

1 29
ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

ЛАФИ ХОРИ ЭЛЬ-ДИАБ

УДК 664.127:66.047.3.002.5

РАЗРАБОТКА ПОВЕРХНОСТНОГО АППАРАТА ДЛЯ
ТЕРМООБРАБОТКИ САХАРА-ПЕСКА В ДВИЖУЩЕМСЯ
ПЛОТНОМ СЛОЕ

Специальность 05.18.12 – процессы и
аппараты пищевых производств

Переучет 1987

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

Одесса- 1984

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

Научный руководитель: доктор технических наук,
профессор ГРИШИН М.А.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор БУЛЯНДРА А.Ф.;
кандидат технических наук,
доцент ТИТАРЬ С.С.

Ведущая организация: Одесское производственное объедине-
ние сахарной промышленности

Защита диссертации состоится "6" апреля 1984 г.
в 10³⁰ часов на заседании специализированного совета
Д 068.35.01 при Одесском технологическом институте пищевой
промышленности им. М.В. Ломоносова, 270039, г. Одесса,
ул. Свердлова, 112.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Одесского
технологического института пищевой промышленности им. М.В. Ло-
моносова.

Автореферат разослан "28" февраля 1984 г.

Ученый секретарь

специализированного совета


А.Ф. Загибалов

ОНАХТ

26.06.12

Разработка поверхнос



v014580

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Значительное увеличение объемов производства, высокие требования, предъявляемые к качеству, обуславливают необходимость совершенствования технологического процесса производства сахара-песка. Особенно это относится к применяемому в настоящее время процессу обезвоживания сахара-песка, осуществляемому, в основном, в барабанных, турбинных сушилках, а также сушилках с псевдоожиженным слоем. Однако, такие сушилки не обеспечивают высокой тепловой эффективности, энергоемки, отличаются значительными габаритами, не исключают возможности уноса продукта и его загрязнения как теплоносителем, так и сошлифованным материалом стенок корпуса барабана. Последнее особенно важно, так как приводит к ухудшению качества продукта. В связи с этим возникает необходимость изыскания новых, более эффективных методов сушки и разработки высокопроизводительных экономичных установок.

В последние годы в различных отраслях промышленности для термической обработки сыпучих материалов все более распространение получают рекуперативные теплообменники с движущимся плотным слоем. Подобные устройства характеризуются рядом существенных достоинств: высокой теплотехнической эффективностью, непрерывностью процесса, компактностью, возможностью автоматизации и регулировки при изменении входных параметров материалов и практическим отсутствием уноса и комкообразования. Немалый интерес составляет и организация процесса обезвоживания сахара-песка в трубчатых поверхностных аппаратах с виброгравитационным плотным слоем. Однако, применение таких аппаратов для сушки сахара-песка и аналогичных кристаллических дисперсных материалов, склонных к комкованию, сдерживается недостаточной изученностью процесса тепломассопереноса в движущемся плотном слое. Поэтому настоя-

шая работа посвящена разработке поверхностного аппарата для обезвоживания сахара-песка в движущемся плотном слое.

Цель работы. Для создания наиболее эффективных и устойчиво работающих поверхностных аппаратов с плотным движущимся слоем сахара-песка, выпускающих продукт высокого качества при минимальных энергетических (тепловых, электрических) и капитальных (при достижении наибольшей компактности) затратах, следует изучить:

- степень подвижности сахара-песка как материала, склоняющегося к слипанию, определением его сдвиговых характеристик в зависимости от влажности;

- теплообмен гладких цилиндрических и ребристых (удобообтекаемых) поверхностей в поперечном плотном потоке сахара-песка при наложении вибрационных колебаний;

- динамику и кинетику взаимосвязанного тепломассопереноса при сушке сахара-песка в плотном слое с подводом тепла от греющей поверхности;

Результаты комплексных исследований использовать для разработки, создания и испытания полупромышленного поверхностного аппарата с плотным движущимся слоем сахара-песка и зональным отводом пара.

Основное научное положение, защищаемое автором. Теоретическое описание взаимосвязанного тепломассопереноса в плотном слое дисперсного материала на основе математической и физической модели может быть использовано при разработке поверхностных аппаратов для термообработки сахара-песка и аналогичных ему кристаллических материалов.

Научная новизна работы. Впервые исследован теплообмен слоя сахара-песка, движущегося плотным потоком, с поперечно омываемыми цилиндрическими и ребристыми поверхностями, а также сушка сахара-

песка в движущемся виброгравитационном плотном слое при подводе тепла от греющей поверхности; изучено влияние основных факторов и получены зависимости, описывающие указанные процессы в достаточно широком диапазоне изменения режимных и геометрических параметров.

Практическая ценность. Заключается в возможности использования результатов и рекомендуемых зависимостей при конструкторских и поверочных тепловых расчетах, выборе режимных и геометрических характеристик поверхностных аппаратов с движущимся плотным слоем для термообработки кристаллических дисперсных материалов.

Реализация работы. Результаты комплексных экспериментальных исследований использовались при разработке, испытаниях полупромышленного виброгравитационного аппарата для термообработки (обезвоживания) сахара-песка в лаборатории "Непродуваемые дисперсные системы" ОТИШ им. М.В. Ломоносова.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на 42, 43 отчетных научно-технических конференциях ОТИШ им. М.В. Ломоносова, Одесса, 1982, 1983 гг. и конференции молодых ученых МТИШ, Москва, 1982 г., а также на отчетных заседаниях кафедры ТИИМ ОТИШ им. М.В. Ломоносова с 1981 по 1983 гг.

Публикации. По теме диссертации опубликовано две работы, одна принята к печати, получено одно авторское свидетельство СССР.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложений, содержит 129 страниц основного текста, 29 рисунков, 9 таблиц, список использованной литературы (109 наименований).

Автор выражает искреннюю благодарность научному консультанту к.т.н., доценту В.В. Корнараки за помощь в постановке, проведении исследований и обобщении результатов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы и сформулирована цель настоящей работы.

