

Автор едр.

Д 99

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ УССР

ОДЕССКИЙ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ПИЩЕВОЙ  
ПРОМЫШЛЕННОСТИ  
имени М. В. ЛОМОНОСОВА

---

---

На правах рукописи

ДЯТЛОВ Анатолий Денисович

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА  
ГРАНУЛИРОВАНИЯ ГИДРОЛИЗНЫХ ДРОЖЖЕЙ  
И ОПТИМИЗАЦИЯ  
ЕГО ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ  
В СВЯЗИ С БЕСТАРНЫМ ХРАНЕНИЕМ

Специальность — 05.18.02 — технология зерновых,  
бобовых, крупяных товаров и комбикормов

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени кандидата  
технических наук

Одесса — 1973

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ УССР

ОДЕССКИЙ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ПИЩЕВОЙ  
ПРОМЫШЛЕННОСТИ  
имени М. В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

ДЯТЛОВ Анатолий Денисович

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА  
ГРАНУЛИРОВАНИЯ ГИДРОЛИЗНЫХ ДРОЖЖЕЙ  
И ОПТИМИЗАЦИЯ  
ЕГО ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ  
В СВЯЗИ С БЕСТАРНЫМ ХРАНЕНИЕМ

Специальность — 05.18.02 — технология зерновых,  
бобовых, крупяных товаров и комбикормов

Переучет 19 87

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени кандидата  
технических наук

с. в. 12116 12117 8-



v 012117

Одесса — 1973

ОНАХТ 28.07.11  
Исследование процесс



v012117

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

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент **А. Д. Чмырь.**

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор **П. Н. Платонов;**

кандидат технических наук, Лауреат Государственной премии СССР

**П. П. Тарутин.**

Ведущая организация — Всесоюзный научно-исследовательский институт комбикормовой промышленности (г. Воронеж).

Автореферат разослан „20“ марта 1973 г.

Защита диссертации состоится „20“ апрель 1973 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, №2. Технологический институт пищевой промышленности имени М. В. Ломоносова.

Ученый секретарь Совета

**Л. А. Запорожец.**

## ВВЕДЕНИЕ

Намеченное XXIV съездом КПСС увеличение производства продуктов животноводства обуславливает необходимость создания прочной кормовой базы и улучшения качества комбикормов. Повысить качество комбикормов можно путем введения в них различных белково-витаминных добавок в том числе и кормовых дрожжей, которые содержат 48—52% белка, водорастворимые витамины В<sub>1</sub> и В<sub>2</sub>, минеральные соли и являются высокоценным ингредиентом в комбикормах.

Существующие методы транспортирования и хранения лепесткообразных и порошкообразных дрожжей приводят к дополнительным затратам на тару и погрузочно-разгрузочные работы, выполняемые в основном вручную. При переработке рассыпных дрожжей в производственных условиях образуется взрывоопасная и вредная для здоровья обслуживающего персонала пыль.

В ближайшие годы будут введены в эксплуатацию биохимические заводы большой мощности по производству гидролизных дрожжей (Кировский—60 тыс. тонн, Пермский—50 тыс. тонн, Волжский — 30 тыс. тонн в год) и к концу 1975 года выпуск их составит около 700 тыс. тонн в год. Применяемое в настоящее время затаривание рассыпных дрожжей в бумажные мешки по 20 кг окажется неприемлемым для крупнотоннажного производства.

Специфические особенности рассыпных гидролизных дрожжей (комкование, слеживание, плохая сыпучесть) сдерживают возможность применения бестарных способов их хранения и транспортирования.

Одним из наиболее эффективных способов, устраняющих эти недостатки, является гранулирование. Выпуск дрожжей в гранулированном виде позволит применить бестарный способ хранения и транспортирования, механизировать и автоматизировать производственные процессы, улучшить условия

труда на биохимических и комбикормовых предприятиях. Все это свидетельствует о перспективности гранулирования рассыпных гидролизных дрожжей на вновь строящихся заводах биохимического синтеза.

## I. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ физико-механических свойств гидролизных кормовых дрожжей, современных методов связывания дисперсных материалов и конструкций существующих прессов-грануляторов показал, что гидролизные дрожжи наиболее целесообразно гранулировать методом выдавливания на прессах с кольцевой или плоской матрицей. Эти прессы высокопроизводительны, потребляют сравнительно небольшое количество электроэнергии, занимают незначительную производственную площадь и позволяют получить гранулы высокого качества.

