

Авторефер.
Ш 65

Министерство высшего и среднего специального образования УССР
ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
имени М. В. ЛОМОНОСОВА

Аспирант А. И. ШИЯНОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГРАНУЛИРОВАНИЯ КОРМОВЫХ ДРОЖЖЕЙ НА ПРЕССАХ С КОЛЬЦЕВОЙ МАТРИЦЕЙ

Специальность 05.374 — технология зерновых,
бобовых и крупяных культур

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Принято 1984

Одесса, 1972.

Министерство высшего и среднего специального образования УССР
ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
имени М. В. ЛОМОНОСОВА

Аспирант А. И. ШИЯНОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГРАНУЛИРОВАНИЯ КОРМОВЫХ ДРОЖЖЕЙ НА ПРЕССАХ С КОЛЬЦЕВОЙ МАТРИЦЕЙ

Специальность 05.374 — технология зерновых,
бобовых и крупяных культур

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

v011967 v
Одесский технологический
институт пищевой промыш-
ленности им. М. В. Ломоносова
БИБЛИОТЕКА

ОНАХТ 04.05.12
Исследование процесс

Одесса, 1972.



v011967

Автор. | v011967
Ш05 | ШИЯНОВ А.И.
Иссл. проц. гранулиров.
1972 8/4

12

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

Научные руководители:

кандидат технических наук, доцент **А. Д. Чмырь**
кандидат технических наук, доцент **Н. В. Остапчук**

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор **А. В. Горбатов**
кандидат технических наук **П. П. Тарутин**

Ведущее предприятие — Николаевский комбинат хлебопродуктов.

Автореферат разослан «.....» 1972 г.

Защита диссертации состоится «26» мая 1972 г.
на заседании Совета Одесского технологического института пищевой промышленности имени М. В. Ломоносова.

Просим Ваши отзывы в двух экземплярах прислать по адресу:
г. Одесса, ул. Свердлова, 112. Технологический институт пищевой промышленности имени М. В. Ломоносова.

Ученый секретарь Совета
Л. А. ЗАПОРОЖЕЦ

В соответствии с решениями XXIV съезда КПСС в стране намечено увеличить производство комбикормов. В результате анализа развития и размещения кормовой базы животноводства СССР на период 1971—1975 гг. установлено, что потребность в комбикормах составит к 1975 году 68,9 млн. тонн.

Одним из важнейших вопросов современного животноводства является обеспечение его полноценными комбикормами, содержащими достаточное количество аминокислот, белка, витаминов и других элементов питания. Решить эту проблему можно путем введения в комбикорма различных белковых добавок, в том числе и продуктов биохимического синтеза — кормовых дрожжей. Дрожжи являются высокоценными добавками к кормам, дефицитным по протенну и незаменимым аминокислотам и представляют собой богатый витаминами группы В и элементами минерального питания продукт.

Исходя из наиболее эффективного использования кормовых дрожжей в количестве 5—10% от массы комбикорма, потребность в них составит к 1975 году не менее 3,44 млн. тонн. Выпуск такого количества кормовых дрожжей в условиях крупнотоннажного производства требует коренной перестройки технологии их хранения и транспортировки.

В настоящее время промышленность выпускает сухие кормовые дрожжи в виде порошка. При транспортировке и использовании порошкообразных дрожжей происходит потеря части продукта вследствие распыления. Кроме того, комкование и слеживание порошкообразных дрожжей резко ограничивает возможность применения бестарного способа хранения и транспортировки. Высокая

удельная поверхность снижает стойкость дрожжей в процессе хранения.

Одним из способов, устраняющих эти недостатки, является гранулирование порошкообразных кормовых дрожжей. Выпуск дрожжей в гранулированном виде позволит осуществить бестарный способ хранения и транспортировки, механизировать и автоматизировать процессы, связанные с хранением и перевозкой дрожжей, увеличит полезную емкость хранилищ, повысит эффективность работы дозирующих устройств. Это приведет к улучшению технико-экономических показателей комбикормовых предприятий и заводов биохимического синтеза.

Проведенный анализ современных способов связывания дисперсных материалов показал, что порошкообразные кормовые дрожжи наиболее целесообразно гранулировать на прессах с вращающейся кольцевой матрицей. Кратковременное повышение температуры в процессе гранулирования не отразится на химическом и аминокислотном составе кормовых дрожжей, так как к моменту гранулирования они уже проходят высокотемпературную обработку на выпарной установке (80—83°С) и распылительной сушилке (температура дрожжей на выходе 80—85°С).

Прессы с кольцевой матрицей обладают высокой производительностью, небольшим удельным расходом энергии и позволяют получать гранулы, отвечающие условиям бестарного хранения и транспортировки. Процесс гранулирования ведется непрерывно, управляется автоматически; прессы занимают небольшую производственную площадь.

Исследованию процесса гранулирования комбикормов, травяной муки, отрубей на прессах с кольцевой матрицей посвящены работы ряда авторов: Н. И. Полуниной, Г. Я. Фарбмана, М. В. Порилы, В. Ф. Некрашевича, В. Т. Егорова, Г. А. Винникова, М. Я. Цицерман, Д. И. Николаева, Х. Пфоста, Л. Ионга, А. Файергерма, В. Фридриха, Б. Хандрека, Л. Линке, Г. Бастеларе, Р. Шульца, Х. Виттмана и др.

