

В. Давыдов
МИНИСТЕРСТВО ЗАГОТОВОК СССР

ВООСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ КОМБИКОРМОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
(ВНИИКП)

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
И УЛУЧШЕНИЕ ОРГАНИЗАЦИИ ТРУДА
НА КОМБИКОРМОВЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ**

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

№ 26



МОСКВА 1985

КИНЕТИКА ТЕПЛООБМЕНА ПРИ СУШКЕ И ОХЛАЖДЕНИИ ГРАНУЛ

О. И. ШАПОВАЛЕНКО, канд. техн. наук (Украинский филиал ВНИИ КП)

В нашей стране и за рубежом в целях улучшения физико-механических свойств рассыпных продуктов (комбикормов, отрубей, кормовых мучек и др.) широко распространен процесс прессования.

Указанные продукты гранулируют с использованием пара, воды или других пластифицирующих и связующих веществ. При гранулировании материалов с использованием воды зачастую применяют сушку гранул, так как только охлаждение продукта наружным воздухом в установках шахтного типа не позволяет получить гранулы, отвечающие по показателю влажности требованиям нормативно-технической документации.

Целью исследования являлось установление закономерностей кинетики теплообмена при сушке и охлаждении гранулированных комбикормов и отрубей, выработанных с использованием воды на прессе с вращающейся кольцевой матрицей. В исследовании кинетики теплообмена процесса сушки и охлаждения значительное место занимают изучение характера среднеобъемной температуры материала, а также определение зависимости температуры θ продукта от влагосодержания u .

Изучение процесса сушки гранулированного комбикорма и пшеничных отрубей проводили на установке, которая разработана для получения кривых сушки, скорости сушки и температурных кривых в широком диапазоне изменения температуры теплоносителя, влагосодержания и диаметра гранулированного материала. Установка позволяет моделировать процесс сушки и охлаждения гранул в аппаратах шахтного типа при изменении параметров и осуществлять измерения основных характеристик процесса. Для изучения кинетики процесса сушки по экспериментальным данным строили кривые сушки, скорости сушки и температурные кривые гранулированных материалов. Закономерности кинетики теплообмена конвективной сушки и охлаждения изучали по локальным температурным кривым гранул.

В процессе исследований температура продукта после пресса колебалась в широких пределах (от 49 до 62°C) в зависимости от влагосодержания и диаметра гранул. В начале процесса слой гранул прогрет равномерно. После пресса температура гранул комбикорма влажностью на сухую массу $\bar{W}_0^c = 21,9\%$, выработанного на матрице с отверстиями диаметром 4,7 мм, составила 60°C, а диаметром 9,7 мм — 50°C. При продувании продукта теплоносителем температурой 120°C в течение первых 2 мин наблюдалось понижение локальных температур. При этом наибольшее снижение температуры отмечено в верхней части слоя. Максимальный темп падения температуры для гранул диаметром 4,7 мм составил 26°C/мин (высота от дна кассеты $h = 0,25$ м), а для гранул диаметром 9,7 мм — 10—11°C/мин ($h = 0,25$ м). Для средней части слоя ($h = 0,15$ м)

этот показатель соответственно составлял 14—15 и 6—7°C/мин. В нижней же части слоя ($h = 0,05$ м) максимальное уменьшение температуры гранул находилось в пределах 5—6 и 2—3°C/мин ($d = 4,7$ и 9,7 мм соответственно).

После достижения точки минимума наблюдалось повышение локальных температур слоя, которое начиналось по истечении 2 мин с момента сушки. С увеличением диаметра гранул рост температуры при прочих равных условиях замедлялся. Так, температура нижней части слоя гранул диаметром 4,7 мм ($\bar{W}\% = 21,9\%$) возрастала к концу процесса ($\tau = 10$ мин) от 49 до 90°C (или на 6,4°C/мин), а гранул диаметром 9,7 мм — от 47 до 68°C (2,5°C/мин). Темп роста температуры в верхней части слоя составил 2 ($d = 4,7$ мм) и 0,33°C/мин ($d = 9,7$ мм). Снижение начального влагосодержания материала до 19,8% (на сухую массу) приводило к увеличению темпа роста локальной температуры нижнего слоя до 7,2 ($d = 4,7$ мм) и 5°C/мин ($d = 9,7$ мм), верхнего слоя — только до 1,7 ($d = 4,7$ мм) и 0,5°C/мин ($d = 9,7$ мм).