Кратковременное повышение температуры дрожжевой биомассы в процессе гранулирования до 323—333 К не оказывает отрицательного действия на кормовую ценность дрожжей.

Исследованию процесса гранулирования комбикормов, травяной муки, отрубей и других дисперсных материалов 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. Я. Винникова, Д. И. Николаева, А. И. Шиянова, А. И. Рыбака, А. Д. Чмыря, Л. Даvida Л. Ионга, Х. Пфоста, А. Файергерма, Б. Хандрека, Л. Шульца, Л. Линке, Г. Бастеларе, Х. Витмана, Г. Стефанса и др. В проведенных исследованиях установлена зависимость энергоемкости процесса гранулирования, качества гранул и давления прессования от физико-механических свойств исходного материала, геометрических и кинематических параметров рабочих органов прессов-грануляторов. Определены оптимальные условия ведения процесса гранулирования травяной муки и комбикормов.

Судя по литературным данным, до настоящего времени исследования возможности получения гранул из лепесткообразных и порошкообразных дрожжей в нашей стране и за рубежом не проводили.

Решение проблемы производства гранул из рассыпных гидролизных дрожжей связано с разработкой технологии гранулирования, изучением наиболее существенных закономерностей процесса гранулирования и прочностных свойств гранул. В связи с этим основной целью настоящей работы явля-

ётся исследование процесса гранулирования рассыпных гидролизных дрожжей и оптимизация его основных параметров для осуществления бестарного хранения и транспортирования.

Для достижения поставленной цели необходимо:

1. Определить физико-механические свойства рассыпных гидролизных дрожжей.

2. Исследовать влияние физико-механических свойств рассыпных дрожжей, геометрических и кинематических параметров рабочих органов пресса на эффективность процесса гранулирования и качественные показатели гранул.

3. Исследовать структурно-механические и гигроскопические свойства гранулированных дрожжей в зависимости от технологических параметров гранулирования.

4. Выделить значимо влияющие на процесс конструктивно-технологические параметры и их взаимодействия, и определить оптимальные значения выделенных параметров, обеспечивающих минимальный расход электроэнергии при заданной прочности гранул и производительности пресса-гранулятора.

5. Разработать технические предложения по ведению процесса гранулирования рассыпных гидролизных дрожжей на прессах с кольцевой матрицей.

## **II. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ К ИССЛЕДОВАНИЮ ПРОЦЕССА ГРАНУЛИРОВАНИЯ ГИДРОЛИЗНЫХ ДРОЖЖЕЙ**

### **2. 1. Физическая сущность образования гранул из рассыпных дрожжей**

Прессование основано на свойствах сыпучих материалов уплотнятся под действием внешней нагрузки. При определенном режиме прессования образуются гранулы заданной геометрической формы. В настоящее время не существует единой научно-обоснованной теории, объясняющей природу сил, обеспечивающих прочность гранул. Физическая сущность природы явлений, происходящих при прессовании дисперсных материалов трактуется по-разному капиллярной, коллоидной и молекулярной теориями. Наибольшее признание для обоснования теоретических основ связывания частиц при гранулировании комбикормов и травяной муки получила молекулярная теория.

Образование гранул является весьма сложным физико-химическим процессом, на различных этапах которого участву-

ют различные по своей природе и величине силы сцепления. Эти силы зависят от природы гранулируемого материала, его свойств и параметров гранулирования. Нельзя объяснить образование гранул из материалов, имеющих различный химический состав и физико-механические свойства за счет одного вида сил сцепления. Также нельзя этого сделать в отношении одних и тех же порошкообразных материалов, имеющих различную влажность, температуру, дисперсный состав и гранулируемых при разных давлениях.

Влияние различных форм связи влаги на прочностные свойства гранул гидролизных дрожжей и выяснение механизма гранулообразования можно определить экспериментально. Микрогетерогенность поверхности частиц дрожжей обуславливает адгезионный характер их связывания, при этом вандер-ваальсовы силы составляют только один вид молекулярного механизма гранулирования. Ко второму и основному виду молекулярного взаимодействия частиц следует отнести силы водородных связей полярных групп углеводов и белков.

А. Д. Чмырь показал, что наибольшего значения водородные связи достигают в стадии затвердевания после охлаждения гранул.

## **2. 2. Специфические особенности гранулирования лепесткообразных и порошкообразных гидролизных дрожжей**

Технологический процесс гранулирования гидролизных дрожжей можно разделить на 4 самостоятельных этапа: гидротермическая обработка их до гранулирования, подача к рабочим органам пресса, гранулирование и охлаждение гранул. На каждом этапе на материал оказывает влияние определенное внешнее воздействие, изменяющее его физико-механические свойства.

