изменения режимных параметров:

$$E = 30 - 64^\circ\text{C}; \quad u\rho = 1,0 - 2,9 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{сек}};$$

$$G/F_p = 6 - 23 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2};$$

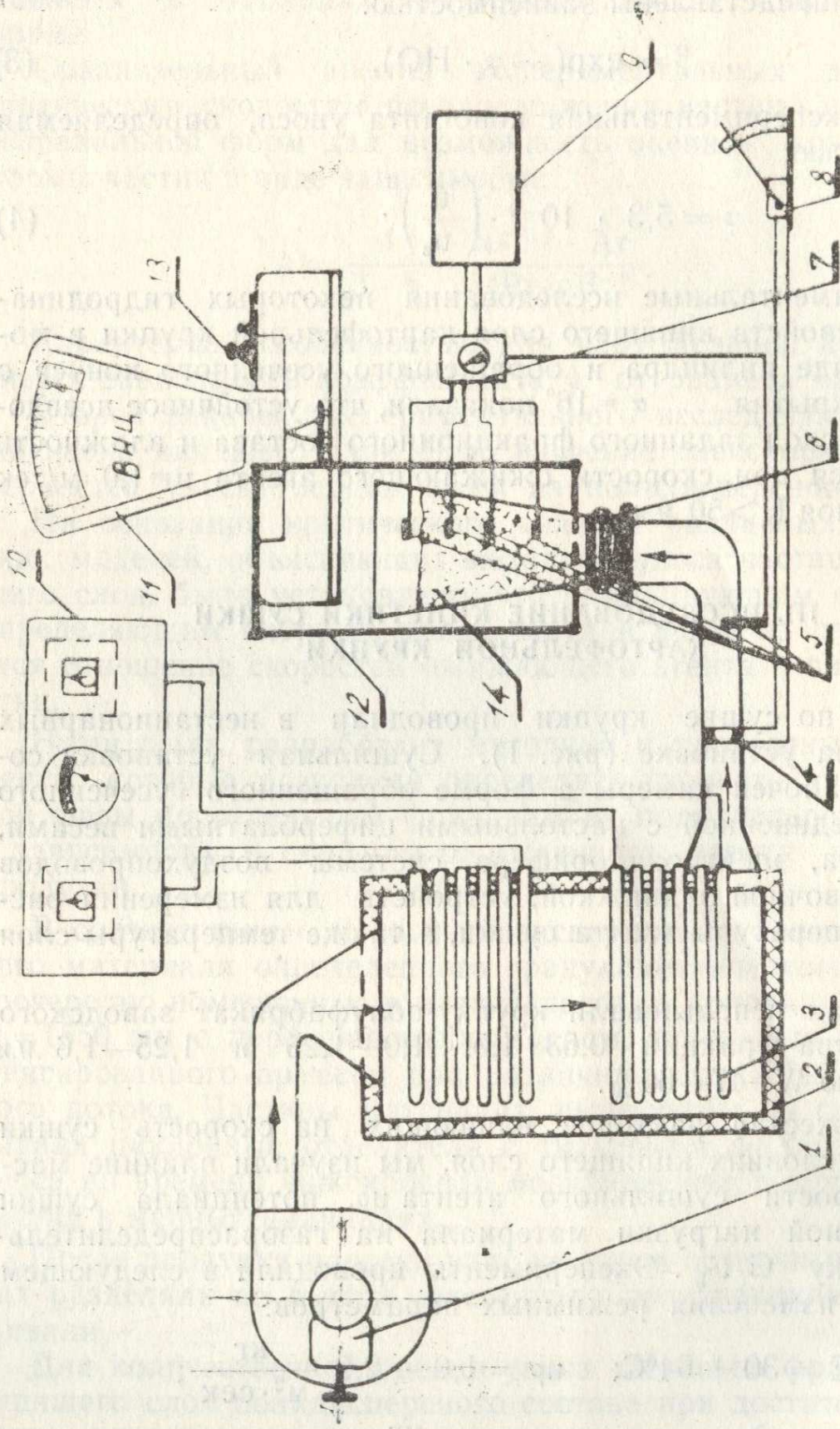


Рис. 1. Схема экспериментальной установки периодического действия

1 — вентилятор типа ВВД; 2 — электрокалорифер; 3 — трубчатые нагревательные элементы (ТЭНы); 4 — нормальная диафрагма; 5 — термопары; 6 — стяжки-замки; 7 — многопозиционный переключатель; 8 — микроамперметр типа ММН-3; 9 — потенциометр ПП-63; 10 — регуляторы напряжения; 11 — настольные весы ВНЦ; 12 — шарнирный четырехзвенник; 13 — система гирь; 14 — сушильная камера.

Верхний предел температуры сушильного агента, равный  $t_c = 100^\circ\text{C}$ , выбран на основании специальных экспериментов. Было установлено, что при выбранном режиме псевдоожижения и заданных численных значениях начальной  $w_1$  и конечной  $w_2$  влажности картофельной крупки увеличение температуры сушильного агента свыше  $100^\circ\text{C}$  приводит к потемнению продукта, что недопустимо с точки зрения технических условий на производство сухого картофельного пюре.

Остальные же качественные показатели картофельной крупки при указанных режимах сушки по данным лабораторных анализов Черниговского овощесушильного завода остаются на допустимом уровне.

На рис. 2, 3, 4 показаны кривые сушки и скорости сушки крупки соответственно при различных значениях  $u\rho$ ,  $E$ ,  $G/F_p$ . Из полученных данных следует, что изменение режимных параметров влияет лишь на интенсивность обезвоживания продукта, характер же кривых сушки остается неизменным. Опыты показали, что процесс сушки крупки имеет периоды постоянной и убывающей скоростей сушки, разделяемые критическим значением влажности  $w_k \cong 20\%$ . В периоде убывающей скорости сушки кривая  $w=f(\tau)$  близка к экспоненциальной зависимости, асимптотически приближающейся к равновесной влажности продукта. То, что  $w_k$  почти не изменяет своей численной величины в разных режимных условиях сушки, свидетельствует о том, что удаление свободной влаги происходит практически равномерно по всей массе частиц крупки до начала наступления удаления связанной влаги. Полученные данные показывают, что характер кривых сушки и интенсивность обезвоживания крупки почти не зависят от размера частиц в пределах принятых в опытах фракций.