В первой главе обобщаются вопросы термической обработки кристаллических дисперсных материалов в аппаратах с движущимся слоем, а также математическая и физическая модели тепломассопереноса в плотном движущемся слое. Приводятся технологические особенности термообработки термолабильных, комкующихся влажных дисперсных материалов и способы, применяемые для осуществления процесса сушки. Установлено, что виброгравитационное движение материала в аппаратах является одним из более эффективных способов сохранения качества продуктов в процессе термообработки. Выявлены основные характеристики аппаратов для термообработки кристаллических материалов, обоснована организация процесса термообработки этих материалов в поверхностных аппаратах с движущимся плотным слоем. Конкретизированы задачи исследования.

Во второй главе обоснован выбор и описаны экспериментальные установки для осуществления исследований в соответствии со сформулированными целями и задачами, изложены методики проведения опытов и обработки полученных данных с целью выявления основных характеристик и параметров, входящих в расчет поверхностных виброгравитационных аппаратов для термической обработки дисперсных кристаллических материалов в движущемся плотном слое.

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований, включающие:

I. Физико-механические характеристики сахара-песка в зависимости от влажности (коэффициентов внешнего и внутреннего трения), которые определялись на приборе с замкнутой поверхностью сдвига, а угол естественного откоса - на приборе Науменко при свободной насыпке материала. Определяющие величины изменялись в следующем диапазоне: нормальная нагрузка

$\sigma = (I + II) \cdot 10^3 \text{ Н/м}^2$, влажность $W = 0 + 4 \%$, температура $t = 20^\circ \text{C}$, кратность опытов составляла 7 + 10.

Установлено, что влага в материале в зависимости от ее количества определяет соотношение сил сцепления и жидкостного трения и является расклинивающим фактором.

Зависимости коэффициентов внутреннего и внешнего трения, а также угла естественного откоса сахара-песка от влажности имеют нелинейный характер и описываются уравнением

$$y = y_0 [a \pm (a - 1) \exp(-\beta W)], \quad (I)$$

где $a = \frac{y_{\text{нас}}}{y_0}$, $y_0, y_{\text{нас}}$ - одвиговые характеристики для сухого и влажного материалов, соответственно.

Значения коэффициентов y_0, a, β , входящих в уравнение (I), приведены в табл. I.

Таблица I

Значения величин y_0, a, β уравнения (I)

Величины	Коэффициенты трения		Угол естественного откоса
	внутренний	внешний	
y_0	0,97	0,60	44
a	- 0,67	0,70	1,9
β	95	100	100

2. Теплообмен цилиндрических поверхностей в поперечном потоке сахара-песка при наложении вибрации сводился к спредечению коэффициента теплообмена α методом регулярного режима, исходя из расчета темпа охлаждения калориметра m в потоке сухого и влажного сахара-песка. Основные геометрические и режимные характеристики менялись в следующих пределах: диаметр калориметра $D = 8$ и 15 мм, средний размер частиц $d = 0,8$ мм, влажность $W = 0-1 \%$, скорость слоя $U = (2-50) \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$;

ускорение вибрации $j = 10-70 \text{ м/с}^2$, частота вибрации $f = 10-40 \text{ Гц}$, амплитуда $A = 1,1-2,5 \text{ мм}$, скорость вибрации $v = j(2\pi f)^{-1} \text{ м/с}$. Максимально возможная ошибка определения α не превышает $\pm 15 \%$.

Характер изменения зависимости коэффициента теплообмена от скорости слоя $\alpha = f(v)$ сухого и влажного слоев для используемых цилиндров одинаков $\alpha \sim v^{0,28}$. Однако, с увеличением диаметра цилиндра интенсивность теплообмена падает. Интенсифицирующее воздействие вибрации на теплообмен обусловлено изменением характера омывания, приводящим к уменьшению застойной и отрывной зон, а также улучшением перемешивания материала у боковой поверхности. С увеличением параметров вибрации интенсивность теплообмена возрастает, причем влияние частоты и амплитуды проявляется в одинаковой мере и может быть учтено с помощью обобщенной величины - скорости вибрации. Действие колебаний примерно в одинаковой степени сказывается на сухом и влажном материале.

Результаты исследования свидетельствуют о том, что степень интенсификации теплообмена, вызванная вибрацией, зависит главным образом от ее относительной скорости.

Степень интенсификации теплообмена цилиндрических поверхностей в поперечном виброгравитационном потоке сухого и влажного сахара-песка при различных скоростях слоя материала, частотах и амплитудах колебаний, диаметрах цилиндров описывается формулой, полученной В.В. Корнараки для неорганических материалов (карбиды кремния и бора, электрокорунд, сварочные флюсы и др.):

$$\frac{Nu_g}{Nu} = 1 + 5,6 \cdot 10^{-2} \left(\frac{v_g}{v} \right)^{0,5 - 5,6 \cdot 10^{-4} \frac{D}{d}}, \quad (2)$$

справедливой с вероятной ошибкой $\pm 10 \%$ при $2 \leq \frac{v_g}{v} \leq 200$;

$9 \leq \frac{D}{d} \leq 20$; здесь Nu - число Нуссельта при отсутствии вибрации (либо при $v_g \leq 10^{-2} \text{ м/с}$).

Как видно из формулы (2), степень интенсификации в определенной мере зависит от симплекса $\frac{D}{d}$. Влияние влажности на степень интенсификации не обнаружено.

3. Теплообмен ребристой поверхности, выполненной в виде удобообтекаемого профиля в поперечном потоке сыпучего материала, проводился в стационарном режиме. При этом определялся средний коэффициент теплообмена α между поверхностью удобообтекаемого профиля и поперечным потоком сыпучего материала. Профиль образован несущей трубой и двумя прямыми встречно направленными ребрами. Ребра приварены к нижней части несущей трубы по касательной поверхности вдоль образующей и образуют канал, используемый для отвода пара в поверхностных сушильных аппаратах. Геометрические характеристики профиля: наружный диаметр несущей трубы $D = 20$ мм; эквивалентный диаметр $D_{\text{экв}} = 27$ мм; высота ребер $h = 20$ мм; длина $l = 265$ мм; толщина ребер $\delta = 2$ мм; угол наклона ребер к вертикали $\varphi = 30^\circ$; угол от кормовой точки и образующей основания $\psi = 25^\circ$. Теплообменная поверхность профиля $F_{\Sigma} = F_o + F_p$ состоит из поверхности несущей трубы, участвующей в процессе омывания слоя F_o , а также наружной поверхности ребер F_p . Режимные и геометрические характеристики сыпучих материалов, используемых при исследовании, приведены в табл. 2.