**Гидротермическая обработка дрожжей.** Одним из основных условий процесса образования качественных гранул является равномерное проникновение влаги и тепла в рассыпные дрожжи, находящиеся в смесителе пресса. При этом время контакта влаги с материалом должно быть минимальным, а равномерность распределения ее на поверхности частиц — наибольшей. Такие условия достигаются при кондиционировании рассыпных дрожжей водяным паром, который воздействуя на материал повышает его температуру и влагосодержание, а также оказывает связующее воздействие. Чтобы определить количество пара, требуемого для подачи в смеситель

пресса, необходимо определить количество тепла, идущего на нагрев дрожжей до заданной температуры. Если известна производительность пресса, то можно определить необходимое количество тепла по уравнению теплового баланса. Конечную температуру дрожжей можно определить по формуле, предложенной для гранулирования травяной муки:

$$T_2 = \frac{i(W_2 - W_1) + \frac{100 \cdot T_1 \cdot C_{с.в.}}{1 - C_{с.в.}} + T_1 \cdot W_1}{\frac{100 \cdot C_{с.в.}}{1 - C_{с.в.}} + W} \quad [1]$$

где  $T_1$  и  $T_2$  — температура дрожжей до и после кондиционирования водяным паром, град.

$i$  — теплосодержание пара, кдж/кг;

$W_1$  и  $W_2$  — влажность материала до и после кондиционирования, %;

$C_{с. в.}$  — теплоемкость сухого вещества дрожжей, кжд/кг. град.

Уравнение (1) может быть использовано в качестве программы поддержания оптимальной влажности материала, где датчиком системы будет измеритель температуры на выходе из смесителя, а исполнительным механизмом — устройство для регулирования расхода водяного пара. Действие тепла и влаги придает продукту свойства, создающие наиболее благоприятные условия для образования гранул: снижаются упругие деформации, повышается пластичность и текучесть гранулята, что в значительной степени снижает энергоемкость процесса гранулирования и повышает качество гранул.

Гидролизные рассыпные дрожжи при кондиционировании водяным паром нагреваются до температуры 318 К, кроме того, они нагреваются при прохождении через рабочие каналы матрицы в пределах от 276 К, до 278 К. Кратковременное действие пара не оказывает отрицательного действия на кормовую ценность дрожжей.

**Подача материала в зону прессования.** Равномерная подача материала в зону прессования во многом обуславливает устойчивую работу гранулятора. Назначение системы подачи заключается в непрерывном подводе материала от смесителя в зону прессования, перемещении его на рабочую поверхность матрицы, а также распределении материала по ширине и длине этой поверхности.

В настоящее время на прессах-грануляторах отечественного производства типа ДГ и ДПБ установлены конусные питающие приемники. Экспериментально установлено, что коэффициент внутреннего трения увлажненных гидролизных дрожжей находится в пределах 0,90—1,26. Угол наклона образующей конусного питающего приемника в прессах ДГ и ДПБ равен  $45^\circ$ . При таком наклоне образующей питающего приемника материал скапливается на его поверхности. Постоянное скопление продукта в вершине конусного приемника уменьшает площадь его входного сечения и препятствует проходу следующей порции. Это приводит к неравномерной загрузке прессующих валков, неустойчивой работе пресса, частым сбоям, понижению производительности пресса и повышенному расходу электроэнергии и пара.

В результате экспериментально-теоретических исследований установлено, что применение цилиндрического приемника вместо конусного позволяет устранить указанные недостатки и улучшить равномерную подачу материала в зону прессования.

**Зазор между матрицей и прессующими валками.** Для нормальной работы пресса-гранулятора, для повышения его производительности и увеличения сроков работы прессующего узла необходимо устанавливать определенный зазор между внутренней поверхностью матрицы и прессующими валками. Величина этого зазора зависит от: физико-механических свойств прессующего материала, диаметра рабочих каналов матрицы, скорости прессования, соотношения диаметров валков и матрицы.