В результате обработки экспериментальных данных получена зависимость скорости сушки картофельной крупки от  $E$ ,  $u\rho$ ,  $G/F_p$  в периоде постоянной скорости сушки в виде:

$$N = A \cdot E \cdot (u\rho)^{0.76} \cdot (G/F_p)^{-0.62}, \quad (5)$$

где  $A$  — опытный коэффициент ( $A = 1,7 \cdot 10^{-2}$ ).

В периоде убывающей скорости сушки изменение влажности крупки во времени с достаточной степенью точности может быть описано экспоненциальной зависимостью вида:

$$\frac{w_k - w_p}{w - w_p} = \exp[-k_c(\tau - \tau_k)], \quad (6)$$

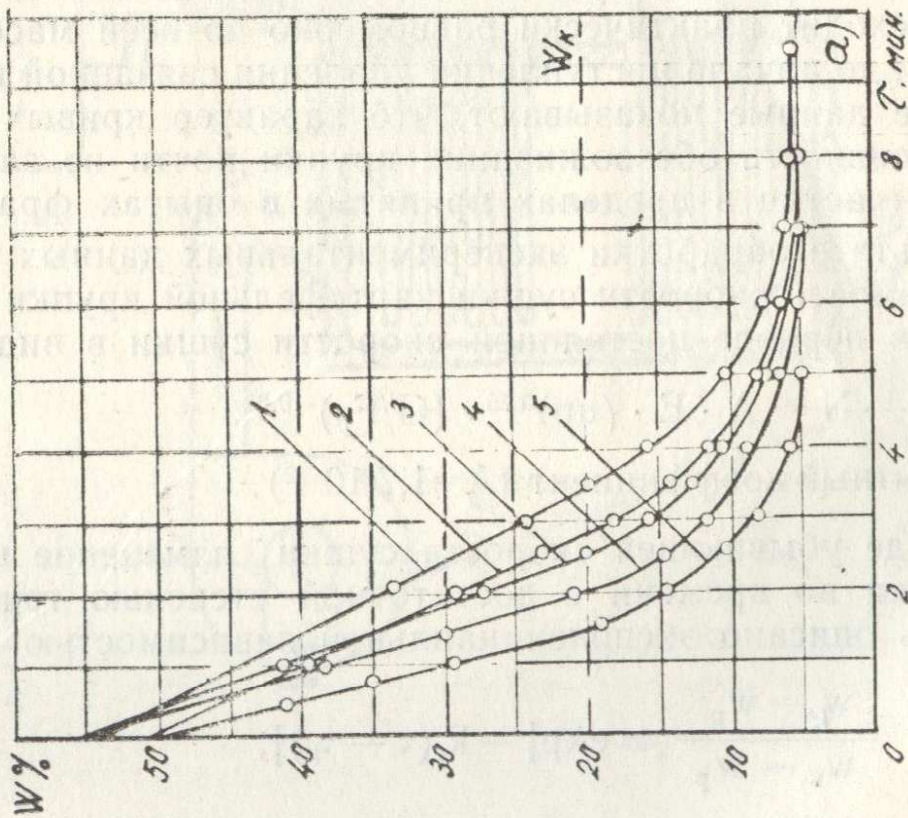
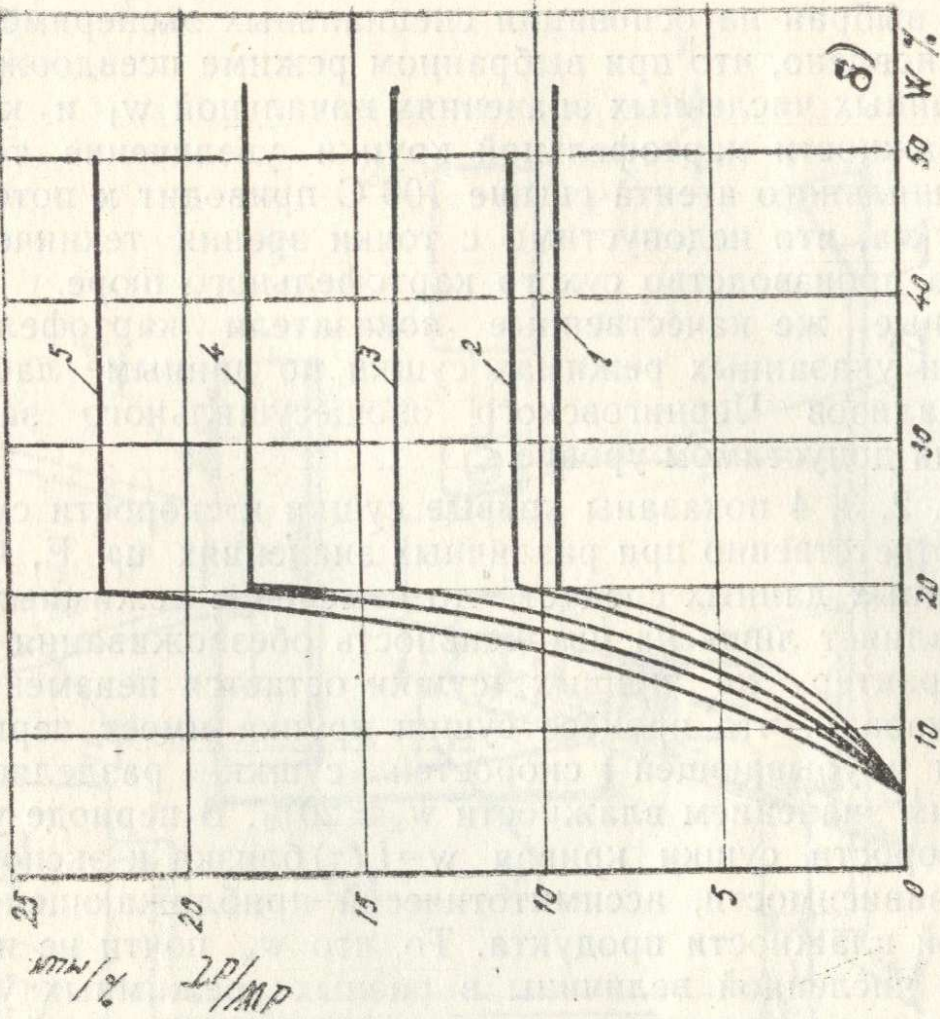


