

Автореф.

Г/2

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ ИМЕНИ М.В.ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Гаврилов Виталий Яковлевич

УДК 65.012:66.04/582.998.2/:002.2

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕРМООБРАБОТКИ
ЯДЕР ПОДСОЛНЕЧНИКА И КУНЖУТА
В ПРОИЗВОДСТВЕ ХАЛВЫ

Специальность 05.18.12 -
процессы и аппараты пищевых производств

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Одесса - 1987

Кротов Е.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В решениях XXУП съезда КПСС и предшествовавшего ему апрельского (1985 г.) Пленума ЦК КПСС взят курс на перевод народного хозяйства страны на интенсивный путь развития, на скорейшую реализацию Продовольственной программы СССР. Fundamentом интенсификации является техническое перевооружение и реконструкция народного хозяйства, в том числе пищевой промышленности, на основе достижений научно-технической революции. Один из путей интенсификации заключается в использовании надежных, проверенных практикой технических новшеств для получения максимальной отдачи.

Директивными документами партии и правительства перед пищевой промышленностью поставлено задание по развитию производства халвы. Особое место в подготовительных процессах производства халвы занимают процессы обжарки и охлаждения ядер. Они во многом определяют производительность поточной линии и качество готовой продукции.

Анализ современного уровня техники в этой области показывает, что для термической обработки используются малоэффективные, технически и морально устаревшие аппараты. В некоторых из них процесс обжарки ядер затягивается до 2,5 часов при низкой производительности и низком уровне механизации. Поэтому исследование новых методов термообработки и разработка высокоэффективных аппаратов представляет для пищевой промышленности актуальную задачу.

Цель и задачи работы. Цель диссертации состояла в научном обосновании и разработке высокоинтенсивного процесса обжарки ядер подсолнечника и кунжута в кипящем слое и его аппаратурном оформлении.

Для решения проблемы интенсификации процесса необходимо было провести комплекс работ, направленных на решение следующих задач.

1. Разработка и создание экспериментального стенда для изучения гидродинамических, тепло- и массообменных параметров процесса.

2. Изучение влияния начальной влажности ядер на основные гидродинамические характеристики и структуру псевдооживленного слоя.

3. Экспериментальное исследование кинетики влаго- и теплообмена в процессе.

4. Изучение влияния основных параметров процесса на показатели качества обжаренных ядер.

5. Разработка устройства для обжарки и охлаждения ядер в кипящем слое в непрерывном режиме.

№ 15757

Одесский технологический
институт пищевой промышленности
и питания им. А. М. Горького
БИБЛИОТЕКА

Научная новизна. Показана возможность использования кипящего слоя для обжарки высоковлажных ядер подсолнечника и кунжута. Исследовано влияние начальной влажности на величину критической скорости псевдоожижения. Получены эмпирические зависимости для расчета продолжительности обработки, температуры и теплового потока, воспринимаемого ядрами, и следовательно, создана основа для расчета аппаратов с кипящим слоем для обжарки и охлаждения ядер.

Практическая ценность. Предложен способ обжарки и охлаждения высоковлажных ядер, обеспечивающий интенсификацию процесса. Определены рациональные режимы процесса. Рассчитана опытно-промышленная установка непрерывного действия, первый образец которой изготовлен и испытан на Дружковской пищевкусовой фабрике. Экономический эффект от внедрения одной установки составил 9980 рублей.

Апробация работы. Основные положения диссертации были доложены и обсуждались на Всесоюзной научной конференции "Электрофизические методы обработки пищевых продуктов" (Воронеж, 1977 г.); Республиканском научно-техническом совещании "Разработка и внедрение высокоинтенсивных сушильных установок" (Симферополь, 1978 г.); Республиканской научной конференции "Интенсификация и совершенствование технологических процессов на предприятиях общественного питания" (Харьков, 1979 г.); Всесоюзной научно-технической конференции "Дальнейшее совершенствование теории, технологии и техники сушки" (Чернигов, 1981 г.); на вузовских научных конференциях.

На защиту выносятся. Теоретическое обоснование замены малоинтенсивного способа обжарки ядер в огневых жаровнях периодического действия интенсивным способом термической обработки их в кипящем слое, совмещающим последовательные процессы обжарки и охлаждения ядер в непрерывном потоке. Расчетные зависимости для определения основных гидродинамических, влаго- и теплообменных параметров, необходимые для расчета процесса и разработки рациональных конструкций аппаратов для обжарки и охлаждения ядер подсолнечника и кунжута.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, списка литературы и приложений. Работа изложена на 177 страницах машинописного текста, содержит 49 рисунков, 14 таблиц. Библиография включает 116 наименований работ отечественных и зарубежных авторов.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Состояние вопроса. Перспективы ускоренного развития пищевых производств требуют внедрения высокоинтенсивных способов термической обработки.

В СССР и за рубежом в различных отраслях промышленности, в том числе и пищевой, широко используется метод кипящего слоя, позволяющий значительно интенсифицировать тепло- и массообменные процессы и сократить продолжительность обработки продуктов.

Сравнительный анализ литературных данных по различным способам сушки, обжарки и охлаждения сыпучих полидисперсных материалов показал преимущества применения кипящего слоя при организации термической обработки ядер подсолнечника и кунжута в поточной линии производства халвы.

Наиболее обширные работы по исследованию гидродинамики и кинетики обжарки ядер кунжута в условиях кипящего слоя выполнены Рысиным А.П., Мачихиным С.А., Данилевым А.Ф., но в них отсутствуют пригодные для инженерной практики расчетные зависимости, недостаточно изучено влияние влажности ядер на критическую скорость псевдооживления, ограничены сведения о влиянии режимных параметров на процесс.