В результате этих работ установлена зависимость энергоемкости процесса гранулирования, качества гранул и давления прессования от физико-механических свойств исходного материала, способа подготовки его к гранули-

рованию, геометрических и кинематических параметров рабочих органов пресса-гранулятора. Определены оптимальные условия процесса гранулирования травяной муки и комбикормов.

Физическая сущность процессов, происходящих при образовании прессованных изделий, трактуется существующими теориями по-разному. Наибольшее признание для обоснования теоретических основ связывания частиц при гранулировании комбикормов и травяной муки получила молекулярная теория, хотя не отрицается проявление при определенных условиях сил сцепления адсорбционных пленок и капиллярных сил.

В настоящее время, судя по данным литературы, в нашей стране и за рубежом гранулирование кормовых дрожжей не производится. В связи с этим основной целью настоящей работы является исследование процесса гранулирования кормовых дрожжей на прессах с кольцевой матрицей. Для этого необходимо решить следующие задачи:

1. Изучить физико-механические свойства порошкообразных кормовых дрожжей.
2. Исследовать структурно-механические, упруго-вязкие и гигроскопические свойства гранул кормовых дрожжей.
3. Определить оптимальные условия процесса гранулирования кормовых дрожжей.
4. Исследовать особенности течения дрожжевого гранулята в формирующем канале матрицы; экспериментально определить его реологические свойства.
5. Разработать и экономически обосновать принципиальную технологическую схему гранулирования и бестарного хранения кормовых дрожжей.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ, СВЯЗУЮЩИЕ ВЕЩЕСТВА

В соответствии с поставленными целью и задачами в качестве объекта исследования были выбраны сухие кормовые дрожжи, полученные на основе очищенных жидких парафинов нефти. Дрожжи представляют собой порошок серо-желтого цвета со специфическим дрожжевым запахом. Химический состав дрожжей приведен в таблице 1.

Таблица 1

Влажность %	Зола	Общего белка, %	Углеводов, %	Липидов, %	Углеводоро- дов, %
8,0	6,7	45,0	19,2	10,0	0,25

Для получения прочных гранул порошкообразные дрожжи перед гранулированием подвергали влаготермической обработке (кондиционированию) паром, либо вводили связующие вещества. Связующими веществами в опытах служили меласса и кукурузный экстракт.

Нами был предложен также способ получения гранулированных кормовых дрожжей с использованием в качестве связующего вещества дрожжевой суспензии, которая является промежуточным продуктом дрожжевого производства. Способ защищен авторским свидетельством.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И АППАРАТУРА

Гранулирование кормовых дрожжей в лабораторных условиях проводили на стенде, включающем в себя электрический парогенератор, смеситель, прессформу и измерительное оборудование.

Смеситель представляет собой горизонтальный цилиндр, внутри которого расположен вал с лопатками. Для ввода пара и связующих веществ он оборудован штуцерами.

Прессформа состоит из пуансона и стакана, к нижней части которого с помощью резьбового соединения крепятся сменные матрицы. Отверстия матриц имеют различную длину и диаметр.

Замеры давления, при котором происходило течение дрожжевого гранулята, осуществляли с помощью специально изготовленного динамометра, основной деталью которого является упругий элемент — кольцо с тензометрическими датчиками сопротивления. Давление на кольцо передавалось поршеньком, установленным в нижней части стакана. В качестве записывающего прибора применяли осциллограф Н-700.

Для нагрева стакана и матриц на них были установлены электронагреватели. Заданную температуру поддерживали с помощью моста МСР 1-0,5.

Ударную прочность гранул определяли на лаборатор-

ном копре со свободно падающим бойком, массу которого изменяли в зависимости от размера гранул.

Крошимость образцов определяли на вращающемся параллелепипеде при скорости 25 об/мин в течение 20 минут.

Прочность гранул «на сжатие» в осевом направлении при действии статических нагрузок в пределах до 500 н находили на машине МР-0,05. Машина снабжена реверсивным устройством сжатия с индикатором, показывающим величину деформации образца.

Уруго-вязкие свойства гранул исследовали путем испытания образцов на деформографе, который работает по принципу пластометров, описанных Б. А. Николаевым, М. М. Резниковским и др. Для регистрации деформации образца на деформографе использована механическая система метеорологического термографа, позволяющая регистрировать деформации от 0 до 500 мкм с точностью до ± 10 мкм.

Гигроскопические свойства кормовых дрожжей исследовали статическим методом; ввиду интенсивного плесневения дрожжей определение равновесной влажности при $\varphi = 100\%$ проводили динамическим методом.

Объемную массу кормовых дрожжей находили по ГОСТ 10840-64, относительную влажность — согласно ГОСТ 8770-58. Дисперсную характеристику порошкообразных дрожжей устанавливали микроскопическим методом.

Коэффициент внутреннего трения определяли на односрезном приборе конструкции И. М. Литвинова, коэффициент внешнего трения — на приборе конструкции ДИИТа, усовершенствованном в ОТИПП им. М. В. Ломоносова, при нормальных напряжениях $\sigma \leq 5 \cdot 10^5$ н/м² и сдвигающих напряжениях $\tau \leq 4 \cdot 10^5$ н/м².

Результаты экспериментов обрабатывали методами математической статистики. При обработке результатов планируемых экспериментов использовали математический аппарат регрессионного анализа.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГРАНУЛИРОВАНИЯ КОРМОВЫХ ДРОЖЖЕЙ

Исследование физико-механических свойств порошкообразных кормовых дрожжей

По дисперсной характеристике порошкообразные кормовые дрожжи представляют собой образования сфери-

ческой формы с размерами отдельных частиц от 2,0 до 9,0 мкм; средний арифметический размер — 5,04 мкм. При длительном хранении из-за значительных сил межмолекулярного притяжения частицы дрожжей образуют агрегатные структуры размером 10,0—35,0 мкм.