Рис. 2а, б. Кривые сушки и скорости сушки картофельной крупки при различной массовой скорости сушильного агента  
 1 — 1,0 кг/м<sup>2</sup> сек; 2 — 1,3; 3 — 1,62; 4 — 2,16; 5 — 2,73; при  $E = 64^{\circ}\text{C}$  и  $G/F_p = 12,0 \text{ кг/м}^2$ .

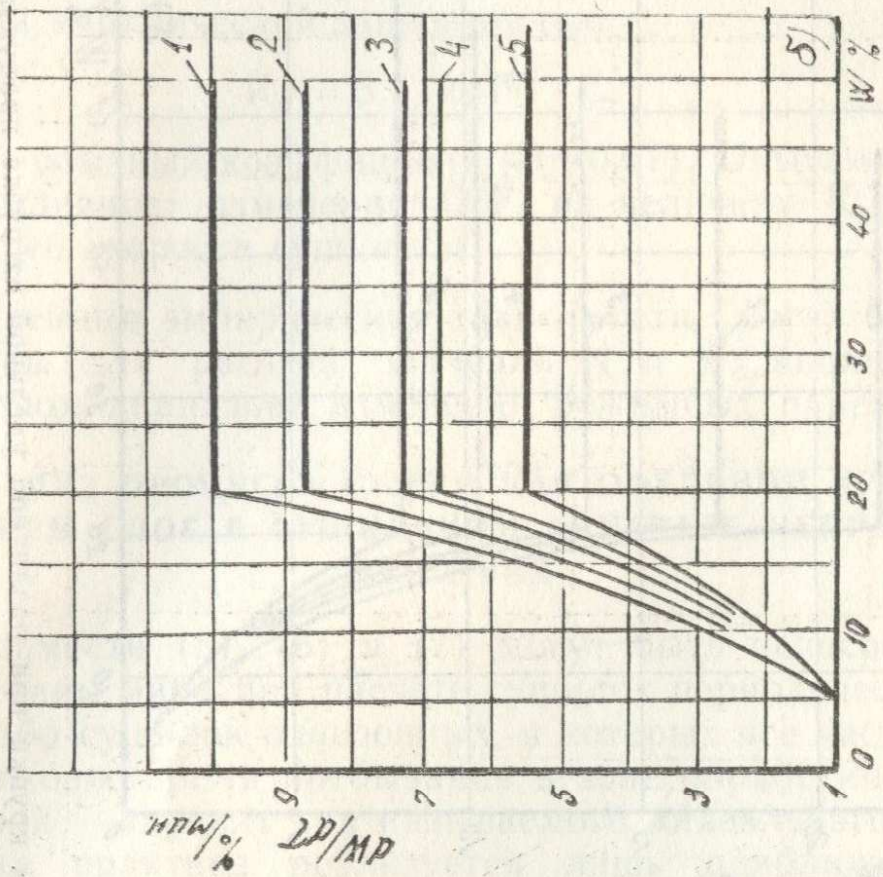
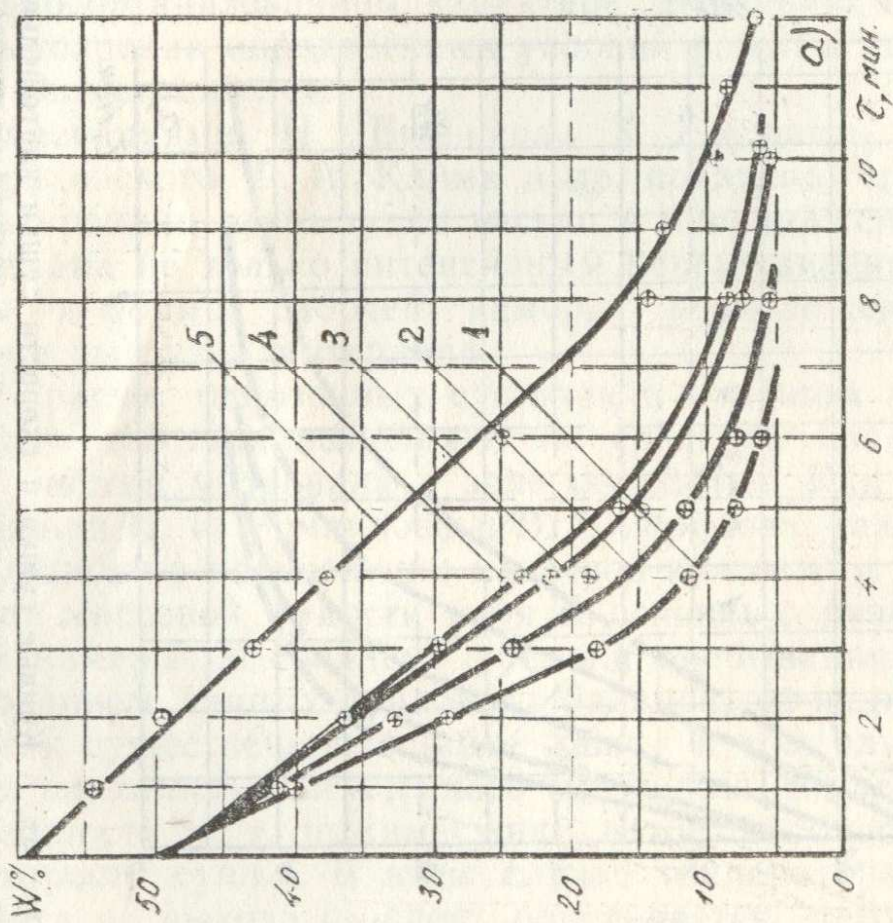


Рис. 3а, б Кривые сушки и скорости сушки крупки при различном потенциале сушильного агента:

1 — E = 64°C; 2 — E = 60°C; 3 — E = 50°C; 4 — E = 34°C; 5 — E = 30°C;  $u_p = 1,3 \text{ кг/м}^2 \text{ сек}$ ;  $G/F_p = 19 \text{ кг/м}^2$ .