Исследования по гидродинамике и кинетике обжарки ядер подсолнечника практически отсутствуют. Известные работы в этом направлении, например, Копейковского В.М., Предтеченского В.К., Кириевского Б.Н., Костенко В.К. и др., в основном посвящены вопросам сушки семян подсолнечника, выполнены при снижении влажности их до 7%, а потому переносить эти данные на процесс обжарки ядер нет оснований. В целом анализируемые работы не могут претендовать на полноту решения проблемы.

Изменение физико-химических показателей ядер в процессе их обжарки во многом определяет качество готового продукта. Однако в литературе содержится недостаточно сведений по данному вопросу, а имеющиеся данные часто носят противоречивый характер.

Отсутствие достаточного количества сведений по гидродинамическим свойствам и кинетическим закономерностям термической обработки ядер затрудняет применение ранее накопленного материала, сдерживает применение этого прогрессивного метода в технологических схемах производства халвы и требует постановки дополнительных исследований.

Экспериментальные исследования гидродинамики кипящего слоя ядер

Объектом исследований были заводские смеси ядер подсолнечника, выращенного в Донецкой области, и ядра желто-коричневосемянного кунжута (ТУ-18 УССР 409-75; РСТ УССР 1826-78). Смесь ядер подсолнечника делится на две фракции различного гранулометрического состава. Для определения среднего диаметра частиц проведен си-

товый анализ.

Для проведения исследований создана экспериментальная установка и разработана методика. Установка включает в себя прозрачную рабочую камеру, нагнетательный вентилятор, электрокалорифер, трубопроводы с задвижками и необходимыми приборами. Прозрачная камера позволяла исследовать гидродинамическую структуру псевдооживленного слоя высоковлажных ядер.

Определяли критическую скорость псевдооживления $W_{кр}$, гидродинамическое сопротивление слоя Δp и унос различных фракций ядер из аппарата, исследовали влияние начальной влажности W_0^c ядер на $W_{кр}$ и гидродинамическую структуру слоя. Для выявления количественной зависимости между минимальной скоростью псевдооживления, влажностью ядер и удельной нагрузкой G/F применено математическое планирование полного факторного эксперимента. Скорость $W_{кр}$ находили по кривым обратного хода. В качестве примера на рис. I представлены опытные кривые псевдооживления для ядер подоолнечника $d_0 = 3,9 \cdot 10^{-3}$ м.

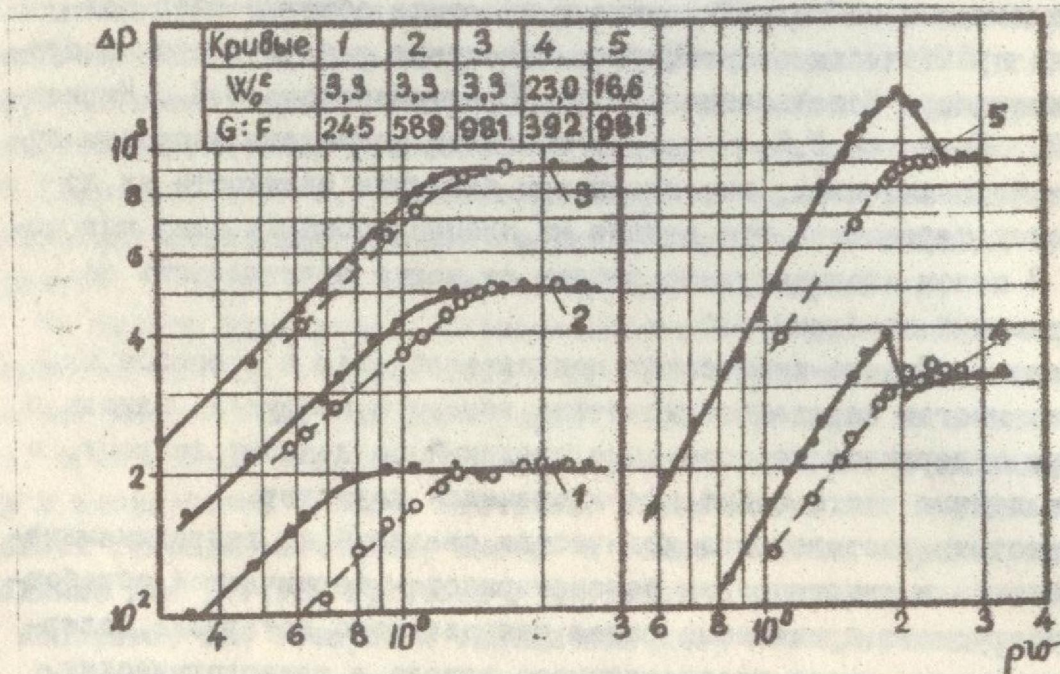


Рис. I. Кривые псевдооживления ядер подоолнечника $d_0 = 3,9 \cdot 10^{-3}$ м

Как видно из рисунка, на кривых псевдооживления прямого хода, соответствующих влажным ядрам, характерный для воздушносухих ядер прямолинейный горизонтальный участок заметно сокращен, что указывает на уменьшение диапазона существования псевдооживленного слоя с ростом влажности. Момент перехода слоя из неподвижного в псевдооживленное состояние характеризуется пиком на кривой.

Наличие пика может быть объяснено проявлением поверхностных сил сцепления между частицами. Падение сопротивления в момент пе-

рехода слоя из неподвижного состояния в псевдоожиженное соответствует образование каналов в слое, через которые прорывается часть воздуха.

Установлено, что при некотором значении начальной влажности ядра быстро слеживаются и перевод их во взвешенное состояние без дополнительных мероприятий становится невозможным. Определены предельные значения начальной влажности, соответствующие устойчивому кипению слоя: для ядер подсолнечника $d_0 = 1,8 \cdot 10^{-3}$ м - 27%; для ядер $d_0 = 3,9 \cdot 10^{-3}$ м - 30%; для ядер кунжута - 33%.