Объемная масса порошкообразных дрожжей составляет 490 ± 8 кг/м³. Коэффициент их внутреннего трения равен 0,577. Коэффициент внешнего трения — величина, зависящая от вида ограждающей поверхности; для стали он равен 0,23.

Порошкообразные кормовые дрожжи являются весьма гигроскопичным материалом и могут поглощать или терять влагу в зависимости от изменения температуры t и относительной влажности φ воздуха. При этом будет изменяться и количество влаги, добавляемой к дрожжам перед гранулированием.

Равновесная влажность дрожжей увеличивается с понижением температуры воздуха при $\varphi = \text{const}$, либо с повышением его относительной влажности при $t = \text{const}$. Снижение температуры воздуха на 10° С приводит к увеличению равновесной влажности дрожжей на 0,2—0,6%. При высоких значениях относительной влажности воздуха влияние температуры сказывается в меньшей степени.

Экспериментально получены изотермы сорбции и десорбции влаги дрожжами при $t = 20^\circ \text{C}$. Кривые сорбции и десорбции не совпадают между собой, что свидетельствует о сорбционном гистерезисе в дрожжах. Общая точка изотерм сорбции и десорбции на конечном участке характеризует гигроскопическую влажность порошкообразных дрожжей, которая составляет 27,6%.

Для расчетного определения равновесной влажности дрожжей в интервале $\varphi = 0-70\%$ нами было использовано уравнение:

$$W_p = \sqrt{\frac{m}{kT}} \ln(1-\varphi) \% \quad (1)$$

где φ — относительная влажность воздуха в долях единицы;

T — температура воздуха, ° К;

m, k — коэффициенты, значения которых даны в таблице 2.

В интервале $\varphi = 70-100\%$ наблюдается значительное отклонение расчетных значений равновесной влажности дрожжей, вычисленных по уравнению (1), от опытных. После обработки экспериментальных данных для указанного интервала было получено следующее уравнение

$$W_p = -a + b\varphi + ce^{-d\varphi} \% \quad (2)$$

где a, b, c, d — эмпирические коэффициенты, величины которых приведены в таблице 2.

Таблица 2

Кривая	Значения коэффициентов					
	m	k	a	b	c	d
Изотерма сорбции влаги	2,01	$3,05 \cdot 10^{-5}$	36,45	0,64	$1,78 \cdot 10^7$	0,211
Изотерма десорбции влаги	2,00	$2,20 \cdot 10^{-5}$	22,23	0,50	$1,99 \cdot 10^{13}$	0,435

Отклонение экспериментальных данных от вычисленных по уравнениям (1, 2) не превышает $\pm 3\%$.

Исследование структурно-механических, упруго-вязких и гигроскопических свойств гранулированных кормовых дрожжей

Зависимость структурно-механических, упруго-вязких и гигроскопических свойств гранулированных кормовых дрожжей от их влажности и количества введенных связующих веществ имеет большое значение для выбора способа транспортирования, хранения и измельчения гранул.

Гранулирование порошкообразных кормовых дрожжей проводили на лабораторном стенде и прессе «Сенчюри-125», установленном на Кишиневском комбинате хлебопродуктов. В соответствии с требованиями МРТУ 8-3-61 в опытах применяли матрицы с диаметром отверстий 5,0 и 8,0 мм. Температура матрицы при кондиционировании дрожжей паром находилась в пределах $70 \pm 5^\circ \text{C}$, при введении связующих веществ — $45 \pm 5^\circ \text{C}$. Связующие вещества в выполненной серии экспериментов дозировали в количестве от 1,5 до 10% (массовых). Промежуток вре-

мени с момента выхода гранул из матриц до начала определения их свойств составлял 24 часа.

Изучение деформации гранул в процессе статического сжатия выявило у них зону упругой и зону пластической деформации. С увеличением влажности и количества связующих веществ пластические деформации растут, упругие снижаются, что приводит к уменьшению разрушающего напряжения (предела прочности). При одной и той же влажности (содержании связующих веществ) предел прочности гранул диаметра 5 мм выше, чем у гранул диаметра 8 мм (рис. 1).

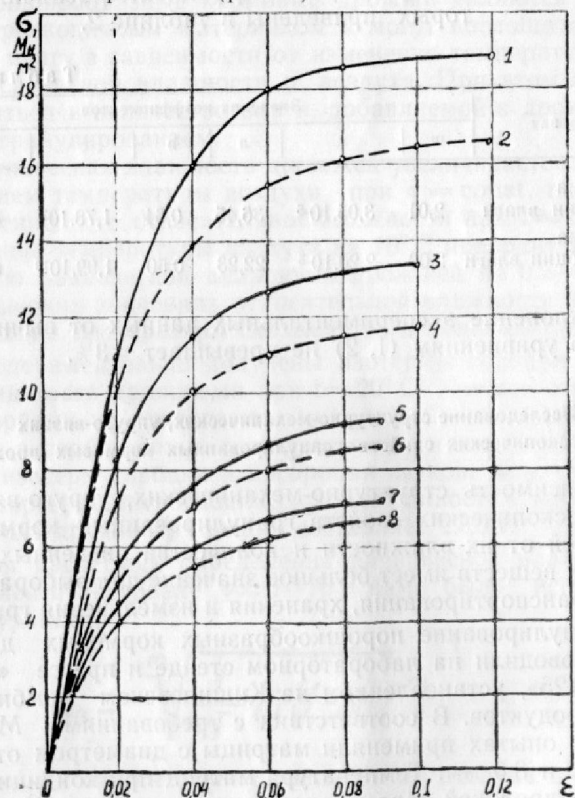


Рис. 1. Зависимость деформации гранул от нагрузки при статическом сжатии.