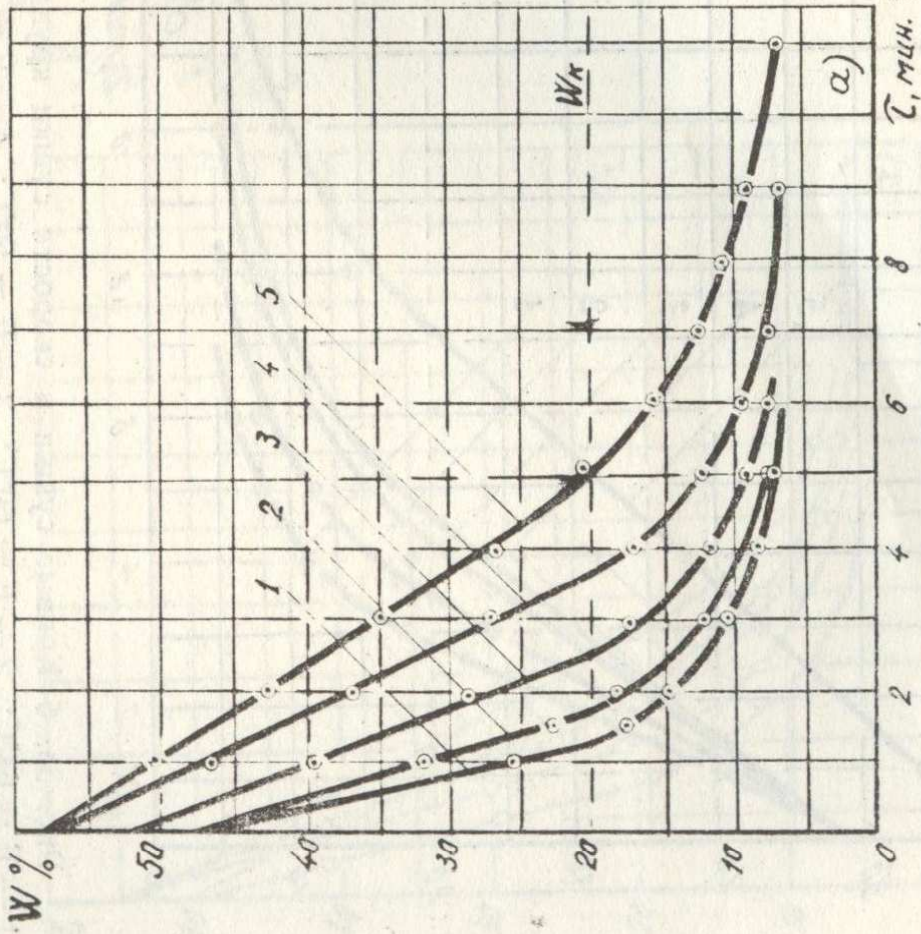
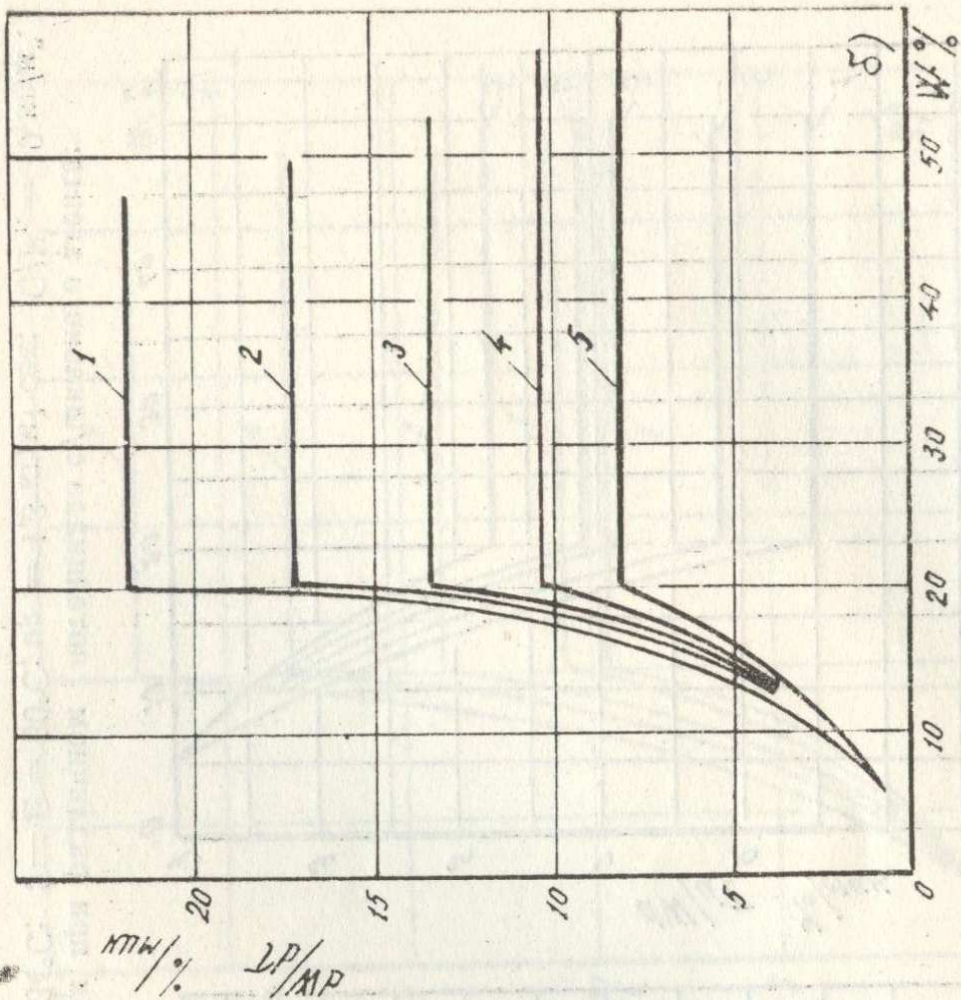