Средний коэффициент теплообмена α в основном зависит от размеров и конфигурации ребристой поверхности, характера и скорости ее омывания и рода дисперсного материала. Полученные после обработки результаты показывают, что характер изменения зависимости среднего коэффициента теплообмена от скорости слоя $\alpha = f(v)$ для всех используемых материалов одинаков $\alpha \sim v^{0.52}$. Математическая обработка позволила получить обобщенную зависимость, описывающую теплообмен между поверхностью

Таблица 2

Режимные и геометрические характеристики
сыпучих материалов

Материал	Средний размер, d , мм	Объемная плотность, ρ , кг/м ³	Скорость слоя, v , 10 ³ м/с	Эффективный коэффи- циент	
				теплопро- водности, $\lambda_{эф}$, Вт/(м.К)	темпера- туропро- водности, $a_{эф}$, 10 ⁶ м ² /с
Сахар-песок	0,80	930	1,9-8,3	0,16	0,21
Речной песок	0,52	1600	1,5-6,3	0,20	0,15
Карбид крем- ния зеленый	0,10	1500	2,3-7,2	0,21	0,16

удобообтскаемого профиля и плотным слоем дисперсного материала
(рис. 1):

$$Nu = C Pe^{0,32} \left(\frac{D_{эжв}}{d} \right)^m, \quad (3)$$

где $C = 0,52$; $m = 0,40$ - для сахара-песка и речного песка;
 $C = 0,34$; $m = 0,28$ - для порошка карбида кремния.

Формула (3) справедлива со среднеквадратичной погрешностью
 $\pm 15\%$ при $200 \leq Pe \leq 2000$; $34 \leq \frac{D_{эжв}}{d} \leq 270$. Определяющими вели-
чинами являются диаметр профиля $D_{эжв} = \frac{4f}{\rho}$,

(f - площадь поперечного сечения профиля, ρ - периметр про-
филя), температура и скорость набегающего потока материала, а
также теплофизические характеристики материалов - эффективные
коэффициенты температуро- и теплопроводности, приведенные в таб-
лице выше.

4. Тепломассоперенос в плотном слое в процессе сушки.

Целью исследования явилось установление основных закономернос-
тей процесса сушки сахара-песка в плотном слое, выявление влияния

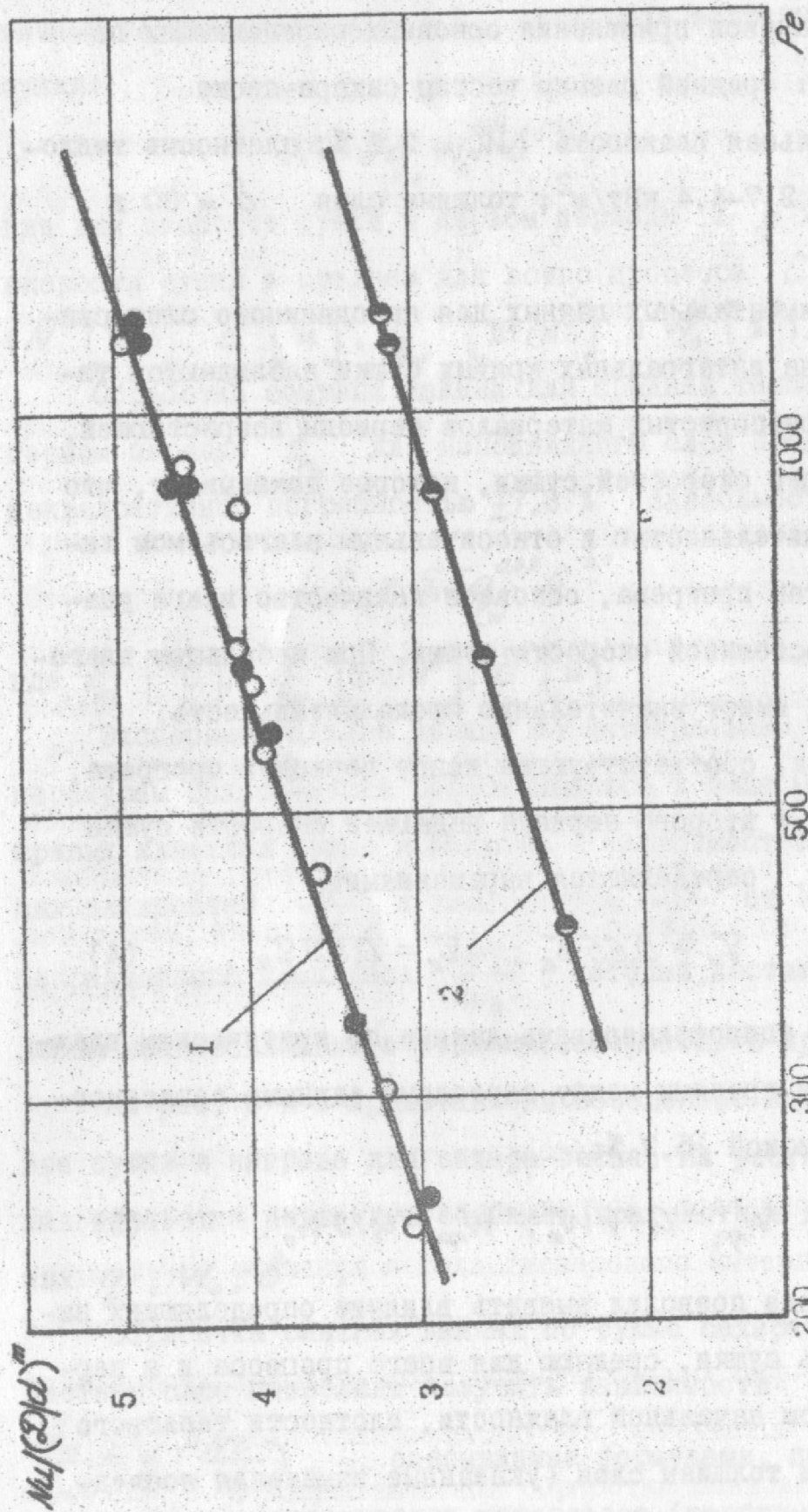


Рис. 1. Обобщенные зависимости Nu от Re для теплообмена в поперечном потоке сыпучего материала