Реализация полного факторного эксперимента позволила получить уравнения регрессии, адекватно описывающие результаты опытов:

$$pW_{кр} = b + b_1 G/F + b_2 W_0^c \quad (1)$$

где $pW_{кр}$ - массовая критическая скорость;

b, b_1, b_2 - эмпирические коэффициенты (табл. I).

Уравнение свидетельствует о преобладающем влиянии начальной влажности на $W_{кр}$.

Обработка экспериментальных данных в логарифмической системе координат $Re_{кр} / (W_0^c)^n$ и Ar показала, что при $70 < Re < 600$ опытные точки удовлетворительно укладываются на прямую, которая описывается критериальным уравнением:

$$Re_{кр} = C \cdot Ar^k (W_0^c)^l \quad (2)$$

где C - коэффициент, зависящий от гранулометрического состава ядер (табл. I);

Ar - критерий Архимеда;

k, l - показатели степени (табл. I).

Таблица I

Продукт	Опытные коэффициенты к уравнениям (1) и (2)					
	b	b_1	b_2	C	k	l
Ядра подсолнечника						
$d_0 = 1,8 \cdot 10^{-3}$ м	1,304	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$263,4 \cdot 10^{-4}$	1,1	0,34	0,25
$d_0 = 3,9 \cdot 10^{-3}$ м	1,13	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$348,0 \cdot 10^{-4}$	1,45	0,34	0,25
Ядра кунжута	0,74	$0,764 \cdot 10^{-4}$	$146,1 \cdot 10^{-4}$	1,0	0,34	0,28

Уравнения (1) и (2) дают относительную ошибку по сравнению с опытными данными, не превышающую 8,8%. Результаты исследований влияния влажности на $W_{кр}$ можно использовать для интенсификации процесса обжаривания. Если слой в начале процесса продувать с максимальным значением числа псевдоожижения ($N_{ж} = 2+3$), а в конце процесса - при скоростях, близких к критическому значению, в аппарат можно ввести максимально возможное количество теплоносителя и, тем

оамым, добиться максимально возможной интенсификации процесса при минимальных энергетических затратах.

Теоретически гидравлическое сопротивление слоя должно быть равно массе ядер, приходящейся на единицу площади решетки. Однако в опытах оно в той или иной степени отклонялось от теоретического. Особенно заметные отклонения наблюдали при небольших нагрузках $245,392 \text{ Н/м}^2$, что объяснялось недостаточно полным псевдоожигением ядер в слое, каналообразованием и другими отклонениями от нормального кипения. При нагрузках 1180 Н/м^2 и более слой характеризовался первыми признаками поршнеобразования. Наиболее качественное псевдоожигение наблюдали при нагрузках близких к 1000 Н/м^2 .

Выбор удельной нагрузки на воздухораспределительную решетку, при которой поддерживается устойчивое псевдоожигение слоя, позволил определить минимально допустимые энергозатраты и сделать обоснованный выбор вентилятора.

Анализ экспериментальных данных показал, что на величину соотношения между Δp и G/F изменение $W_{кр}$, G/F , размеров и формы частиц существенного влияния не оказывают. В различных опытах отношение $\Delta p: G/F$ лежало в довольно узких пределах $- 0,86 \pm 0,96$. Математическая обработка экспериментальных данных для удельных нагрузок 588 Н/м^2 и более позволила получить зависимость

$$\Delta p = 0,93 \cdot G/F, \quad (3)$$

погрешность которой не превышает 7,4%.

Поскольку от структуры слоя зависит характер протекания тепло- и массообменных процессов между частицами и теплоносителем, важно исследовать влияние влажности и высоты слоя на структуру слоя. Критерием для оценки равномерности псевдоожигения был гидростатический к.п.д. слоя $R = \Delta p / \rho_0 g h_0$.

Опыты показали, что увеличение высоты слоя ведет к улучшению равномерности. Напротив, равномерность псевдоожигения ухудшалась с ростом начальной влажности.

Изучены некоторые закономерности уноса твердой фазы из полидисперсного слоя. На основании анализа физической модели уноса установлено, что определяющим фактором процесса является концентрация частиц C в слое, скорость витания которых ниже скорости огибающего агента. Результаты опытных данных обработаны в критериальном виде:

$$G_{ун} = 0,48 (Fr (\rho/\rho_0) C)^{0,72}, \quad (4)$$

где $G_{ун}$ - вес вынесенных частиц на кг материала;

Fr - критерий Фруда.

Исследования некоторых гидродинамических характеристик слоя ядер показали, что наиболее благоприятные условия для интенсификации тепло- и массообменных процессов создавались при удельных нагрузках $1000-1180 \text{ Н/м}^2$, обеспечивающих наиболее равномерное псевдоожигание. Устойчивое кипение наблюдали уже при числе псевдоожигания $N_w = 1,5$. Унос материала из слоя при этом не превышал 5%.

Основные закономерности кинетики термообработки ядер подсолнечника и кунжута

Основными факторами, определяющими процесс обжарки, являются температура t и массовая скорость pw теплоносителя, удельная нагрузка G/F и начальная влажность W_0^c ядер. Для выбора наиболее рационального режима обработки ядер изучено влияние каждого из перечисленных факторов на процесс. При исследованиях параметры процесса изменяли в диапазоне: $t=60-143^\circ\text{C}$; $pw=1,65-3,15 \text{ кг/(м}^2\cdot\text{с)}$; $G/F=455-1200 \text{ Н/м}^2$; $W_0^c=5,1-56,9\%$.