Рис. 4а, б Кривые сушки и скорости сушки картофельной крупки при различной удельной нагрузке продукта на газораспределительную решетку в расчете на сухую массу.

1 —  $G/F_p = 5,96 \frac{\text{кг}^2}{\text{м}^2}$ ; 2 —  $G/F_p = 8,84$ ; 3 —  $G/F_p = 10,8$ ; 4 —  $G/F_p = 15,9$ ; 5 —  $G/F_p = 23,1$  E = 52°C,  
 $\rho_r = 2,15 \text{ кг/м}^2 \text{ сек.}$

где  $K_c$  — коэффициент сушки для данного материала, определяемый эмпирической зависимостью:

$$K_c = B \cdot (ur)^{0.3} \cdot E, \quad (7)$$

где  $B$  — опытный коэффициент ( $B=0,01$ ). Опытами не обнаружено влияние изменения  $G/F_p$  на величину  $K_c$  в периоде убывающей скорости сушки.

Полученные эмпирические зависимости могут быть рекомендованы для расчета значений  $N$  и  $K_c$  кипящего слоя в указанном диапазоне изменения режимных параметров.

#### IV. АНАЛИЗ ПРОЦЕССА СУШКИ КАРТОФЕЛЬНОЙ КРУПКИ В КИПЯЩЕМ СЛОЕ В СУШИЛЬНОМ АППАРАТЕ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

Зависимости (5), (6) и (7) могут быть непосредственно использованы либо при расчете сушилок периодического действия, либо сушилок однозонных, в которых все частицы имеют одинаковое время пребывания в зоне обработки. Последний случай — вариант так называемого «идеального вытеснения» — на практике реализуется лишь приближенно при специально организованном характере движения материала и при выполнении определенных условий режима псевдооживления и геометрии слоя.

Исследованиями Н. Бреннера, К. Боулинга, Т. Вуда, Б. М. Граховского, Г. А. Каима и др. показано, что неоднородность времени пребывания частиц в кипящем слое может быть вызвана не только интенсивным перемешиванием материала, но и формой рабочей камеры, расположением мест загрузки и выгрузки материала.

Часто расчет однозонных сушилок с кипящим слоем непрерывного действия выполняют по среднему времени пребывания частиц материала в зоне обработки. Как показали исследования П. Г. Романкова и В. В. Фролова, такой расчет ведет к ошибке в определении конечной влажности продукта.

Расчет массовой емкости слоя и основных размеров сушильной камеры по среднему времени пребывания частиц с использованием данных теплового баланса, по-видимому, не приведет к существенной ошибке лишь в том случае, если конечная влажность высушенного материала выше критической влажности, т. е. режим сушки лежит в области постоянной скорости сушки. В этом случае температура сушильного агента на выходе из слоя определяется температурой

насыщения. Однако, если конечная влажность материала значительно ниже критической, эта температура становится существенно неопределенной, поскольку надежных методов расчета температурного поля материала и агента сушки пока нет. Таким образом, в этих условиях привлечение данных о распределении частиц по времени пребывания в сушильном аппарате может оказаться полезным.

В работе проанализированы два варианта распределения частиц по времени пребывания в зоне обработки: вариант с мгновенным перемешиванием и вариант с «диффузионным» перемешиванием в поперечном направлении в слое с направленным движением. В основе анализа лежат идеи, разработанные в трудах Л. Г. Романкова и В. В. Фролова, Б. М. Граховского.

Для определения средней влажности готового продукта на выходе из зоны обработки необходимо прежде всего осуществить переход от функции распределения частиц по времени пребывания к функции распределения частиц по влажности. Этот переход осуществляется с помощью уравнения взаимности функций распределения, предложенного Л. Г. Романковым и В. В. Фроловым:

$$\rho(\tau) \cdot d\tau = \rho(w) \cdot dw. \quad (8)$$

Если известен вид функции  $\rho(\tau)$  и  $w(\tau)$ , то можно определить функцию  $\rho(w)$ . В функцию  $\rho(\tau)$  входит в качестве параметра среднее время пребывания частиц  $\tau_0$ . Соответственно  $\rho(w)$  характеризуется средней влажностью  $w_0$ . Зная  $\rho(w)$ , можно найти  $w_0$  по формуле осреднения:

$$w_0 = \frac{\int_{w_1}^{w_p} w \cdot \rho(w) \cdot dw}{\int_{w_1}^{w_p} \rho(w) \cdot dw} = \int_{w_1}^{w_p} w \cdot \rho(w) \cdot dw. \quad (9)$$

Последнее равенство справедливо, поскольку интеграл в знаменателе нормируется и равен единице. Вычисления по формулам (8), (9) позволяют найти связь между  $w_0$  и  $\tau_0$ , т. е. перейти от зависимости  $w(\tau)$  для периодического процесса к зависимости  $w_0(\tau_0)$  для непрерывного процесса сушки. При этом необходимо знание функции плотности распределения