Установлено, что при сушке продукта в течение 10 мин теплоносителем температурой 120°C нижний слой гранул диаметром 4,7 мм прогревался до температуры 90—93°C. При этом максимальная среднеобъемная температура гранул составляла 65°C. Сушка в течение 6 мин при указанных режимах и диаметре гранул приводила к повышению локальной температуры нижнего слоя лишь до 70—72°C.

В процессе исследований охлаждение гранул осуществляли по истечении 6 мин сушки. При этом максимальный темп снижения температуры материала наблюдался в нижнем слое. Для гранул диаметром 4,7 мм он составлял 26°C/мин, а для гранул диаметром 9,7 мм — 19°C/мин. В верхнем слое максимальный темп снижения локальной температуры составлял 11—12 ($d = 4,7$ мм) и 12—13°C/мин ($d = 9,7$ мм), т. е. находился на одинаковом уровне.

На рис. 1 и 2 приведены температурные кривые гранулированных материалов при различных параметрах процесса.

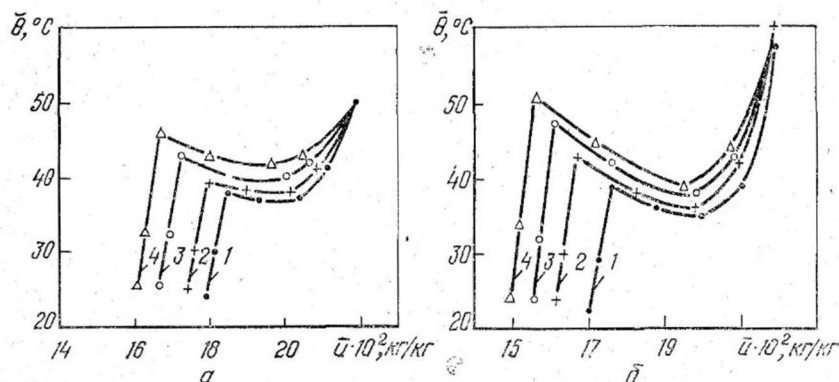


Рис. 1. Температурные кривые для гранулирования комбикорма при различной температуре воздуха:

$a-d = 9,7$ мм; $b-d = 4,7$ мм; $t_0 = 15^\circ\text{C}$; $1-t_c = 65^\circ\text{C}$; $2-t_c = 80^\circ\text{C}$; $3-t_c = 100^\circ\text{C}$; $4-t_c = 120^\circ\text{C}$

Как следует из графиков, среднеобъемные температурные кривые имеют явно не монотонный характер. В начальной стадии процесса в результате действия отрицательного внутреннего источника тепла снижается температура гранул. Через некоторое время температура материала начинает повышаться. Это приводит к тому, что в слое создаются резко выраженные температурные поля. Поэтому анализ механизма процесса проводили по зонам.

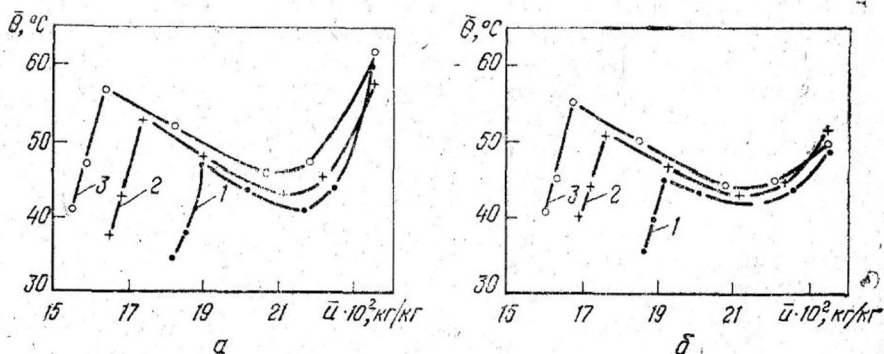


Рис. 2. Температурные кривые для отрубей при различной температуре воздуха: а— $d = 7,7 \text{ мм}$; $t_0 = 32^\circ\text{C}$; б— $d = 9,7 \text{ мм}$; $t_0 = 27^\circ\text{C}$; 1— $t_c = 60^\circ\text{C}$; 2— $t_c = 80^\circ\text{C}$; 3— $t_c = 100^\circ\text{C}$