Верхний предел температуры теплоносителя (140°C) выбран на основе предварительных экспериментов. Было установлено, что при выбранном режиме псевдоожигания и заданных численных значениях начальной и конечной влажности ядер увеличение температуры теплоносителя свыше 140°C приводит к сильному потемнению продукта, что недопустимо с точки зрения технических условий на производство обжаренных ядер. Изучение процесса обжарки ядер в кипящем слое производили путем рассмотрения кривых обжарки и скорости обжарки, выявляя при этом особенности процесса.

На рис. 2 - 5 показаны кривые сушки ядер подсолнечника $d_3 = 3,9 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Из полученных данных следует, что изменение режимных параметров влияет лишь на интенсивность обезвоживания ядер, характер же кривых остается идентичным. На кривых обнаруживаются два периода, разделенные критическим значением влажности $W_{кр} \approx 12\%$.

При обжарке ядер подсолнечника и кунжута второй период является определяющим и занимает 65-80% общей продолжительности процесса. Температура теплоносителя оказывает решающее влияние на длительность обработки и качество продукта. Влияние температуры сказывается на всем протяжении процесса, но особенно сильно - в первый период. С ростом начальной влажности ядер влияние других параметров на процесс сказывается более резко.

Анализ режимных параметров показал, что при температуре теплоносителя 100°C для достижения влажности 1,3% требовалось длительное воздействие теплоносителя на ядра, так как величина равновесной влажности при данных условиях равна приблизительно конечной влажности.

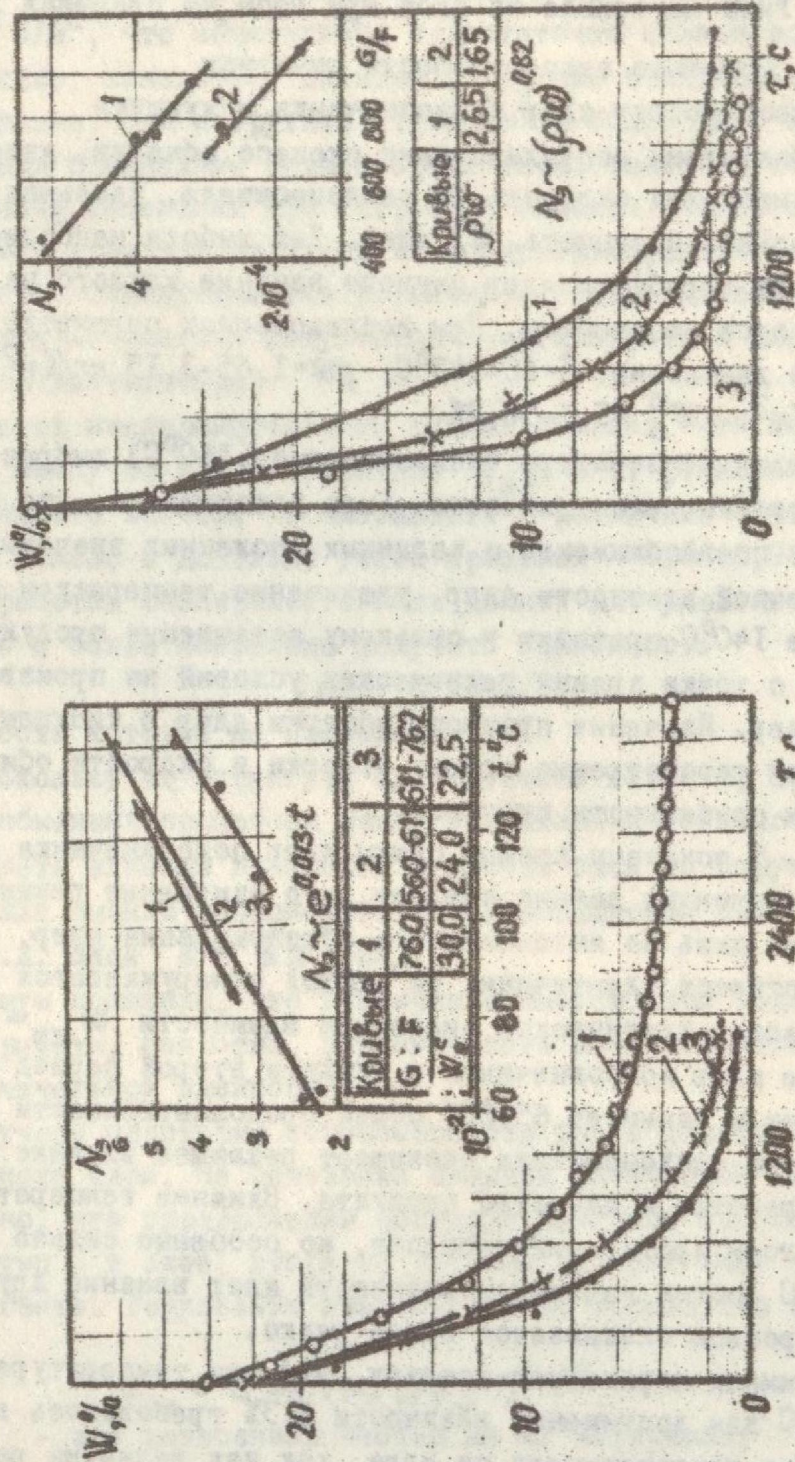


Рис. 2. Зависимость скорости сушки ядер подсолнечника $\alpha, = 3,9 \cdot 10^{-3}$ м от температуры теплоносителя $G/F = 611 \text{ H/m}^2$; $\rho w = 2,91 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$;
1 - $t = 610^\circ \text{C}$; $G/F = 611 \text{ H/m}^2$; $\rho w = 1,8 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$;
2 - $t = 111^\circ \text{C}$; $G/F = 762 \text{ H/m}^2$; $\rho w = 1,65 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$;
3 - $t = 140^\circ \text{C}$; $G/F = 762 \text{ H/m}^2$; $\rho w = 1,65 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$;