частиц по времени пребывания в кипящем слое. Для случая мгновенного перемешивания частиц, когда плотность распределения их в кипящем слое подчиняется экспоненциальному закону, зависимость усредненной влажности материала  $W_0$  на выходе из зоны обработки от режимных параметров сушки можно представить в аналитической форме:

$$w_0 = (w_1 - N\tau_0) - \left[ \frac{(w_k - w_p) \cdot k\tau_0}{k\tau_0 + 1} - N\tau_0 \right] \cdot \exp\left(\frac{w_1 - w_k}{N \cdot \tau_0}\right). \quad (10)$$

При заданных  $w_1$ ,  $w_k$ ,  $w_p$  зависимость (10) позволяет оценить возможный диапазон значений  $N\tau_0$  и  $K\tau_0$ , при которых можно получить заданную техническими условиями  $W_0$ . Проведенные нами вычисления по уравнению (10) показали, что при заданных  $w_1$ ,  $w_k$ ,  $w_p$  и принятых режимах сушки практически трудно осуществить досушку крупки до требуемой техническими условиями влажности в однозонном сушильном аппарате непрерывного действия с мгновенным перемешиванием частиц в пределах режимов сушки, исследованных экспериментально в нестационарных условиях.

Отсюда был сделан вывод, что для сушки картофельной крупки следует применить либо многоступенчатую схему сушки (многозонная сушилка), либо попытаться так подобрать соотношение между производительностью сушилки и геометрическими размерами слоя, определяющими интенсивность поперечного перемешивания частиц, чтобы характер распределения частиц по времени пребывания был благоприятным для осуществления однозонной схемы сушки. В работе был принят последний случай—вариант с так называемым «диффузионным» перемешиванием. Но для его осуществления необходимо было провести исследования влияния высоты слоя на интенсивность поперечного перемешивания частиц (коэффициента диффузии частиц) при оптимальной скорости подачи сушильного агента в слой.

Опыты проводили в сушильной камере с соотношением сторон газораспределительной решетки 10:1. Методика проведения опытов заключалась в следующем: на расстоянии 30 мм от левого торца внутри камеры устанавливали пластинку—перегородку, которая отделяла секцию с помещенной в нее меченой картофельной крупкой. Высота слоя крупки в секции принималась такой же, как и в остальной части рабочей камеры, куда засыпали основной (немеченый) продукт.

Опыты проводили при скорости воздушного потока  $w = 1,0$  м/сек, соответствующей рациональному режиму псевдооживления слоя и при влажности крупки равной 12%, что близко к конечной влажности продукта. Высоту слоя крупки изменяли от 50 мм до 125 мм.

После подачи воздуха в камеру и установления рабочего режима псевдооживления пластинку—перегородку вынимали и включали секундомер. Перемешивание частиц в слое по времени ограничивали моментом, когда меченые частицы появлялись на расстоянии 100—150 мм от сливного порога камеры. Затем подачу воздуха в слой прекращали и производили отбор проб крупки из слоя вдоль камеры через каждые 100 мм. В пробах отбирали все меченые частицы, которые затем взвешивали. Суммарный вес всех меченых частиц принимали за единицу и подсчитывали их доли в отдельных пробах. Таким образом определяли относительную концентрацию меченых частиц в слое по длине камеры. По данным экспериментов производили расчет коэффициентов поперечной диффузии, воспользовавшись известным решением уравнения диффузии от мгновенного плоского источника в полупространство:

$$n_x = \frac{G}{\Sigma G_x} \sim \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot D_0 \cdot \tau}} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{4D_0 \cdot \tau}\right). \quad (11)$$

Из формулы (11) видно, что представление опытных данных в виде графической зависимости  $\lg n_x = f(x^2)$  должно интерпретироваться прямой с тангенсом угла наклона  $\frac{1}{4D_0 \cdot \tau}$ , по которому можно определить коэффициент поперечной диффузии частиц в кипящем слое, если известно время их перемешивания.

Результаты опытов показали, что зависимость коэффициента  $D_0$  от высоты слоя  $H$  аппроксимируется равенством:

$$D_0 = 0,5 \cdot H^{1,5} \quad (12)$$

Полученные экспериментальные данные были положены в основу анализа влияния распределения частиц по времени пребывания в кипящем слое с направленным движением на среднюю влажность продукта на выходе из зоны сушки.

Аналитическое решение этой задачи хотя, видимо, и возможно, но практически более удобен графо-аналитический метод перехода от функции  $\rho(\tau)$  к функции  $\rho(w)$ , разработан-

ный нами и пригодный для любой формы кривой  $\rho(\tau)$ . В нашем случае кривая  $\rho(w)$  строилась по кривой  $\rho(\tau)$ , полученной с помощью асимптотического решения, предложенного Н. Бреннером, и кинетической кривой сушки, полученной в наших опытах с периодической сушкой. Принцип построения ясен из рис. 5. С помощью кривой  $\rho(w)$  определяем средне-интегральную влажность готового продукта по формуле осреднения:

$$w_0 = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot \rho(w) \cdot \Delta w_i}{\sum_{i=1}^n \rho(w_i) \cdot \Delta w_i}; \quad (13)$$

Форма кривой  $\rho(\tau)$ , а следовательно,  $\rho(w)$  и величина  $w_0$  зависят от числа  $Pe$ , т. е. для обеспечения необходимой влажности продукта на выходе из зоны сушки требуется подобрать параметры  $u_c$ ,  $L$ ,  $D_0$ , или же при заданной производительности определить высоту слоя  $H$ , чтобы форма кривой  $\rho(\tau)$  была наиболее благоприятной. На рис. 5 (III квадрант) показана функция  $\rho(w)$  для числа  $Pe=4$ . В результате подсчета величин  $w_0$  по формуле (13) для различных чисел  $Pe$  построена зависимость  $w_0=f(Pe)$  и показана на IV квадранте, из которого видно, что требуемая конечная влажность крупки  $w_2=11,1\%$ , обусловленная техническими условиями на ее производство, может быть получена при  $Pe=12$ . Для того чтобы найти условия, при которых  $Pe=12$ , сделаны вычисления и получено оптимальное значение высоты слоя для материала, равное  $0,075$  м. Полученное значение  $H=0,075$  м при принятых соотношениях длины и ширины газораспределительной решетки, оптимальных режимах псевдооживления слоя и сушки, заданной начальной  $w_1$  и конечно  $w_2$  влажности продукта, является необходимым условием реализации процесса непрерывного процесса обезвоживания крупки-полуфабриката в однозонном сушильном аппарате в поточной линии производства сухого картофельного пюре.