В процессе работы гранулятора на его внутренней поверхности матрицы образуется кольцевой слой спрессованного материала, который освободившись от давления прессующего валка в сечении 1—1 (рис. 1), сразу же расширяется и вращаясь по ходу вместе с матрицей, опять попадает в зону захвата (точка А), высота его увеличивается до  $h_1$ . В результате расширения высота слоя продолжает увеличиваться до момента, когда плотность вновь поступившей порции материала в сечении  $B_1 B_3$  сравняется с плотностью расширившегося слоя. В этот момент расширение слоя прекращается и далее начинается его повторное сжатие, вместе с вновь поступившей порцией материала до максимальной плотности в зоне проталкивания ( $D_1 D_2$ ) его в отверстия матрицы. Сжатие материала и проталкивание его в каналы матрицы характеризуется углами поворота матрицы и валка, соответственно  $\beta$  и  $\beta_1$ . Зна-

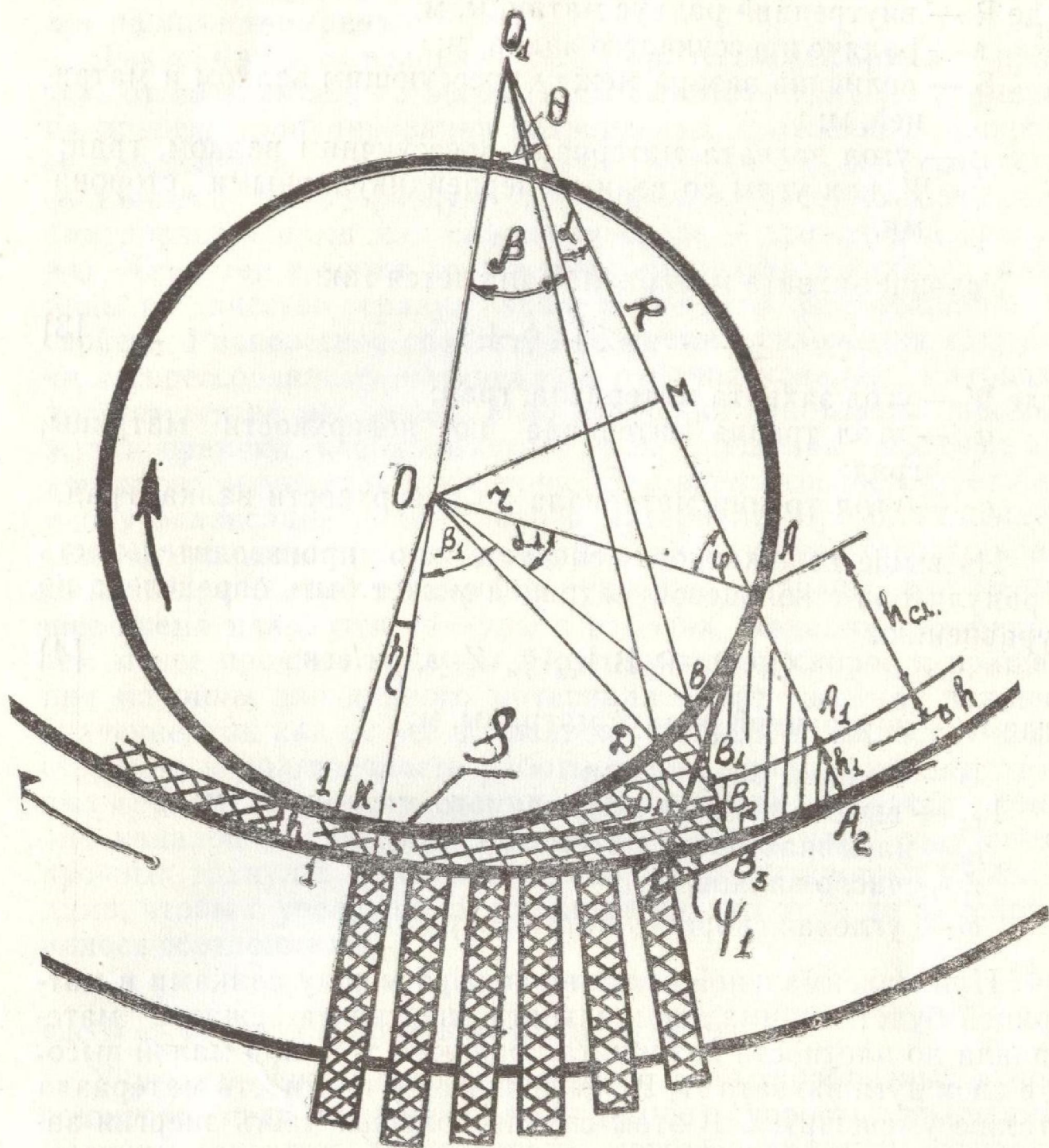


Рис. 1. Схема работы прессующего узла.