Рис. 3. Зависимость скорости сушки ядер подсолнечника $\alpha, = 3,9 \cdot 10^{-3}$ м от удельной нагрузки при $t = 1020^\circ \text{C}$; $\rho w = 2,81 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$;
1 - $G/F = 1163 \text{ H/m}^2$;
2 - $G/F = 750 \text{ H/m}^2$;
3 - $G/F = 494 \text{ H/m}^2$;

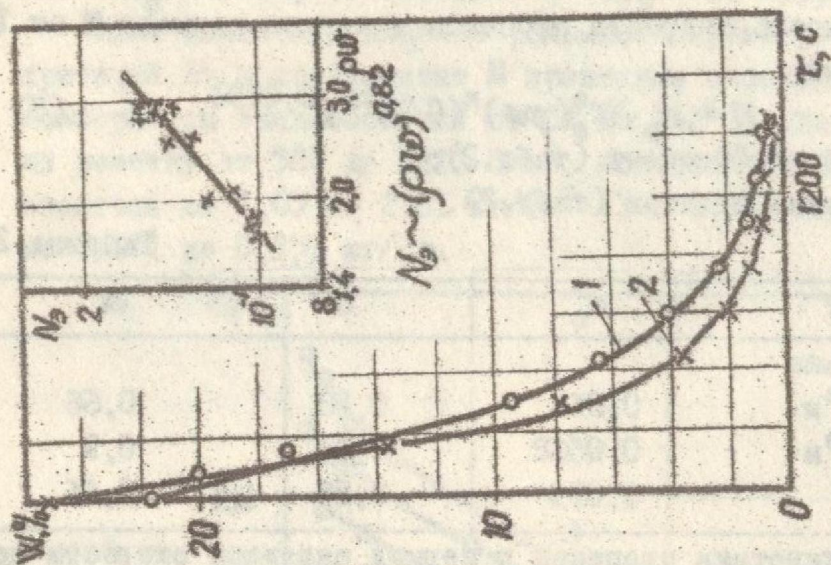


Рис. 5. Зависимость скорости сушки ядер подсолнечника $\alpha_d = 3,9 \cdot 10^{-3}$ м от массовой скорости воздуха при $t = 140^\circ\text{C}$;
 $\frac{G}{F} = 771 \text{ Н/м}^2$;
 1 - $\rho\omega = 1,65 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$;
 2 - $\rho\omega = 2,53 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$;

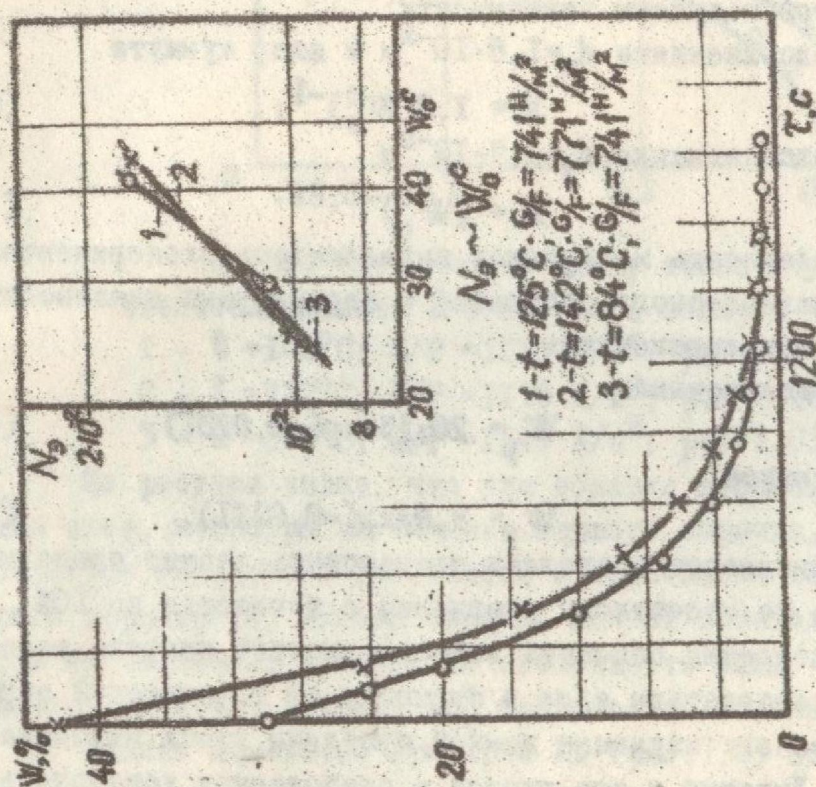


Рис. 4. Зависимость скорости сушки ядер подсолнечника $\alpha_d = 3,9 \cdot 10^{-3}$ м от начальной влажности при $\rho\omega = 2,81 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$.
 $t = 125^\circ\text{C}$ и $\frac{G}{F} = 737-759 \text{ Н/м}^2$

С целью максимальной интенсификации процесса его следует вести при температурах теплоносителя 120–140°C.

Дальнейшая графо-аналитическая обработка данных дала возможность найти зависимость скорости процесса в первом периоде N от t , $p\omega$, C/P и W_0^c в виде:

$$N = a_0 \cdot W_0^c (p\omega)^n (C/P)^m e^{0,013t}, \quad (5)$$

где a_0 – опытный коэффициент (табл.2);

n, m – показатели степени (табл.2).