1, 2 — пар; 3, 4 — дрожжевая суспензия;
5, 6 — меласса; 7, 8 — кукурузный экстракт.

— — — — — Ø 8 мм. — — — — — Ø 5 мм.

Ударная прочность гранул с увеличением влажности и количества связующих веществ возрастает. Работа разрушения в исследованном интервале влажности и связующих веществ изменяется от 450 до 1230 дж/кг для гранул Ø 5 мм и от 280 до 980 дж/кг для гранул Ø 8 мм. В производственных условиях разрушение таких гранул следует ожидать, как установлено расчетами, при падении с высоты не менее 28 м, что обеспечит целостность гранул при многократных ударных нагрузках во время их транспортировки и загрузки в хранилища.

Крошимость гранул с увеличением влажности и количества связующих веществ уменьшается. Наименьшей крошимостью обладают гранулы, которые получены из дрожжей, обработанных паром: Ø 5 мм — 2,9÷1,3%; Ø 8 мм — 3,8÷2,1%; наибольшей — образованные на кукурузном экстракте: Ø 5 мм — 4,6÷3,6%; Ø 8 мм — 6,1÷4,5%.

Значительное уменьшение крошимости у исследованных гранул наблюдается при введении связующих веществ в количестве от 1,5 до 7,0% и увеличении влажности до 13%. Добавление связующих веществ в количестве 7,0÷10,0% и увеличение влажности более 13,0% не оказывают существенного влияния на снижение крошимости.

Приведенные экспериментальные данные показывают, что крошимость гранул кормовых дрожжей находится в одних пределах с крошимостью гранулированных комбикормов. Это позволит осуществить без значительных потерь операции по многократному перемещению гранул в процессе хранения и транспортировки на оборудовании, используемом комбикормовой промышленностью.

Упруго-вязкие свойства гранул характеризовали реологическими константами (таблица 3), значения которых были найдены в результате обработки реограмм (рис. 2). Приведенные данные свидетельствуют о том, что гранулы обладают ярко выраженными упругими свойствами с незначительным проявлением пластичности и эластичности. С увеличением влажности и количества введенных связующих веществ пластические и эластические свойства исследованных гранул возрастают.

Установленные реологические константы позволили наметить наиболее рациональный способ измельчения гранулированных кормовых дрожжей в соответствии с требованиями их дальнейшего использования. Для из-

РЕОЛОГИЧЕСКИЕ

Диаметр гранул, мм	Константы	Меласса				Кукурузный		
		Количество связующего						
		3,0	5,0	7,0	10,0	3,0	5,0	7,0
5	Еупр · 10 ⁻⁸ , н/м ²	6,15	5,45	3,50	3,20	9,80	8,15	6,15
	γ пл · 10 ⁻¹⁰ , н. сек/м ²	2,50	2,06	1,61	1,20	6,60	4,65	3,40
	Еэл · 10 ⁻⁸ , н/м ²	4,20	3,60	3,10	2,80	12,1	10,4	9,30
	γ эл · 10 ⁻¹⁰ , н. сек/м ²	0,26	0,22	0,18	0,19	0,86	0,78	0,65
8	Еупр · 10 ⁻⁸ , н/м ²	6,90	4,60	3,90	2,75	5,50	5,00	4,60
	γ пл · 10 ⁻¹⁰ , н. сек/м ²	2,07	1,71	0,77	0,62	3,00	2,48	1,80
	Еэл · 10 ⁻⁸ , н/м ²	3,40	2,90	2,60	2,18	6,10	5,60	4,75
	γ эл · 10 ⁻¹⁰ , н. сек/м ²	0,35	0,27	0,21	0,19	0,49	0,41	0,33

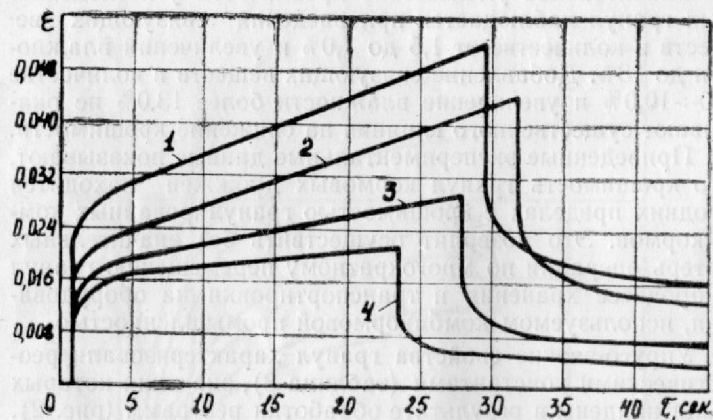


Рис. 2. Зависимость деформации гранул от времени при постоянном напряжении.
1 — влажность 13,0 %; 2 — влажность 12,0 %;
3 — влажность 11,0 %; 4 — влажность 10,0 %.