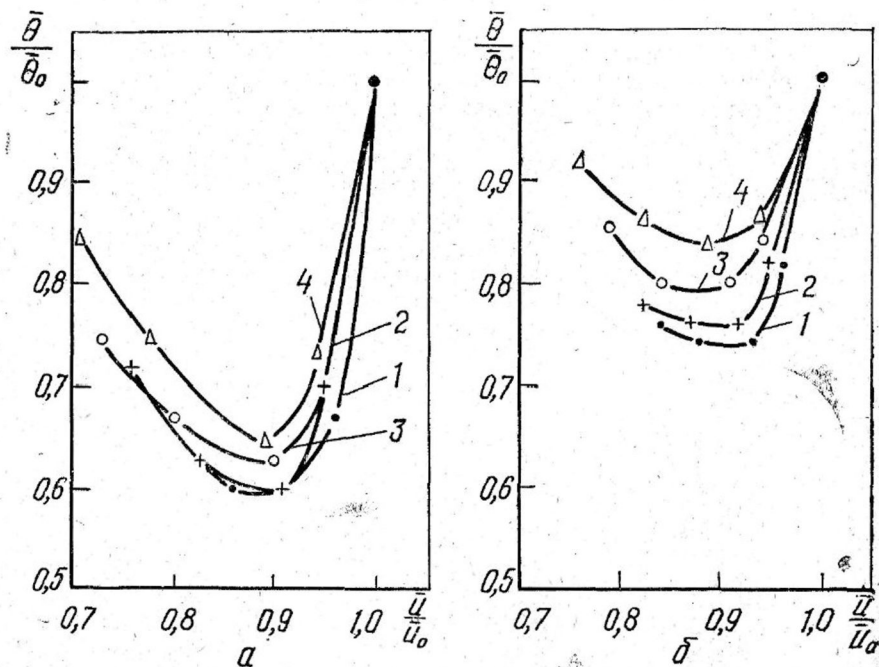


Рис. 3. Изменение относительного влагосодержания гранулированного комбикорма в процессе сушки:

а— $d = 4,7 \text{ мм}$; б— $d = 9,7 \text{ мм}$; 1— $t_c = 65^\circ\text{C}$; 2— $t_c = 80^\circ\text{C}$; 3— $t_c = 100^\circ\text{C}$; 4— $t_c = 120^\circ\text{C}$; $\frac{\bar{W}_0}{W_0} = 21,9\%$

Анализ температурных кривых позволил разделить процесс на три зоны. Первые две зоны относятся к продуванию гранул теплоносителем температурой 60—120°C, а третья зона — к процессу охлаждения. Характерной точкой, разделяющей первые две зоны, является точка перегиба. На рис. 3 приведены кривые изменения относительного влагосодержания материалов в зависимости от относительной температуры гранул.

Установлено, что при увеличении температуры теплоносителя точка перегиба сдвигается к оси ординат. При этом значение относительного влагосодержания в точке перегиба в исследуемом диапазоне не зависит от режима сушки и диаметра гранул и находится в пределах $0,9 \pm 0,05$ кг/кг.

Для удобства описания температурных кривых весь интервал удаляемого влагосодержания от начального $\bar{u}_0$ до конечного $\bar{u}_k$ разбили на три интервала: от $\bar{u}_0$ до первого граничного $\bar{u}_{r1}$, от $\bar{u}_{r1}$ до второго граничного $\bar{u}_{r2}$ и от $\bar{u}_{r2}$ до $\bar{u}_k$. Влагосодержание $\bar{u}_{r2}$ соответствовало точке перехода от зоны нагрева к зоне охлаждения гранул.