1. ● - сахара-песка; ○ - речного песка
2. ● - карбида кремния зеленого.

определяющих факторов и получение зависимостей, отражающих эти закономерности. Диапазон применения основных определяющих параметров следующий: средний размер частиц сахара-песка

$d = 0,8$ мм; начальная влажность $W_0 = 2,2$ %; плотность теплового потока $q_w = 2,7-4,4$ кВт/м²; толщина слоя $\delta = 30$ и 50 мм.

Анализ экспериментальных данных для неподвижного слоя свидетельствует, что на интегральных кривых сушки наблюдаются типичные для капиллярнопористых материалов периоды возрастающей, постоянной и падающей скоростей сушки, которые показывают, что минимальной продолжительностью и относительным влагосъемом характеризуется участок прогрева, основное количество влаги удаляется в периоде постоянной скорости сушки. При небольшом влагосъеме второй период имеет значительную продолжительность.

Моменты времени, соответствующие концу периодов прогрева, постоянной скорости и второго периода падающей скорости сушки с погрешностью ± 6 %, определяются выражениями:

$$\tau_0 = 0,19 \tau_{\Sigma}; \quad \tau_1 = 0,65 \tau_{\Sigma}; \quad \tau_2 = 0,82 \tau_{\Sigma}. \quad (4)$$

Обработка позволила аппроксимировать данные по критическим влажностям, определяющим границы между периодами едиными зависимостями с вероятной ошибкой $\pm 5,2$ %:

$$W_{kp_0} = 0,90 W_0; \quad W_{kp_1} = 0,44 W_0; \quad W_{kp_2} = 0,15 W_0. \quad (5)$$

Совместный анализ позволил выявить влияние определяющих параметров на скорость сушки, среднюю для всего процесса и в первом периоде. С ростом начальной влажности, плотности теплового потока и уменьшением толщины слоя (указанные изменения последних двух факторов приводят при прочих равных условиях к росту средней температуры слоя), скорость сушки растет, что связано в основном с увеличением эффективных коэффициентов тепло- и массо-

переноса. Обработка данных позволила получить со среднеквадратичной погрешностью $\pm 14,2\%$ следующую зависимость для скорости сушки:

$$N = C q_w W_o^{0,6} \delta^{-1,6}, \quad (6)$$

где для скорости сушки в первом периоде $C = 2,35 \cdot 10^{-10}$, а для скорости сушки в среднем для всего процесса $C = 1,87 \cdot 10^{-10}$ (N [%/с], δ [м], q_w [Вт/м²] и W_o [%]).

Обработка опытных данных для средней температуры слоя в первом периоде $\bar{t}_m$ для неподвижного слоя представлена со среднеквадратичной погрешностью $\pm 7,8\%$ зависимостью

$$\bar{t}_m = 6,5 q_w^{0,23} \delta^{-0,1}, \quad (7)$$

где $\bar{t}_m$ [°C], q_w [Вт/м²], δ [м].

Экспериментальные данные по интегральным влажностям и температурам сахара-песка обрабатывались в виде модифицированных кривых кинетики сушки и нагрева - зависимостей безразмерных текущих влажностей $\frac{W}{W_o}$ и температуры $\frac{\bar{t}_m}{\bar{t}_{m1}}$ от одного и того же безразмерного комплекса $\frac{N\tau}{W_o}$, который достаточно учитывает условия взаимосвязанного тепло-массопереноса в процессе сушки.

На рис. 2 и 3 представлены обобщенные модифицированные кривые сушки и нагрева для сахара-песка. Из рисунков видно, что такая обработка позволяет обобщить все опытные данные при различных q_w, W_o, δ .

Обработка опытных данных по сушке сахара-песка в неподвижном плотном слое позволила получить зависимости $\frac{W}{W_o} = f\left(\frac{N\tau}{W_o}\right)$; $\frac{\bar{t}_m}{\bar{t}_{m1}} = f\left(\frac{N\tau}{W_o}\right)$, описываемые формулами, полученными В.В. Корнаки для неорганических материалов (карбиды бора и кремния, сварочные флюсы и др.):

$$\frac{W}{W_o} = \left(A - \frac{N\tau}{W_o}\right) \left[A + B\left(\frac{N\tau}{W_o}\right)^2 - C \frac{N\tau}{W_o}\right]^{-1}, \quad (8)$$