мельчения гранул рекомендованы машины ударного действия, либо сочетающие сжимающее воздействие со сдвигом.

Экспериментальные данные, характеризующие гигро-

КОНСТАНТЫ ГРАНУЛ

Экстракт вещества, %	Дрожжевая суспензия					П А Р				
	Влажность гранул, %									
	10,0	3,0	5,0	7,0	10,0	10,0	11,0	12,0	13,0	14,0
4,90	7,90	7,00	5,80	4,60	5,10	4,80	3,20	2,60	2,10	
3,10	10,3	8,10	3,96	2,70	2,47	1,76	0,93	0,64	0,41	
7,70	11,3	9,70	8,50	6,30	4,60	3,50	3,20	2,80		
0,46	0,47	0,41	0,34	0,27	0,44	0,38	0,27	0,24	0,20	
3,40	6,70	5,80	5,20	3,60	4,00	3,50	2,10	2,00	1,80	
1,75	8,81	7,34	4,76	2,51	1,36	1,05	0,42	0,36	0,23	
3,70	8,60	7,70	6,90	4,10	2,70	2,30	2,10	2,00	1,60	
0,26	0,54	0,45	0,38	0,27	0,28	0,22	0,18	0,16	0,13	

скопические свойства гранул, представлены в таблице 4. Из них видно, что исследованные параметры (относительная влажность и температура воздуха) оказывают на порошкообразные и гранулированные дрожжи идентичное влияние.

Анализ экспериментальных данных по структурно-механическим, упруго-вязким и гигроскопическим свойствам гранулированных кормовых дрожжей показал, что наиболее полно требованиям бестарного хранения и транспортировки отвечают гранулы, которые получены из порошкообразных дрожжей, кондиционированных паром. Исходя из этого, все дальнейшие исследования проводили, варьируя температуру и влажность дрожжей перед гранулированием путем изменения расхода пара или его давления.

Определение оптимальных условий процесса гранулирования кормовых дрожжей

Гранулирование дисперсных материалов на прессах с кольцевой матрицей представляет собой сложный физико-механический процесс. Выполненные исследования выявили, что на энергоёмкость процесса гранулирования и качество гранул оказывают влияние значительное количество совокупно действующих факторов, отыскание оптимального сочетания которых представляет сложную экс-

РАВНОВЕСНАЯ ВЛАЖНОСТЬ ГРАНУЛ, %
ВРЕМЯ ДОСТИЖЕНИЯ РАВНОВЕСИЯ, СУТ.

Связующие компоненты	Относительная влажность воздуха, %												
	60				70				80				100
	Температура воздуха, °С				Температура воздуха, °С				Температура воздуха, °С				
1. Кукурузный экстракт	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	20
	9,2	8,4	7,8	12,1	11,4	10,7	18,2	17,4	16,7	26,8	—	—	—
	22	21	13	24	22	14	24	24	16	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2. Меласса	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	20
	9,7	8,6	7,9	12,2	11,3	10,6	17,5	16,5	15,9	26,7	—	—	—
	23	20	10	26	23	13	28	25	13	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3. Дрожжевая суспензия	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	20
	8,3	7,4	6,7	11,3	10,1	9,5	15,6	15,5	13,8	26,0	—	—	—
	26	23	12	27	25	14	29	27	16	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4. Пар	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	20
	9,1	8,2	7,4	12,1	10,9	10,2	15,9	15,2	14,3	26,2	—	—	—
	25	24	13	27	25	15	30	28	16	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

тремальную задачу. Оптимальное сочетание факторов обеспечивает наилучшее значение какого-либо показателя, принятого в качестве критерия оптимальности, при заданных ограничениях на другие показатели.

Для отыскания оптимального сочетания факторов был использован метод планирования экстремального эксперимента. Критериями оптимальности служили два показателя: энергоемкость процесса гранулирования, характеризующаяся удельным расходом энергии $A_{уд}$ кДж/кг (Y_1), и качество готовых гранул, определяемое крошительностью K , % (Y_2). Выбор двух критериев оптимальности обусловлен тем, что оптимальные условия процесса гранулирования с точки зрения энергетических затрат не совпадают с оптимальными условиями получения прочных гранул. Принятые критерии позволяют более полно оценить эффективность процесса гранулирования с учетом влияния одновременно действующих факторов.

Для выбора факторов, влияющих на принятые критерии оптимальности, был проведен анализ отечественных и зарубежных исследований по гранулированию травяной муки, комбикормов и мельничных отходов на прессах с кольцевой матрицей. Он показал, что основными факторами, влияющими на энергоемкость процесса гранулирования и качество готовых гранул, являются диаметр отверстий матрицы, температура, влажность и дисперсный состав гранулируемого продукта, режим охлаждения гранул.

Учитывая изложенное, в качестве варьируемых в программу исследования были включены следующие факторы: температура (X_1) и влажность (X_2) дрожжей после кондиционирования паром, диаметр отверстий матрицы (X_3). Дисперсный состав дрожжей и режим охлаждения гранул для поставленной задачи имеют чисто случайный характер и могут быть учтены только постановкой другой серии опытов, в связи с чем в ходе экспериментов они оставались постоянными.