## V. ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ ПРОВЕРКА РАЗРАБОТАННЫХ РЕКОМЕНДАЦИЙ

Проведенные исследования по гидродинамике и кинетике сушки картофельной крупки, анализ процесса сушки ее в однозонном сушильном аппарате непрерывного действия, тепло-

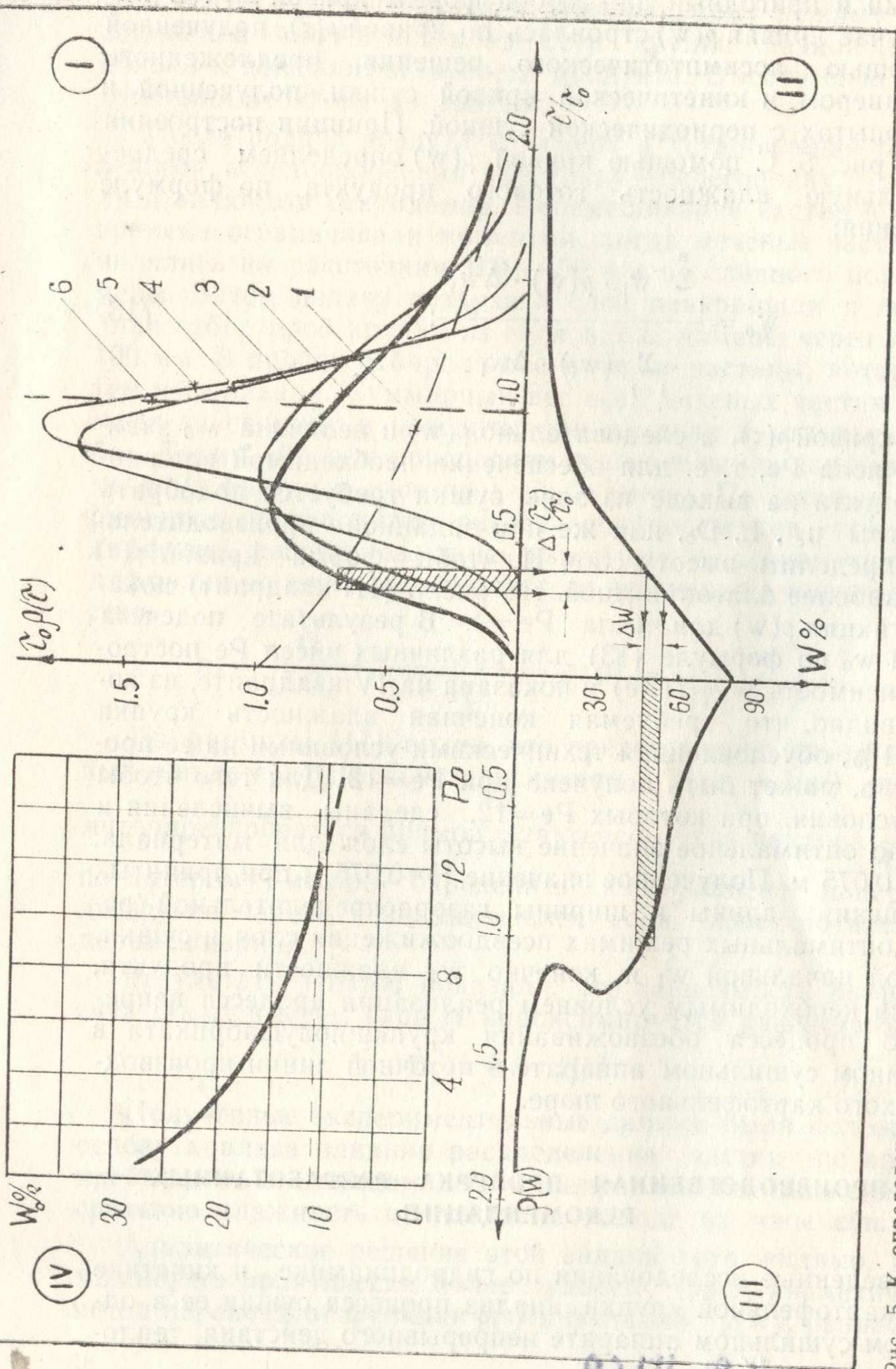


Рис. 5 К определению усредненной влажности крупки на выходе из зоны сушки в направленном кипящем слое.

- I — плотность распределения частиц по времени пребывания; 1 —  $Re = 0$  (мгновенное перемещение); 2 —  $Re = 1$ ; 3 —  $Re = 4$ ; 4 —  $Re = 8$ ; 5 —  $Re = 10$ ; 6 —  $Re = \infty$  (идеальное вытеснение);
- II — Расчетная кривая сушки для периодического процесса.
- III — Плотность распределения частиц по влажности при  $Re = 4$ .
- IV — Зависимость средней влажности материала по выводу из зоны сушки от  $Pe$ .

вые (балансовые) расчеты сушилки позволили разработать конструкцию сушильной установки производительностью 50 кг/час по высушенному продукту.

Испытания сушилки на Черниговском овощесушильном заводе подтвердили результаты теоретических и экспериментальных исследований.

Основные технико-экономические показатели сушилки с кипящим слоем для сушки крупки сопоставлены с показателями шахтной сушилки ВИС. Годовой экономический эффект от внедрения предложенной сушильной установки составит 3,4 тыс. рублей при сроке окупаемости капитальных вложений в течение 0,5 года.