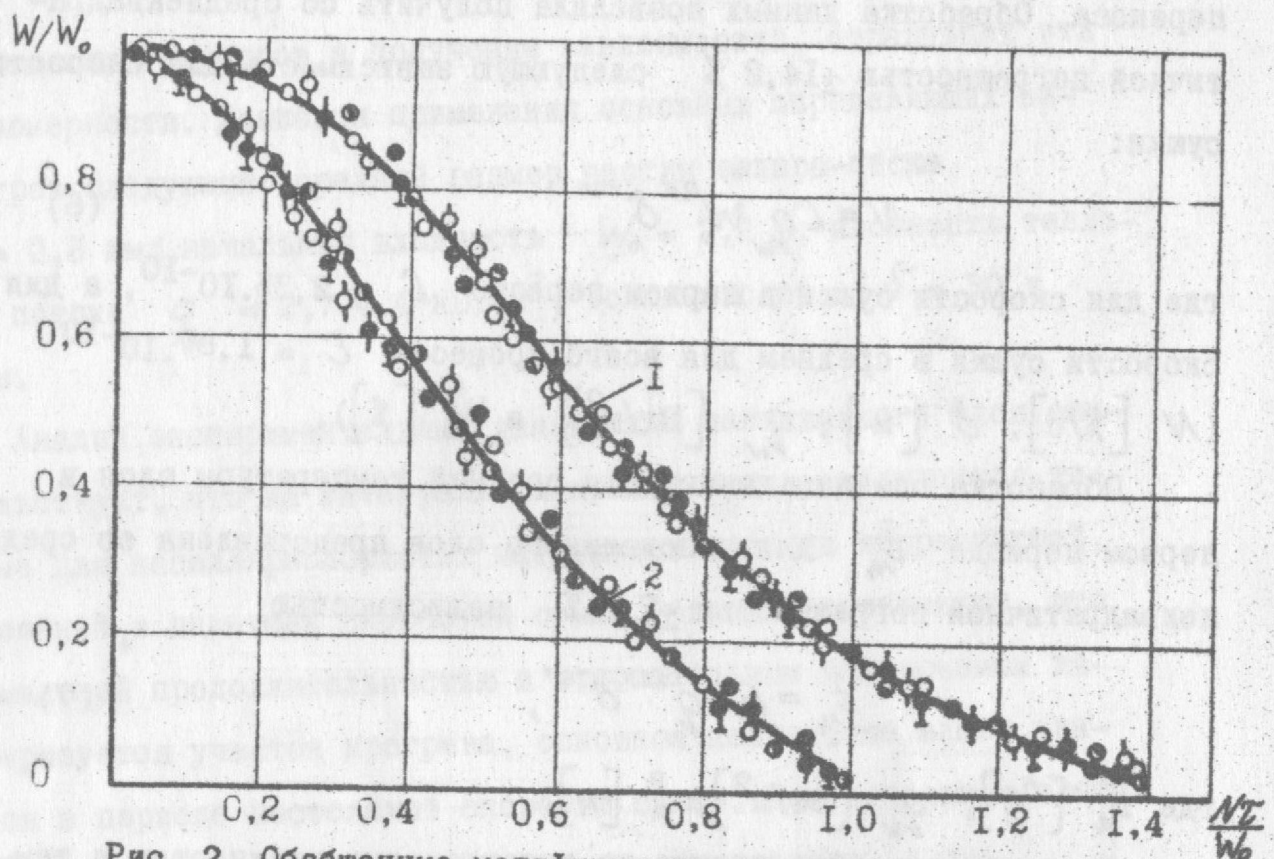


Рис. 2. Обобщенные модифицированные кривые влажности для сахара-песка: 1 - по скорости сушки в первом периоде, 2 - для всего процесса

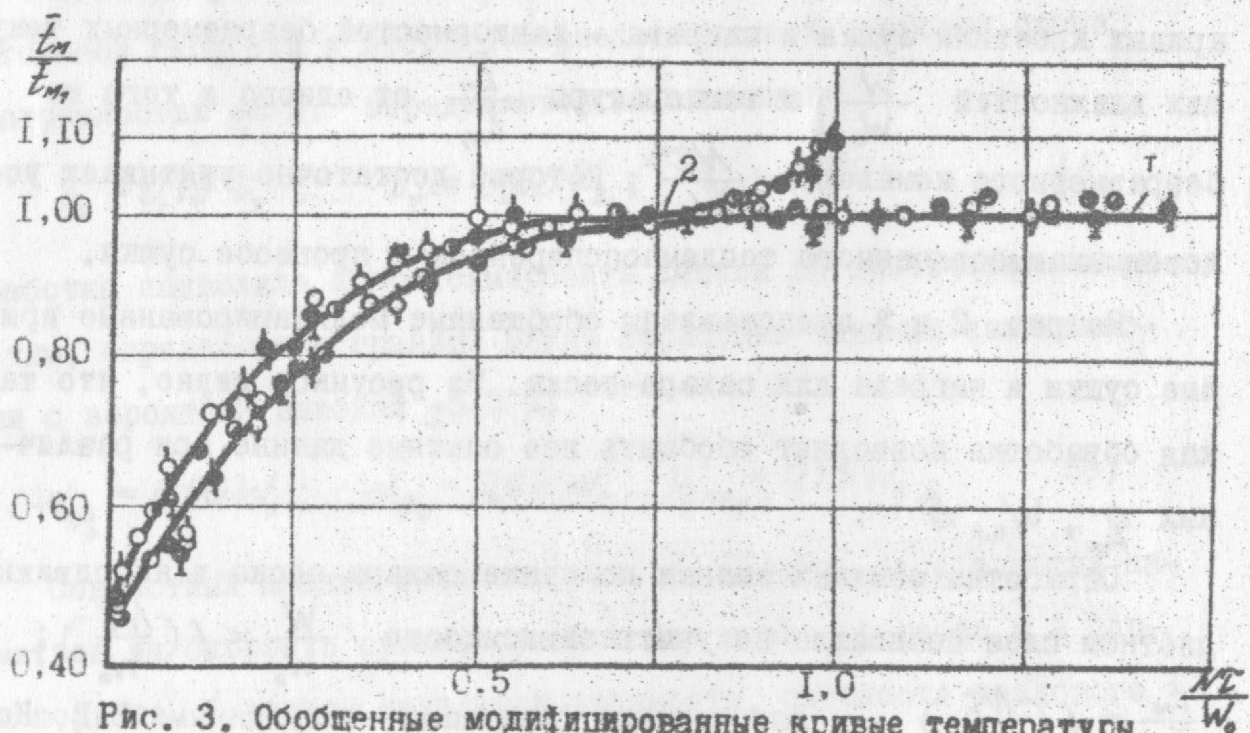


Рис. 3. Обобщенные модифицированные кривые температуры. 1 - по скорости сушки в первом периоде; 2 - для всего процесса