Определение оптимальных условий процесса гранулирования кормовых дрожжей проводили на лабораторном стенде. В опытах реализовали матрицу полного факторного эксперимента 2^3 . Для отыскания области оптимума использовали метод крутого восхождения Бокса—Уилсона. Значимость коэффициентов регрессии проверяли по критерию Стьюдента, адекватность полученных моде-

лей — по критерию Фишера. В результате проведенного планирования получены следующие уравнения регрессии, адекватно описывающие область экспериментирования:

$$y_1 = 92,025 + 0,75 X_1 - 6,25 X_2 - 1,95 X_3 - 3,125 X_2 X_3 + 3,275 X_1 X_3 - 6,975 X_1 X_2 \quad (3)$$

$$y_2 = 2,325 + 0,275 X_1 - 0,5 X_2 - 0,35 X_3 + 0,15 X_1 X_2 + 0,375 X_2 X_3 + 0,15 X_1 X_3 \quad (4)$$

Полученные математические зависимости показывают, что на удельный расход энергии при гранулировании и крошимость гранул в основном влияют влажность кормовых дрожжей после кондиционирования паром и диаметр отверстий матриц.

Чтобы определить численные значения факторов в области оптимума, необходимо решить задачу достижения минимального удельного расхода энергии при условии, что крошимость гранул не будет превышать 5%. Крошимость гранул не более 5% регламентируется требованиями межреспубликанских технических условий МРТУ 8-3-61. Задачу можно сформулировать так же, как отыскание условного экстремума (компромиссного оптимума), функции y_1 при ограничениях, накладываемых функцией y_2 .

Для решения поставленной задачи был разработан и реализован на ЦВМ «Раздан-2» комбинированный алгоритм: метод покоординатного поиска точек условного экстремума в сочетании с методом последовательных приближений. После решения на ЦВМ получены следующие значения факторов: температура (X_1) дрожжей после кондиционирования паром — 66°C , их влажность (X_2) — 13%, диаметр отверстий матрицы (X_3) — 12 мм. Удельный расход энергии и крошимость, рассчитанные на основании этих данных по уравнениям (3,4), соответственно равны: $y_1 = 40,95$ кдж/кг; $y_2 = 0,5\%$.

Оптимальное сочетание факторов проверено экспериментально в лабораторных и производственных условиях. В таблице 5 приведены удельный расход энергии на гранулирование, а также структурно-механические и упруго-вязкие свойства гранул. Данные таблицы показывают, что величины критериев оптимальности, достигнутые в опытах, незначительно отличаются от рассчитанных по уравнениям (3, 4), а полученные гранулы удовлетворяют условиям бестарного способа хранения и транспортировки.

Таблица 5.

Показатели	Условное обозначение	Размерность	Условия проведения процесса гранулирования	
			лабораторные	производственные
Диаметр отверстий матриц	d	мм	12,0	12,7
Влажность дрожжей после кондиционирования паром	W_k	%	13,2	13,0
Температура дрожжей после кондиционирования паром	t_k	$^\circ\text{C}$	67,0	68,0
Удельный расход энергии	$A_{уд}$	кдж/кг	42,1	43,5
Влажность гранул	W_2	%	11,4	11,2
Крошимость гранул	K	%	0,6	1,1
Предел прочности гранул при статическом сжатии	σ_p	мн/м ²	12,5	12,3
Удельная работа разрушения гранул	$P_{уд}$	дж/кг	524	508
Модуль упругости гранул	$E_{упр}$	н/м ²	$2,8 \cdot 10^8$	$2,9 \cdot 10^8$
Пластическая вязкость гранул	$\tau_{пл}$	н. сек/м ²	$0,72 \cdot 10^{10}$	$0,76 \cdot 10^{10}$
Модуль эластичности гранул	$E_{эл}$	н/м ²	$1,2 \cdot 10^8$	$1,1 \cdot 10^8$
Эластическая вязкость гранул	$\tau_{эл}$	н. сек/м ²	$0,14 \cdot 10^{10}$	$0,16 \cdot 10^{10}$

Реологическая характеристика и особенности течения дрожжевого гранулята в каналах матрицы

Формование гранул кормовых дрожжей является основным этапом процесса гранулирования, который осуществляется путем продавливания вальцом дрожжевой массы через каналы (отверстия) матрицы. В рабочей зоне матрицы в результате сжатия кондиционированные порошкообразные дрожжи превращаются в сплошную среду — дрожжевой гранулят. Под действием приложенного давления дрожжевой гранулят начинает необратимо

деформироваться и течь в каналы матриц. Характер течения дрожжевого гранулята определяется его реологическими свойствами, которые зависят от скорости сдвига, температуры и влажности.

Исследование реологических свойств и особенностей течения дрожжевого гранулята в каналах матриц проводили на основе современных представлений физико-химической механики и реологии дисперсных систем и пищевых масс, которые развиты в трудах П. А. Ребиндера, В. А. Каргина, М. П. Воларовича, Г. В. Виноградова, Б. А. Николаева, А. В. Горбатова, Ю. А. Мачихина, М. Рейнера, Д. Мак-Келви, М. Муни, А. Метцнера и многих других исследователей.

Экспериментальное изучение реологических свойств дрожжевого гранулята осуществляли реометрическим методом. Опыты сводились к измерению потерь давления в каналах матриц и весового расхода гранулята в единицу времени. В исследовании применяли матрицы с диаметром канала от 3,51 до 8,00 мм и длиной от 23,0 до 61,0 мм. Напряжения сдвига τ и скорости сдвига $\dot{\gamma}$ находились в интервалах, преобладающих в реальных условиях производства. Температуру и влажность гранулята поддерживали в пределах, которые были установлены в результате отыскания оптимальных условий процесса гранулирования кормовых дрожжей.