Таблица 2

Продукт	a_0	n	m
Ядра подсолнечника			
$d_s = 1,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}$	0,014	0,88	0,66
$d_s = 3,9 \cdot 10^{-3} \text{ м}$	0,0668	0,82	0,9
Ядра кунжута	0,015	0,88	0,66

Для описания кинетики процесса в период падающей скорости использовали метод А.В.Лыкова. Построением кривых сушки в полулогарифмических координатах определяли коэффициент сушки и рассчитывали относительный коэффициент сушки K . Обработкой данных методом наименьших квадратов получены зависимости:

– для ядер подсолнечника $d_s = 1,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ и ядер кунжута

$$K = 1,8(W_0^c)^{-1}; \quad (6)$$

– для ядер подсолнечника $d_s = 3,9 \cdot 10^{-3} \text{ м}$

$$K = (W_0^c)^{-0,86}. \quad (7)$$

Равновесная влажность материалов определялась экспериментально по достижении равновесного состояния с параметрами теплоносителя и аппроксимирована выражениями:

– для ядер подсолнечника

$$W_p = 20,15 \exp(-0,028t); \quad (8)$$

– для ядер кунжута

$$W_p = 9,8 \exp(-0,022t). \quad (9)$$

Найденные зависимости позволяют производить расчет продолжительности процесса по известному уравнению с точностью до 10%.

С целью установления основных закономерностей нагрева исследовали изменение температуры ядер в процессе их термической обработки (рис.6). В основу изучения данной проблемы взята методика, разработанная А.В.Лыковым и его школой и позволяющая установить связь между интенсивностью теплообмена и влагообмена с помощью критерия Ребиндера. Графическим дифференцированием кривых θ - t определяли величины относительного температурного коэффициента

$$B = \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial \bar{u}} \cdot \frac{\Delta \bar{u}}{\Delta T} \quad (10)$$

где в качестве постоянных параметров $\Delta \bar{u}$ и ΔT приняты: $\Delta T = T$; $\Delta \bar{u} = \bar{u}_0$ - в первом периоде и $\bar{u}_{кр}$ - во втором периоде.

Для выявления влияния режимных параметров процесса обжарки на критерий B и коэффициент B проведены эксперименты при изменении температуры теплоносителя от 63 до 142°C, удельной нагрузки ядер на решетку от 581 до 1216 Н/м², массовой скорости движения теплоносителя от 1,03 до 2,81 кг/(м²·с) и начального влагосодержания от 0,171 до 0,339 кг/кг.

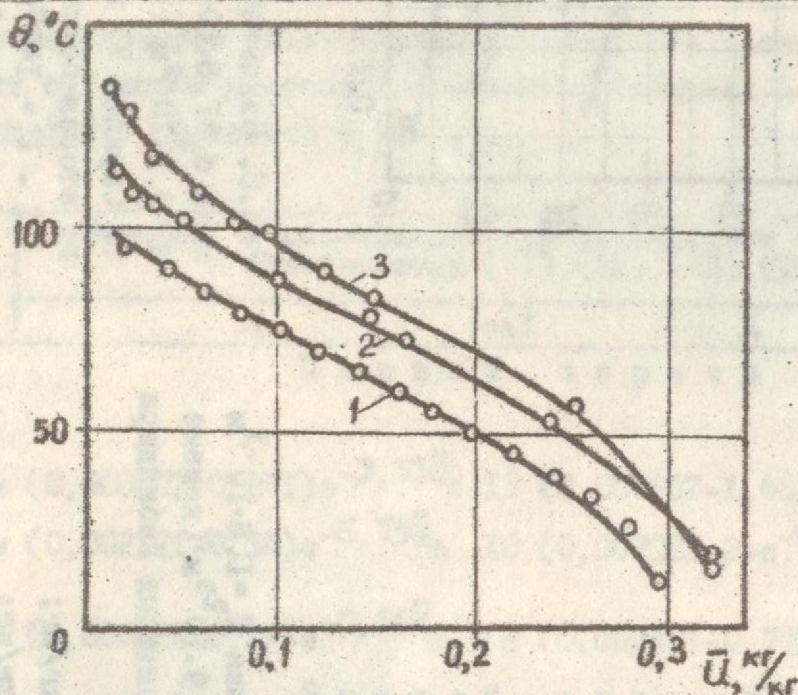


Рис. 6. Зависимость между температурой $\bar{\theta}$ и влагосодержанием $\bar{u}$ в процессе обжарки ядер кунжута:

1 - $t = 100^\circ\text{C}$; $G/F = 1216 \text{ Н/м}^2$; $\rho w = 1,27 \text{ кг/(м}^2\cdot\text{с)}$.

2 - $t = 122^\circ\text{C}$; $G/F = 1170 \text{ Н/м}^2$; $\rho w = 1,20 \text{ кг/(м}^2\cdot\text{с)}$.

3 - $t = 140^\circ\text{C}$; $G/F = 1149 \text{ Н/м}^2$; $\rho w = 1,03 \text{ кг/(м}^2\cdot\text{с)}$.

Из рисунка видно, что при обжарке высоковлажных ядер в кипящем слое, несмотря на наличие первого периода, среднеобъемная температура непрерывно повышается и становится выше температуры мокрого термометра. Анализ опытных данных показал, что величины G/F , ρw не оказывают влияния на зависимость между $\bar{\theta}$ и $\bar{u}$ на протяжении всего процесса. Влияние W_0^c сказывается только в первом периоде.