○ - $q_w = 2,7$; ● - $q_w = 3,5$; ◐ - $q_w = 4,4$ кВт/м² ($\delta = 0,03$ м)
 ● - $q_w = 2,0$; ● - $q_w = 2,7$; ● - $q_w = 3,6$ кВт/м² ($\delta = 0,05$ м)

$$\frac{t_m}{t_m} = 1 + D \left(\frac{N_z}{W_0} - E \right)^3, \quad (9)$$

где $A = 1,6$, $B = 3$, $C = 1,4$, $D = 0,4$, $E = 0,8$ при $N = N_1$,
и $A = 1,0$, $B = 1,7$, $C = 0,6$, $D = 1,5$, $E = 0,5$ при $N = N_2$.
Формулы (8), (9) справедливы со среднеквадратичной погрешностью,
соответственно, $\pm(2,0-1,3)$ и $\pm(14,4-5,5)$ %.

В четвертой главе приведены методика расчета поверхностных аппаратов для термической обработки кристаллических дисперсных материалов в движущемся плотном слое, а также некоторые рекомендации по выбору режимных и геометрических характеристик: диаметры греющих элементов, относительных шагов шахматного пучка, скорости слоя и параметров вибрации и толщины слоя.

На базе комплексных экспериментальных исследований и разработанной методики спроектирована и создана опытная установка для сушки сахара-песка в плотном движущемся слое. На рис. 4 приведена схема установки, которая работает следующим образом. Влажный сахар-песок дозатором I подается в теплообменную шахту 2 и под действием виброгравитационных сил движется сверху вниз. В результате контакта с горячей теплообменной поверхностью 3 удобообтекаемого профиля материал нагревается, находящаяся в нем влага испаряется и пароотводными каналами 4 движется в пароотводные коллекторы 5, откуда вентилятором выбрасывается в атмосферу. Стабильное движение сахара-песка в виде плотного слоя, а также регулирование его скорости обеспечивается с помощью вибратора 6, а также конструкцией разгрузочного устройства 7, представляющего собой сдвоенный шибер. Опытная установка испытана при различной производительности и стационарных режимах.

На рис. 5 приводится характер изменения температур поверхности, материала и влажности во время нахождения сахара-песка в аппарате. Процесс сушки сахара-песка в движущемся плотном слое,

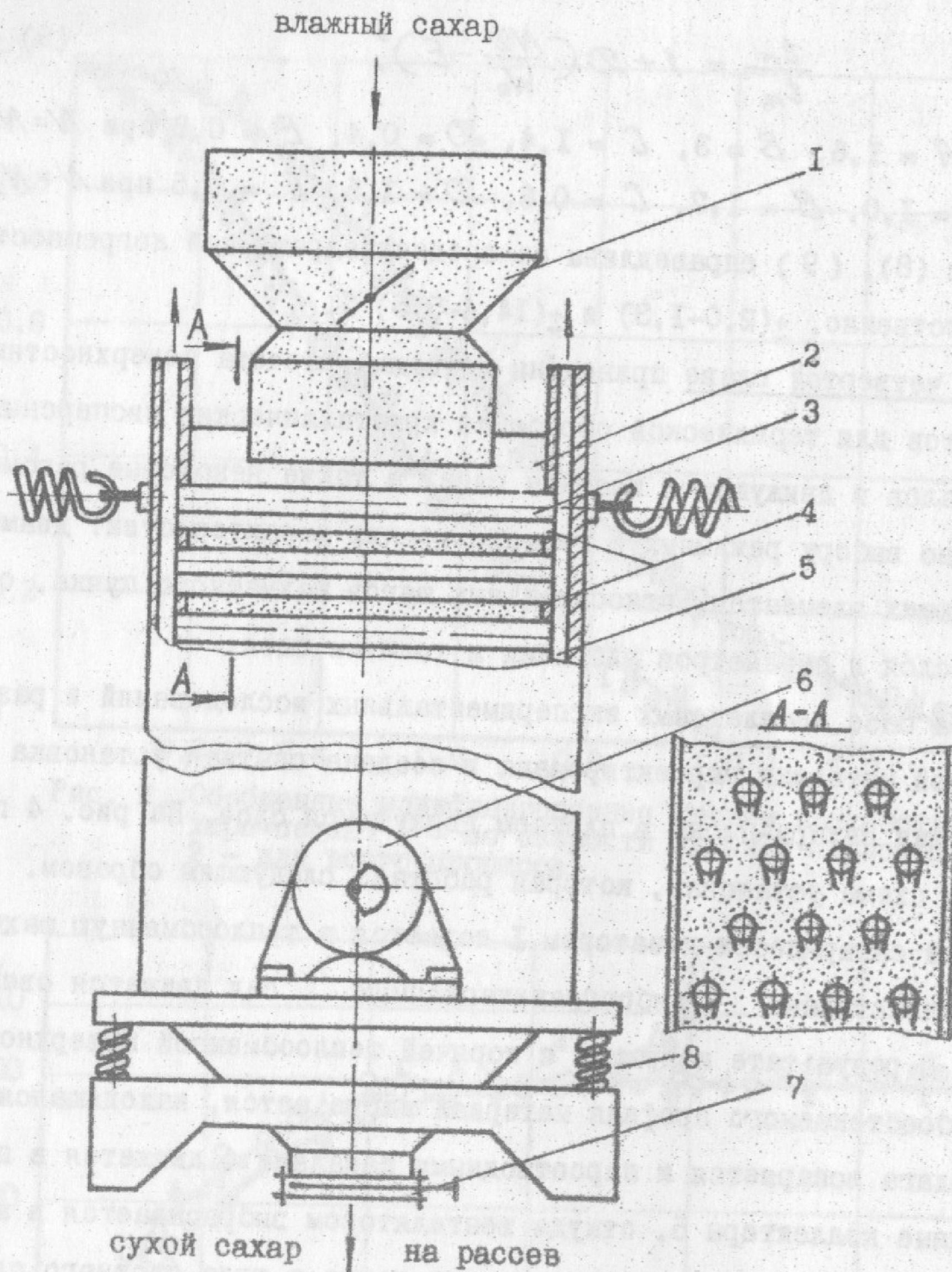


Рис. 4. Схема опытной установки

1 - дозатор, 2 - шахта, 3 - теплообменная поверхность, 4 - пароотводящие каналы, 5 - паросборочный коллектор, 6 - вибратор, 7 - выпускной шибер, 8 - пружина амортизатора

также как и в неподвижном, можно разделить на три периода.