С целью исключения влияния входа в канал и влияния начального участка канала на общую потерю давления в нем использовано понятие расчетной длины канала. При одном и том же диаметре канала, при равном расходе определяли общее падение давления в каналах разной длины; разность в длинах каналов принимали за расчетную длину, а разность перепада давлений — за падение давления на расчетной длине.

Экспериментальные данные по течению представляли в виде графиков зависимости расхода дрожжевого гранулята от падения давления на полной и расчетной длине канала матриц. Зависимость имеет криволинейный характер. Это указывает на то, что дрожжевой гранулят по своей физической природе является неньютоновским телом.

Результаты проведенных экспериментов показали, что течение дрожжевого гранулята в исследованном диапазоне скоростей сдвига может быть описано уравнениями

степенного закона. Для определения индекса течения дрожжевого гранулята построили в логарифмических координатах основную кривую его течения в виде зависимости напряжения сдвига на стенке канала от градиента скорости сдвига. Индекс течения n равен 0,231, что свидетельствует о значительном отклонении поведения дрожжевого гранулята от ньютоновского.

Изменение эффективной вязкости дрожжевого гранулята описывается уравнением

$$\eta_{эф} = \eta_0 \left(\frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_0} \right)^{n-1} \quad \text{н.сек/м}^2, \quad (5)$$

где $\dot{\gamma}_0$ — приведенная скорость сдвига ($\dot{\gamma}_0 = 1 \text{ сек}^{-1}$); η_0 — приведенная вязкость при единичном значении градиента скорости, н.сек/м².

Установлено, что в интервале скоростей сдвига от 50 до 800 сек⁻¹ η_0 составляет 141 000 н.сек./м².

Результаты исследования реологических свойств дрожжевого гранулята позволили разработать методику расчета давления, которое необходимо создавать на входе в отверстие матрицы для формирования гранул. Давление предложено рассчитывать по формуле

$$D = \left[\frac{Q(3n+1)}{\pi n R^3 \dot{\gamma}_0} \right]^n \frac{2 \eta_0 \dot{\gamma}_0 (L + N2R)}{R} \quad \text{н/м}^2, \quad (6)$$

где Q — объемный расход дрожжевого гранулята через одно отверстие матрицы, м³/сек;

R, L — радиус и длина отверстия матрицы, м;

N — поправка, учитывающая входные эффекты.

Для определения величины поправки N использовали метод Бэгли. Экспериментально установлено, что в диапазоне скоростей сдвига от 100 до 600 сек⁻¹ величина N изменяется от 2,4 до 3,6 диаметра канала.

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГРАНУЛИРОВАНИЯ И БЕСТАРНОГО ХРАНЕНИЯ КОРМОВЫХ ДРОЖЖЕЙ

На основании выполненных исследований и рекомендаций, приведенных в литературе, предложена принци-

пиальная технологическая схема гранулирования и бестарного хранения кормовых дрожжей. В основу схемы положено серийно выпускаемое отечественной промышленностью оборудование, которое широко используется на комбикормовых предприятиях: установка для гранулирования типа ДГ, механический (пории, транспортеры), а также пневматический транспорт, весоизмерительные устройства. Хранение гранулированных дрожжей рекомендовано осуществлять в силосах, либо цилиндрических комплексно-механизированных хранилищах.

Величину годового экономического эффекта от внедрения предложенной технологической схемы по заводу биосинтеза производительностью 250 000 т кормовых дрожжей в год находили методом сопоставления удельных затрат при выпуске дрожжей в порошкообразном и гранулированном виде. Годовой экономический эффект для завода указанной производительности составляет 627,7 тыс. руб., срок окупаемости капитальных вложений — 0,3 года. Текущие издержки на 1 т кормовых дрожжей по заводу биосинтеза приведены в таблице 6.

Для сравнительной оценки эффективности бестарного способа хранения гранулированных кормовых дрожжей и хранения порошкообразных дрожжей в таре на комбикормовых заводах расчетным путем определены экономические показатели обоих способов. Расчеты выполнены применительно к условиям Ленинградского комбикормового завода производительностью 250 000 т в год, исходя из того, что его потребность в кормовых дрожжах составляет 12 500 т в год (5%). Размеры текущих затрат на 1 т кормовых дрожжей для рассмотренных способов хранения представлены в таблице 6.

Из приведенных в таблице данных вытекает, что текущие затраты комбикормового завода при бестарном хранении гранулированных дрожжей сократятся на 0,445 руб. на 1 т по сравнению с хранением порошкообразных дрожжей в таре. Годовая экономия на Ленинградском комбикормовом заводе составит за счет этого 5560 руб. Если годовой выпуск кормовых дрожжей одного завода биосинтеза производительностью 250 000 т в год распределится между двадцатью комбикормовыми заводами по мощности, равными Ленинградскому, годовая экономия по комбикормовой промышленности будет равна

$$5560 \times 20 = 111200 \text{ руб.}$$

Таблица 6.