Анализ изменений критерия B (рис. 7, 8) показал, что в начале и конце процесса значения его велики. Большие значения B в начале процесса объясняются необходимостью интенсивного прогрева материала для удаления свободной влаги в нем. В конце процесса в ядрах

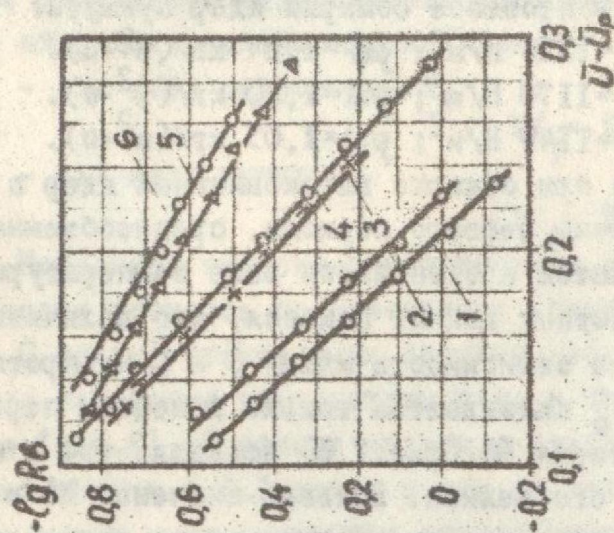


Рис.7. Влияние t и $\bar{U}_0$ ядер подсолнечника $d_3 = 1,8 \cdot 10^{-3}$ м (кривые 1,2), ядер подсолнечника $d_3 = 3,9 \cdot 10^{-3}$ м (кривые 3,4) и ядер кунжута (кривые 5,6) на критерий Ребиндера в первом периоде процесса:

- 1 - $t = 140^\circ\text{C}$; $\bar{U}_0 = 0,256$ кг/кг;
- 2 - $t = 120^\circ\text{C}$; $\bar{U}_0 = 0,250$ кг/кг;
- 3 - $t = 102^\circ\text{C}$; $\bar{U}_0 = 0,269$ кг/кг;
- 4 - $t = 141^\circ\text{C}$; $\bar{U}_0 = 0,314$ кг/кг;
- 5 - $t = 122^\circ\text{C}$; $\bar{U}_0 = 0,325$ кг/кг;
- 6 - $t = 100^\circ\text{C}$; $\bar{U}_0 = 0,293$ кг/кг.

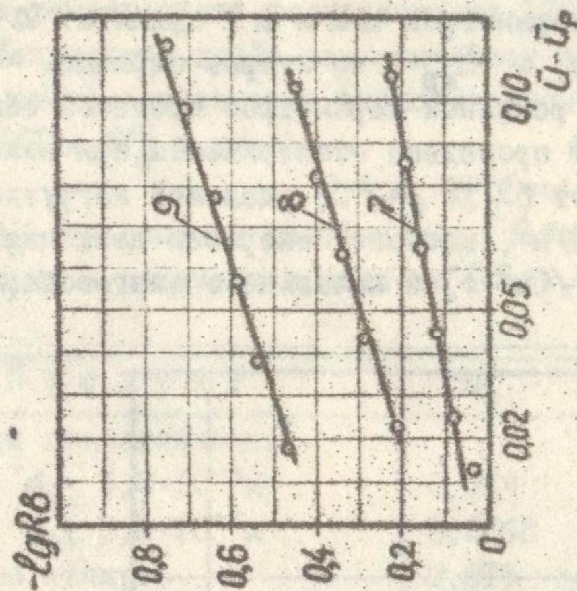


Рис.8. Влияние t и $\bar{U}_0$ ядер подсолнечника $d_3 = 1,8 \cdot 10^{-3}$ м (кривая 9), ядер $d_3 = 3,9 \cdot 10^{-3}$ м (кривая 8) и ядер кунжута (кривая 7) на критерий Ребиндера во втором периоде процесса:

- 7 - $t = 140^\circ\text{C}$; $\bar{U}_0 = 0,323$ кг/кг;
- 8 - $t = 123^\circ\text{C}$; $\bar{U}_0 = 0,328$ кг/кг;
- 9 - $t = 100^\circ\text{C}$; $\bar{U}_0 = 0,224$ кг/кг.

находится наиболее сильно энергетически связанная влага, для удаления которой также необходим сильный нагрев.

Обработкой данных получены зависимости:

- для первого периода

$$B_1 = \alpha_1 \exp(m(\bar{U} - \bar{U}_p)); \quad (II)$$

$$B_1 = A_1 \exp(n(\bar{U} - \bar{U}_p)); \quad (I2)$$

- для второго периода

$$B_2 = \alpha_2 \exp(-m(\bar{U} - \bar{U}_p)); \quad (I3)$$

$$B_2 = A_2 \exp(-n(\bar{U} - \bar{U}_p)). \quad (I4)$$

Анализ результатов исследований показал, что постоянные m и n не зависят от режима процесса. Значения постоянных и зависимости для их определения приведены в табл.3.

Таблица 3

Продукт	Значения и соотношения для определения постоянных в зависимостях (I1), (I2), (I3), (I4)			
	α	m	A	n
Первый период				
Ядра под-солнечника				
$d_s = 1,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}$	$(0,00087T - 0,241)e^{-3,53\bar{U}}$	I3	$(0,00466T - 1,46)e^{-7,46\bar{U}}$	I2,8
$d_s = 3,9 \cdot 10^{-3} \text{ м}$	$(0,00212T - 0,54)e^{-6,75\bar{U}}$	I0	$(0,00708T - 2)e^{-9,88\bar{U}}$	I0,6
Ядра кунжута	$(0,00068T - 0,19)e^{-0,56\bar{U}}$	6	$(0,00248T - 0,77)e^{-3,65\bar{U}}$	6,8
Второй период				
Ядра под-солнечника				
$d_s = 1,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}$	$0,00275T - 0,83$	8	$0,0115T - 3,92$	7
$d_s = 3,9 \cdot 10^{-3} \text{ м}$	$0,00286T - 0,816$	8	$0,0087T - 2,71$	6,6
Ядра кунжута	$0,002T - 0,45$	5	$0,0097T - 3,11$	3,7

Зависимости (II)-(I4) позволяют рассчитать температуру и интенсивность потока тепла в любой момент процесса.