Экспериментальные данные по среднеобъемной температуре гранул обрабатывали по методу наименьших квадратов. В результате получены следующие уравнения, которые адекватно описывают кинетику процесса нагрева и охлаждения гранул комбикорма и отрубей по зонам:

$$\begin{aligned}\bar{\theta} &= \bar{\theta}_0 A (\bar{u}_0 - \bar{u})^n \text{ при } \bar{u}_{r1} \leq \bar{u} \leq \bar{u}_0; \\ \bar{\theta} &= \bar{\theta}_{r1} A (\bar{u}_{r1} - \bar{u})^n \text{ при } \bar{u}_{r2} \leq \bar{u} \leq \bar{u}_{r1}; \\ \bar{\theta} &= \bar{\theta}_{r2} A (\bar{u}_{r2} - \bar{u})^n \text{ при } \bar{u}_k \leq \bar{u} \leq \bar{u}_{r2},\end{aligned}$$

где $\bar{\theta}_0$ — начальная температура гранул, соответствующая $\bar{u}_0$;
 $\bar{\theta}_{r1}$ — температура в точке перехода от первой зоны ко второй, соответствующая $\bar{u}_{r2}$;
 $\bar{\theta}_{r2}$ — температура в точке перехода от зоны нагрева гранул к зоне охлаждения, соответствующая $\bar{u}_{r2}$;
 $\bar{u}$ — среднеобъемное текущее влагосодержание материала.

Значение показателя степени n зависит от формы связи влаги с материалом, а коэффициента A — от параметров процесса и диаметра гранул. Значения указанных величин приведены в табл. 1.

Средние квадратичные отклонения, полученные при расчете температуры гранулированных комбикормов и отрубей по уравнениям (2) — (4), приведены в табл. 2.

Как было сказано, максимальная локальная температура слоя гранул ($d = 4,7$ мм), непосредственно прилегающего к днищу кассеты ($h = 0,05$ м), при сушке продукта в течение 10 мин теплоно-

сителем температурой 120°C не превышает 93°C, а максимальная среднеобъемная температура составляет 65°C. При гранулировании комбикормов с применением пара среднеобъемная температура гранул после пресса может достигать $90 \pm 5^\circ\text{C}$ [2]. В связи с этим можно предположить, что гранулирование комбикормов с использованием воды и последующая их сушка в исследуемом диапазоне в меньшей степени, чем при гранулировании с паром, влияет на биологически активные вещества комбикорма за счет более низкой среднеобъемной температуры гранул.

Таблица 1

Значения коэффициентов уравнений (2)–(4)							
Диаметр гранул, мм	$\bar{u}_{Г1} < \bar{u} < \bar{u}_0$		$\bar{u}_{Г2} < \bar{u} < \bar{u}_{Г1}$		$\bar{u}_K < \bar{u} < \bar{u}_{2Г}$		
	A	n	A	n	A	n	
Гранулированные комбикорма							
4,7	1,29	0,155	2,18	0,155	1,36	0,155	
7,7	1,42	0,155	1,99	0,155	1,54	0,155	
9,7	1,57	0,155	1,95	0,155	1,57	0,155	
Гранулированные пшеничные отруби							
7,7	1,42	0,155	2,11	0,155	1,71	0,155	
9,7	1,68	0,155	2,08	0,155	1,82	0,155	

Таблица 2

Значения средних квадратичных отклонений			
Диаметр гранул, мм	Среднее квадратичное отклонение, $\pm^\circ\text{C}$		
	$\bar{u}_{Г1} < \bar{u} < \bar{u}_0$	$\bar{u}_{Г2} < \bar{u} < \bar{u}_{Г1}$	$\bar{u}_K < \bar{u} < \bar{u}_{Г2}$
Гранулированные комбикорма			
4,7	2	2,7	1
7,7	3,5	2,2	1
9,7	1,2	1,4	2
Гранулированные пшеничные отруби			
7,7	2,1	1,2	2
9,7	1,3	2	1

Таким образом, установлены закономерности кинетики теплообмена при сушке и охлаждении гранулированных комбикормов и отрубей, выработанных с использованием воды на прессе с вращающейся кольцевой матрицей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баум А. Е. Сушка зерна.—М.: ЦИНТИ Госкомитета СССР, 1963.—268 с.
 2. О сохранности витаминов и аминокислот при гранулировании комбикормов / Н. Полунина, И. Никитина, О. Казанцева и др.—Мукомольно-элеваторная промышленность, 1969, № 9, с. 29.
-