Показатели	В руб. на 1 т. дрожжей			
	завод биосинтеза		комбикормовый завод	
	тарный способ	бестарный способ	тарный способ	бестарный способ
Заработная плата основная и дополнительная	0,609	0,269	0,821	0,336
Стоимость электроэнергии и пара	0,018	0,361	0,041	0,069
Амортизационные отчисления и ремонт	0,062	0,125	0,053	0,065
Вспомогательные материалы	2,704	—	—	—
Итого	3,393	0,755	0,915	0,470

ВЫВОДЫ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ

1. На основании анализа современных способов связывания дисперсных материалов и проведенных исследований предложено гранулировать кормовые дрожжи на прессах с кольцевой матрицей при влажности до 15%. Выпуск дрожжей в гранулированном виде не ухудшает их кормовой ценности и позволяет использовать бестарный способ хранения и транспортировки.
2. Порошкообразные кормовые дрожжи представляют собой высокодисперсный продукт с размерами отдельных частиц от 2,0 до 9,0 мкм. Коэффициент внутреннего трения порошкообразных дрожжей равен 0,577, коэффициент внешнего трения по стали — 0,230. Насыпная масса — 490 кг/м³.
3. Кормовые дрожжи являются весьма гигроскопичным материалом и могут поглощать или терять влагу в зависимости от изменения параметров окружающего воздуха. С увеличением температуры, либо уменьшением относительной влажности воздуха их равновесная влажность понижается. Для определения равновесной влажности порошкообразных дрожжей в интервале относительной влажности воздуха $\varphi = 0-100\%$ предложены формулы (1,2).
4. Механическая прочность гранул кормовых дрожжей в значительной степени определяется их влажностью и содержанием связующих веществ. С увеличением влажности до 15,0% и содержания связующих веществ

до 10,0% растут пластические деформации, упругие снижаются. Это ведет к повышению прочности гранул при ударном нагружении и снижению разрушающего напряжения при статическом сжатии. Крошимость гранул с увеличением влажности свыше 14,0% и содержании связующих веществ более 7,0% практически не изменяется.

5. Гранулированные дрожжи влажностью 9,0—14,0% и с содержанием связующих веществ 1,5—7,0% отвечают требованиям МРТУ 8-3-61 и обладают механической прочностью, позволяющей осуществлять операции по их многократному перемещению с использованием существующего оборудования комбикормовых предприятий. Измельчение гранул следует проводить на машинах ударного действия, либо сочетающих сжимающее воздействие со сдвигом.

6. Использование статистического метода планирования экспериментального эксперимента позволило получить оптимальное сочетание факторов, обеспечивающее минимальную энергоемкость процесса гранулирования кормовых дрожжей при заданных ограничениях на качество гранул. Оптимальное сочетание факторов подтверждено экспериментально в лабораторных и производственных условиях.

7. В исследованном диапазоне градиентов скоростей дрожжевой гранулят ведет себя как ньютоновское тело со степенной зависимостью между напряжением сдвига и градиентом скорости. Дрожжевой гранулят характеризуется значительными силами внутреннего трения и высокими значениями эффективной вязкости.

8. Давление, которое необходимо создавать на входе в отверстие матрицы для формования гранул, рекомендовано определять расчетным путем по формуле (6). Входящие в нее реологические константы определены экспериментально. Зависимость (6) помимо геометрии канала учитывает потери давления на концевые эффекты.

9. Предложена принципиальная технологическая схема гранулирования и бестарного хранения кормовых дрожжей. Экономический эффект от ее внедрения составляет по заводу биосинтеза производительностью 250 000 тонн в год 627,7 тыс. руб. Годовая экономия от внедрения бестарного способа хранения гранулированных кормовых дрожжей в комбикормовой промышленности составит 111,2 тыс. руб.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В СООТВЕТСТВИИ С СЛЕДУЮЩИМИ РАБОТАМИ:

1. Структурно-механические свойства гранулированных кормовых дрожжей. Тезисы докладов на научной конференции по физико-химической механике в пищевых производствах. М., 1969.

2. Дисперсная характеристика и гигроскопические свойства сухих товарных дрожжей. Транспортировка и хранение кормовых дрожжей. Сб. трудов ВНИИ синтезбелок, М., 1970.

3. Влияние влажности и давления прессования на реологические свойства сухих кормовых дрожжей. Транспортировка и хранение кормовых дрожжей. Сб. трудов ВНИИ синтезбелок, М., 1970.

4. Действие связующих веществ на структурно-механические и технологические свойства гранул кормовых дрожжей. Транспортировка и хранение кормовых дрожжей. Сб. трудов ВНИИ синтезбелок, М., 1970.

5. Упруго-вязкие свойства гранул кормовых дрожжей. Транспортировка и хранение кормовых дрожжей. Сб. трудов ВНИИ синтезбелок, М., 1970.

6. Производственные испытания гранулирования кормовых дрожжей. Транспортировка и хранение кормовых дрожжей. Сб. трудов ВНИИ синтезбелок, М., 1970.

7. Исследование структурно-механических и реологических свойств гранулированных кормовых дрожжей в связи с их хранением. Реферативная информация о законченных научно-исследовательских работах в вузах УССР. Вып. 5, Киев, 1971.

8. Гигроскопические свойства гранулированных кормовых дрожжей. Реферативный сборник «Микробиологическая промышленность». Вып. 4, 1971.

9. Влияние температуры и давления прессования на реологические свойства дрожжевого гранулята. Реферативный сборник «Микробиологическая промышленность». Вып. 5, 1971.

10. Способ получения дрожжей. Авторское свидетельство № 315719. «Открытия, изобретения, промышленные образцы, товарные знаки», 1971, № 29.

Результаты работы доложены и обсуждены на научно-технических конференциях Одесского технологического института пищевой промышленности им. М. В. Ломоносова 1969, 1970, 1971 гг. и научной конференции по физико-химической механике в пищевых производствах, Москва (июнь 1969 г.).