На основании проведенных исследований и заводских испытаний экспериментальной сушилки разработан проект опытно-промышленного образца однозонной сушильной установки непрерывного действия производительностью 250 кг/час по готовому продукту для сушки картофельной крупки-полуфабриката в поточной линии ее производства по методу ВНИИКОП.

### **ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ**

1. Изучены гидродинамические характеристики кипящего слоя картофельной крупки ряда узких фракций. На основании обработки экспериментальных данных получено уравнение (2) для оценки коэффициента формы частиц крупки в зависимости от их размера.

2. Получено приближенное эмпирическое уравнение (4) для определения константы уноса твердой фазы из кипящего слоя полидисперсного состава.

3. Экспериментальными исследованиями выявлены характерные особенности процесса сушки картофельной крупки в условиях кипящего слоя. Получены эмпирические уравнения (5), (6) и (7) для расчета кинетики сушки картофельной крупки в нестационарных условиях в зависимости от потенциала и массовой скорости агента сушки, удельной нагрузки материала на газораспределительную решетку для периодов постоянной и убывающей скоростей сушки.

4. Разработан графо-аналитический метод пересчета экспериментальных данных, полученных при периодическом процессе сушки (нестационарные условия) на непрерывный про-

цесс сушки крупки в озонном сушильном аппарате с кипящим слоем.

5. На основании проведенных исследований по гидродинамике и кинетике сушки картофельной крупки, гидродинамических и тепловых (балансовых) расчетов сушильного аппарата спроектирована, изготовлена и испытана в производственных условиях на Черниговском овощесушильном заводе экспериментальная озонная сушильная установка с кипящим слоем производительностью 50 кг/час.

Производственные испытания сушильной установки подтвердили выводы, полученные в лабораторных условиях, и показали, что при заданной величине снижения влажности картофельной крупки (от 45 до 10%) рациональной температурой и скоростью агента сушки являются соответственно  $t=100^{\circ}\text{C}$  и  $u=1,0$  м/сек.

6. Произведен расчет и выполнен рабочий проект опытно-промышленного образца озонной сушильной установки с кипящим слоем непрерывного действия производительностью 250 кг/час для сушки картофельной крупки-полуфабриката в поточной линии производства сухого картофельного пюре для Черниговского овощесушильного завода. Годовой экономический эффект от внедрения такой сушилки по сравнению с шахтной сушилкой ВИС составит 3,4 тыс. рублей при сроке окупаемости капитальных затрат в течение 0,5 года.

#### ПРИНЯТЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

$$Re = \frac{u \cdot d_T}{\nu} \text{ — число Рейнольдса;}$$

$$Ar = \frac{gd^3}{\nu^2} \cdot \frac{\gamma_T - \gamma}{\gamma} \text{ — число Архимеда;}$$

$\varepsilon$  — порозность слоя;

$k$  — коэффициент стесненности витания;

$$НО = \frac{u \cdot \tau}{d} \text{ — число гомохронности;}$$

$u_0, u, u_B, u_C$  — соответственно критическая скорость псевдооживления, скорость фильтрации воздуха, скорость витания частиц и скорость движения слоя (м.сек<sup>-1</sup>);

$w_1, w, w_K, w_0$  — влажность крупки на сухую массу: соответственно начальная, текущая, критическая и равновесная (%);

$u \cdot \rho$  — массовая скорость сушильного агента ( $\text{кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}$ );

$E$  — потенциал сушки  $^{\circ}\text{C}$ ,  $G/F_p$  удельная нагрузка продукта на решетку ( $\text{кг} \cdot \text{м}^{-2}$ );

$\tau_k$  — время сушки, соответствующее критической влажности материала (сек);

$\tau_0$  — среднее время пребывания частиц в камере сушки (сек);

$Pe = \frac{u_c \cdot L}{D_0}$  — число Пекле;

$L$  — длина слоя (м);

$H$  — высота слоя (м);

$D_0$  — коэффициент поперечной диффузии частиц в кипящем слое ( $\text{м}^2 \cdot \text{сек}^{-1}$ );

$X$  — горизонтальная координата (м);

$n$  — показатель режима фильтрации газа

$b$  — коэффициент, зависящий от режима фильтрации;

$\beta$  — относительный остаток частиц рассматриваемой фракции в слое.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Ковалев В. С., Дементьев В. М., Граховский Б. М. К вопросу уноса полидисперсного материала из кипящего слоя.

Сб. Высокотемпературные эндотермические процессы в кипящем слое. Вып. 7. изд. «Металлургия», Москва, 1968.

2. Ковалев В. С.

Экспериментальные исследования сепарации бинарной смеси сыпучих материалов в кипящем слое.

Сб. Материалы научной конференции ДИСТА. г. Донецк, 1968.

3. Ковалев В. С.

Экспериментальные исследования аэродинамики кипящего слоя картофельной крупки.

Журнал «Консервная и овощесушильная промышленность», № 6, 1969.

4. Ковалев В. С.

Некоторые вопросы аэродинамики кипящего слоя картофельной крупки. Научные записки, вып. XVII, ДИСТ, г. Донецк, 1969.

5. Ковалев В. С.

Исследование процесса сушки картофельной крупки в кипящем слое. Научные записки, вып. XIX, ДИСТ, г. Донецк, 1970.

6. Жидко В. И., Ковалев В. С.

Сушка картофельной крупки в кипящем слое. ИЗВ. ВУЗов, Пищевая технология, I, 1971.

По материалам диссертации сделаны доклады

1. На Всесоюзной конференции по высокотемпературным эндотермическим процессам в кипящем слое, Донецк, ноябрь 1966.

2. На Всесоюзной межвузовской научной конференции по новым физическим методам обработки пищевых продуктов. Воронеж, сентябрь 1968.

3. На Всесоюзной межвузовской конференции по термическим методам обработки при консервировании пищевых продуктов, Одесса, октябрь 1969.

4. На отчетно-научных конференциях в Донецком институте советской торговли, 1967, 1968, 1969, 1970 гг.