Эксперименты по охлаждению ядер при различной гидродинамической обстановке в слое показали высокую эффективность применения для этих целей кипящего слоя. Заметное влияние на процесс охлаждения оказывают скорость воздуха и удельная нагрузка на решетку. Установлено, что наибольшие производительность и удельное тепловое напряжение достигаются при скоростях воздуха около 3 м/с. В этом случае процесс завершается через 120-130 с.

Характер изменения кислотного, перекисного и йодного чисел показал практическую неизменность липидного состава ядер при обработке их теплоносителем 120°C . Качество обжаренных ядер соответствовало действующим техническим условиям.

Как отмечено ранее, наиболее благоприятная гидродинамическая обстановка в слое создается при $G/F = 1000 + 1180 \text{ Н/м}^2$ и $rw = 1,5rw_{кр}$, а максимальная интенсификация процесса обжарки обеспечивается при температурах теплоносителя $t = 120 - 140^{\circ}\text{C}$. С учетом изменений показателей качества ядер рекомендованы следующие рациональные режимы обработки: $t = 120^{\circ}\text{C}$; $G/F = 1000-1180 \text{ Н/м}^2$; $rw = 1,5rw_{кр}$.

Практическое применение результатов экспериментальных исследований процесса

термообработки ядер подсолнечника и кунжута в кипящем слое

С использованием найденных расчетных зависимостей разработан опытно-промышленный образец установки непрерывного действия для термообработки ядер в кипящем слое производительностью 1500 кг/час по готовому продукту. Установка позволяет последовательно проводить в ее рабочей камере процессы сушки, жарки и охлаждения ядер.

Рабочая камера выполнена с соотношением сторон газораспределительной решетки 10:1. Такая конструкция позволяет обеспечить максимальное приближение аппарата к схеме полного вытеснения по материалу и добиться высокой равномерности обработки ядер по влажности.

Результаты испытаний опытно-промышленной установки на Дружковской пищевкусовой фабрике подтвердили результаты исследований и дают основание считать конструкцию работоспособной. Основные технико-экономические показатели установки сопоставлены с показателями огневых жаровен, находящихся в эксплуатации на предприятии. Годовой экономический эффект от внедрения предложенной установки составляет 9980 рублей.

В ы в о д ы

1. На основании анализа литературных источников и сопоставления технико-экономических показателей аппаратов термической подготовки ядер подсолнечника и кунжута к производству халвы установлено, что необходимость проведения исследований по изысканию новых высокоинтенсивных методов и режимов обработки. Показано, что наиболее перспективным, из числа применяемых в настоящее время, является метод обработки ядер в кипящем слое.

2. Изучены гидродинамические характеристики кипящего слоя высоковлажных ядер подсолнечника и кунжута. Получены уравнения (I) и

(2) для оценки влияния начальной влажности ядер на критическую скорость псевдоожижения.

3. Исследовано влияние начальной влажности и высоты кипящего слоя на гидродинамическую структуру слоя. Установлены максимально допустимые значения начальной влажности ядер, при которых обеспечивается устойчивое псевдоожижение, а также величина отношения между удельной нагрузкой на решетку и гидравлическим сопротивлением слоя.

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

5. Выявлены характерные особенности процесса обжарки ядер подсолнечника и кунжута в условиях кипящего слоя. Получены эмпирические уравнения (5)–(9) для расчета кинетики оушки и обжарки ядер в нестационарных условиях в зависимости от основных режимных параметров процесса. Определены рациональные режимы обработки.

6. Установлен характер изменения температуры ядер в процессе термической обработки в кипящем слое. Получены уравнения (II) – (I4), позволяющие рассчитать температуру нагрева ядер и величину теплового потока.

7. Исследован процесс охлаждения ядер. Определены параметры, при которых достигается максимально возможная интенсификация процесса.

8. Выявлено, что термическая обработка ядер подсолнечника и кунжута при рациональных параметрах процесса не вызывает глубоких изменений в липидном составе ядер. Качество их соответствует действующим техническим условиям.

9. Доказано, что метод кипящего слоя в значительной мере интенсифицирует (в 2–3 раза) термическую обработку высоковлажных ядер по сравнению с существующими аппаратами.

10. Произведен расчет и разработан опытно-промышленный образец однозонной установки непрерывного действия с направленным кипящим слоем для термической обработки ядер подсолнечника и кунжута. Образец испытан в производственных условиях Дружковской пищевкусовой фабрики. Годовой экономический эффект от внедрения ее по сравнению с огневыми жаровнями периодического действия составил 9980 рублей.

Основные положения диссертационной работы изложены в следующих публикациях:

1. Жидко В.И., Ковалев В.С., Гаврилов В.Я. Использование метода кипящего слоя в термических процессах халвичного производства //Тезисы докладов /Республик. научн.-технич. совещание "Разработ-

в. 6 15757

Одесский технологический институт пищевой промышленности им.

БИБЛИОТЕКА

ка и внедрение высокоэффективных сушильных установок". - Киев. - 1978. - с.15.

2. Жидко В.И., Ковалев В.С., Гаврилов В.Я. Влияние термообработки на качественные показатели ядер подсолнечника и кунжута //Тезисы докладов /Республ. научн. конференция "Интенсификация и совершенствование технологических процессов на предприятиях общественного питания". - Харьков. - 1979. - с.38.

3. Жидко В.И.; Ковалев В.С., Гаврилов В.Я. Сушка ядер подсолнечника и кунжута в кипящем слое //Тезисы докладов /Военная научно-технич. конференция "Дальнейшее совершенствование теории, техники и технологии сушки". - М. - 1981. - с.76-78.

4. Жидко В.И., Ковалев В.С., Гаврилов В.Я. Гидродинамика и кинетика сушки ядер кунжута и подсолнечника в псевдоожиженном слое //Изв. вузов. Пищевая технология. - 1982. - №2. - с.87-89.

В.Я. Гаврилов