Обобщение кривых сушки в движущемся слое проводилось по той же методике, что и в неподвижном слое (рис. 6). Можно отметить, что у движущегося слоя имеется хорошее качественное согласование с неподвижным.

Результаты испытаний опытной установки подтверждают, что увеличение скорости слоя приводит к заметной интенсификации теплообмена по сравнению с неподвижным плотным слоем, в основном благодаря улучшению условий переноса тепла и влаги. Заметно, что скорость сушки увеличивается в 3-4 раза по сравнению с неподвижным плотным слоем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов исследований позволяет сформулировать следующие основные выводы:

1. Сдвиговые характеристики сахара-песка описываются экспоненциальным уравнением, справедливым в широком диапазоне изменения влажности. Характерно, что влага в материале в зависимости от ее количества определяет соотношение сил сцепления и жидкостного трения и является расклинивающим фактором.

2. Теплообмен гладкой цилиндрической поверхности с поперечным потоком сухого и влажного материала при наложении вибрации свидетельствуют о незначительном влиянии теплообмена на теплоперенос и таким образом в исследованном диапазоне представляется возможным для теплообмена при сушке использовать зависимости, полученные для теплообмена сухого материала.

3. Данные по теплообмену ребристой поверхности, выполненной в виде удобообтекаемого профиля с поперечно омываемым потоком сахара-песка, вполне возможно использовать для расчетов аппаратов для термообработки кристаллических материалов. Технологические возможности удобообтекаемого профиля могут компенсировать неко-

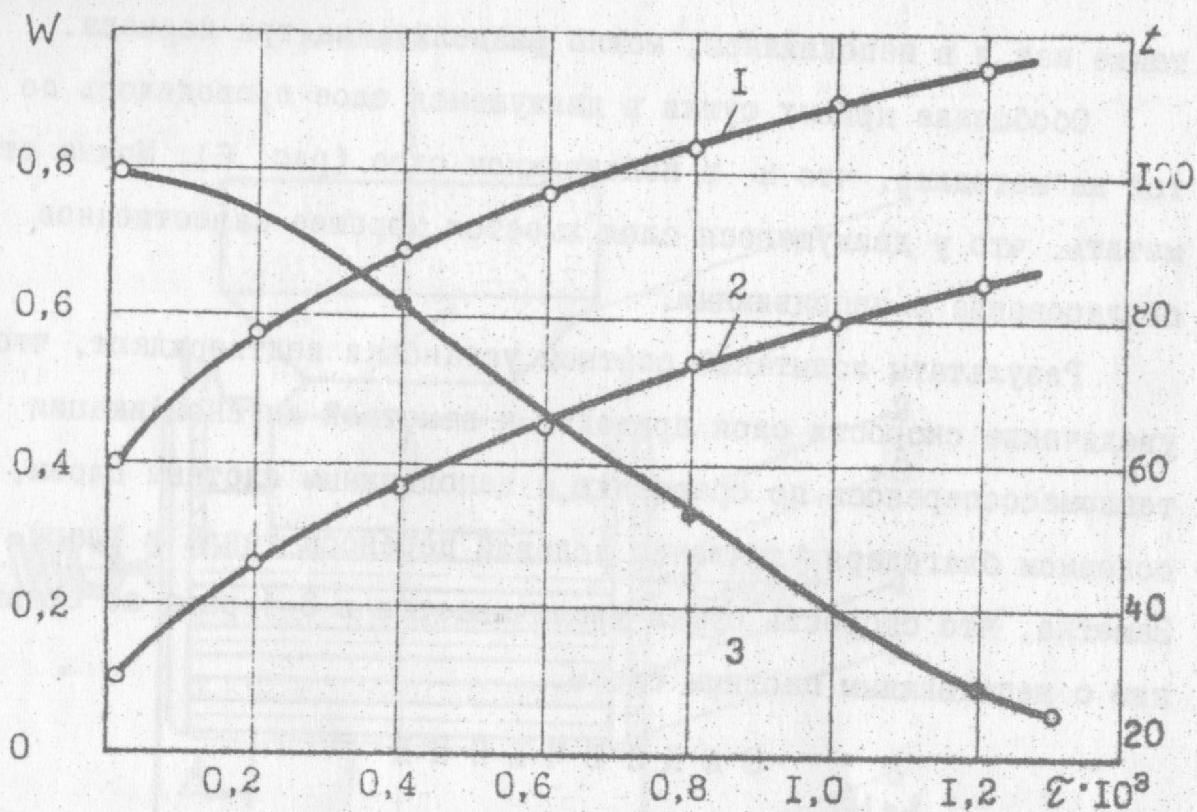


Рис. 5. Изменение температур поверхности (I), материала (2) и влажности (3) во время нахождения сахара-песка в аппарате ($v = 0,9$ мм/с)
[W. %; $t, ^\circ\text{C}$; $Z \cdot 10^3, \text{с}$]