- S — зазор между прессующим валком и матрицей;
- $\psi$  — угол захвата материала прессующим валком;
- $h_{cl}$  — высота захватываемого слоя материала.

чение этих углов зависит от вида прессуемого материала и диаметров прессующих валков и матрицы. Как видно из рисунка 1 начальная высота слоя захватываемого материала будет:

$$h_{cl} = R - [r \cdot \cos \varphi + (R - r - S) \cos \theta] - \Delta h, \text{ м} \quad [2]$$

где  $R$  — внутренний радиус матрицы, м;  
 $r$  — радиус прессующего вала, м;  
 $S$  — величина зазора между прессующим валком и матрицей, м;  
 $\varphi$  — угол захвата материала прессующим валком, град;  
 $\varphi = \Psi$ , как углы со взаимноперпендикулярными сторонами.

Условие захвата материала запишется так:

$$\langle \psi \leq \psi_1 + \psi_2 \quad [3]$$

где  $\Psi$  — угол захвата материала, град;  
 $\psi_1$  — угол трения материала по поверхности матрицы, град;  
 $\psi_2$  — угол трения материала по поверхности вала, град.

Из выше изложенного следует, что производительность гранулятора с кольцевой матрицей может быть определена по уравнению:

$$G = 2\pi \cdot R \cdot B \cdot h_{\text{сл}} \cdot \gamma_{\text{м}} \cdot Z \cdot \omega, \text{ кг/сек} \quad [4]$$

где  $R$  — внутренний радиус матрицы, м;  
 $B$  — ширина матрицы, м;  
 $h_{\text{сл}}$  — высота слоя захватываемого материала, м;  
 $\gamma_{\text{м}}$  — насыпная масса материала, кг/м<sup>3</sup>;  
 $Z$  — число валков, шт.;  
 $\omega$  — угловая скорость матрицы, рад/сек.

При максимальной величине зазора между валками и матрицей будет минимальная затрата энергии на сжатие материала до плотности гранулята дрожжей, т. к. при малой высоте слоя дуга захвата  $A_2 B_3$  уменьшится и плотность материала также уменьшится. В этом случае большая часть энергии затрачивается на повторное сжатие материала и производительность пресса падает, а затраты энергии возрастают. Кроме того, при большом зазоре давление прессования уменьшается и продукт наматывается на прессующие валки, что может привести к поломке пресса. Оптимальным будет такой зазор, при котором кольцевой слой материала на внутренней поверхности матрицы расширяется незначительно и не происходит дополнительное измельчение материала, в то же время достигается высокая производительность гранулятора. Величина этого зазора определяется для каждого конкретного материала экспериментально.

## Роль фактора времени в процессе прессования и его влияние на качество гранул.

Так как во всех реальных телах процессы деформации протекают во времени, то необходимо выяснить влияние времени на процесс гранулирования гидролизных дрожжей. В процессе прессования происходит переход материала из сыпучего состояния в тестообразную упруго-вязкую массу, которая рассматривается нами как сплошная среда — дрожжевой гранулят. Характер течения дрожжевого гранулята в каналах матрицы и качество гранул зависит от его релаксационных свойств. Равновесное состояние во время приложения нагрузки к спрессованному материалу в рабочих каналах матрицы достигается не мгновенно, а по истечении некоторого промежутка времени, необходимого для перемещения молекул из исходного положения в конечное. Это время соответствует периоду релаксации напряжений в материале. Время нахождения материала в каналах матрицы зависит от ее скорости вращения. Чем большая скорость вращения матрицы, тем меньшее время находятся гранулы в рабочих каналах матрицы, тем менее прочные гранулы. Поэтому выбор скорости вращения матрицы для данного материала имеет весьма важное значение, так как от нее зависит не только сложность конструкции и долговечность работы пресса, но и качество готовых гранул. Прочность гранул с увеличением диаметра рабочих каналов матрицы уменьшается, поэтому для получения прочных гранул с минимальным количеством крошки необходимо, чтобы с увеличением диаметра гранул от  $d_1$  до  $d_2$  сохранялось соотношение:

$$d_1^3 \cdot \omega_1 = d_2^3 \cdot \omega_2 \quad [5]$$

где  $\omega$  — угловая скорость матрицы, рад/сек.

Учитывая физические особенности лепесткообразных и порошкообразных дрожжей, необходимую скорость вращения матрицы (скорость прессования), можно определить экспериментально. Она должна быть такой, чтобы время пребывания гранулята дрожжей в каналах матрицы было достаточным для релаксации напряжений, возникающих при прессовании материала.