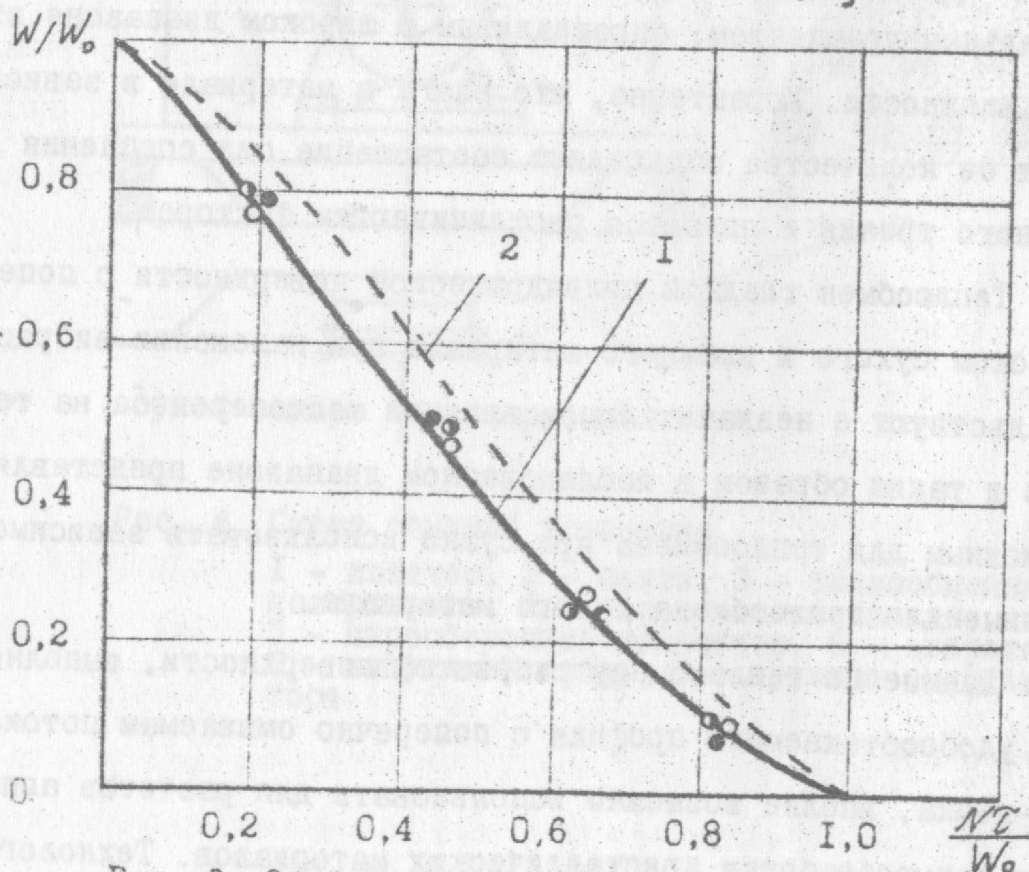


Рис. 6. Обобщенные кривые сушки сахара-песка для движущегося (I) и неподвижного (2) слоев
● - $v = 0,7$; ◐ - $v = 0,9$; ○ - $v = 1,4$ мм/с

торое снижение коэффициента теплоотдачи по сравнению с гладким цилиндром.

4. Использование модифицированных кривых сушки и температуры позволяет обобщить экспериментальные данные как для неподвижного, так и для движущегося слоев при различных геометрических и режимных параметрах.

5. Полученные результаты - зависимость для интенсивности теплообмена сухого и влажного материалов с поперечно омываемыми цилиндрическими и ребристыми поверхностями, единые уравнения кинетики сушки и нагрева в неподвижном и движущемся слоях, уравнения для скорости сушки могут быть использованы при разработке и проектировании поверхностных аппаратов для термообработки кристаллических дисперсных материалов (близких по свойствам к исследованному материалу) в плотном движущемся слое.

6. Результаты испытаний полупромышленного виброгравитационного аппарата подтверждают, что увеличение скорости слоя приводит к заметной интенсификации тепломассопереноса по сравнению с неподвижным плотным слоем, в основном благодаря улучшению условий переноса тепла и влаги. Заметно, что скорость сушки увеличивается в 3-4 раза по сравнению с неподвижным плотным слоем. При этом получены (при $U = 0,9$ мм/с) следующие результаты: объемный коэффициент теплообмена $\alpha_v = 1500$ Вт/(м³·К), интегральная скорость сушки $N_z = 5,4 \cdot 10^{-4}$ %/с, удельный влагоъем $A_v = 7,8 \cdot 10^{-5}$ кг/(м³·с), удельный расход тепла по испаренной влаге

$q_v = 1,5 \cdot 10^3$ кДж/кг, которые удовлетворительно согласуются с литературными данными для сушилок с плотным движущимся слоем и благоприятнее, чем для барабанных сушилок, установленных на технологических линиях производства сахара-песка.

Основное содержание диссертационной работы изложено в следующих работах:

1. А.с. 939904 (СССР). Вибросушилка для мелкодисперсных материалов / В.В. Корнараки, Л.Ж. Эль-Дияб. - Оpubл. в Б.И., 1982, № 24.

2. Корнараки В.В., Эль-Дияб Л.Ж. Зависимость сдвиговых характеристик сахара-песка от влажности. - Сахарная промышленность, 1981, № 6, с. 35-36.

3. Корнараки В.В., Эль-Дияб Л.Ж. Теплообмен поверхностей в поперечном виброгравитационном потоке сахара-песка. - Сахарная промышленность, 1981, № II, с. 29-31.

4. Корнараки В.В., Эль-Дияб Л.Ж., Гришин М.А. Исследование теплоотдачи оребренной поверхности в поперечном потоке сыпучего материала. - Промышленная теплотехника, 1984, т. 6, № 3 (в печати).

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

α - коэффициент температуропроводности; d - размер частиц;
 D - диаметр; N - скорость сушки; t - температура;
 v - скорость слоя; q - плотность теплового потока;
 W - влажность; α - коэффициент теплообмена; δ - толщина слоя, ребер; λ - коэффициент теплопроводности; ρ - плотность;
 τ - время; $Nu = \frac{\alpha D}{\lambda_{эф}}$ и $Pe = \frac{v D}{a_{эф}}$ - числа Нуссельта и Пекле.

И н д е к с ы

κp - критический; M - материал; O - начальный;
 $экв$ - эквивалентный; $эф$ - эффективный; Σ - суммарный (интегральный); 1 - первый; 2 - второй.