## III. ПРОГРАММА И МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Программа предусматривала следующие взаимосвязанные стадии развития исследований.

I стадия — Исследование дисперсного состава и гигроскопических свойств сухих гидролизных дрожжей для характеристики исходного материала.

II стадия — Постановка поисковых опытов с целью выяснения принципиальной возможности гранулирования лепесткообразных и порошкообразных дрожжей.

III стадия — Исследование релаксационных свойств гранулята дрожжей с целью определения минимального периода времени пребывания его в каналах матрицы в процессе прессования для получения качественных гранул.

IV стадия — Получение гранулированных дрожжей в лабораторных и производственных условиях и исследование структурно-механических свойств гранул, полученных при различных параметрах гранулирования, с целью выяснения рациональных способов бестарного транспортирования, хранения и измельчения гранул.

V стадия — Исследование гигроскопических свойств гранул в зависимости от различных параметров окружающего воздуха (температуры и относительной влажности), с целью выяснения безопасных сроков их бестарного хранения.

VI стадия — Составление математической модели для установления взаимосвязи основных входных (факториальных) и выходных (результативных) параметров, определяющих процесс гранулирования гидролизных дрожжей, с целью оптимизации процесса гранулирования.

Для реализации VI стадии исследования экспериментальные работы были разделены на следующие этапы.

I этап — Постановка отсеивающих экспериментов в целях выделения существенно влияющих на процесс параметров **и** взаимодействий.

2 этап — Количественная оценка взаимосвязи выделенных входных (возмущающих) воздействий на выходные параметры при избранном критерии эффективности реализуемого процесса.

3 этап — Постановка эксперимента, включающего 16 опытов, составляющего полуреплику от полного факторного эксперимента типа  $2^5$ . Математическо-статистическое обобщение экспериментальных данных (в виде регрессионного соотношения между входными и выходными параметрами) для обоснования основных конструктивно-технологических параметров, при которых достигается наиболее рациональная в технико-экономическом отношении эффективность процесса.

4 этап — Постановка эксперимента по плану На<sub>5</sub> (Хартли), близкому к Д-оптимальному для получения математического описания процесса гранулирования гидролизных дрожжей и установления дискретных областей использования совместно управляемых факторов, удовлетворяющих оптимальным условиям ведения процесса.

VII стадия — Экспериментальная проверка в производственных условиях соответствия полученной модели описываемому процессу и оценка обоснованности предлагаемых рекомендаций.

VIII стадия — Разработка принципиальной технологической схемы гранулирования и бестарного хранения дрожжей применительно к Волгоградскому гидролизному заводу и расчет ее экономической эффективности.

В первом приближении протекание процесса гранулирования гидролизных дрожжей в каналах матрицы можно рассматривать состоящим из двух видов деформаций — упругой и пластической, которые зависят от температуры и влажности дрожжевого гранулята, а также от скорости прессования. В канале матрицы гранулят подвергается объемному деформированию со сжимающими напряжениями. Поэтому релаксацию напряжения в грануляте исследовали при его всестороннем сжатии в замкнутом цилиндре (матрице), т. е. в наибольшем приближении к реальным условиям. В соответствии с этапами гранулирования по разработкам кафедры МЖФ ЛСХИ (г. Ленинград) и ГСКБ по машинам для приготовления витаминизированных кормов (г. Вильнюс) была изготовлена опытная установка производственного типа для гранулирования дисперсных материалов, на которой проводили исследование процесса гранулирования гидролизных дрожжей на опытно-экспериментальной базе Вильнюсского НИИ земледелия и животноводства «Маджунай».

При проведении опытов использовали серийно выпускаемые матрицы с диаметром рабочих отверстий 6, 8, 10, 12, 14 и 16<sup>-3</sup>м. Скорость вращения матрицы изменяли с помощью вспомогательного редуктора 7.

#### Техническая характеристика установки

Внутренний диаметр матрицы —	0,34 м;
диаметр прессующих валков —	0,13 м;
число прессующих валков —	2 шт.;
мощность гл. электродвигателя —	55 квт.

Источником пара служили два скоростных электрических котла с автоматическим управлением производительностью 15 кг/час пара каждый и рабочим давлением до 5,0 бар.

Экспериментальная установка состоит из следующих основных узлов. (рис. 2): редуктора 6, вспомогательного редуктора 7, дозатора с редуктором и вариатором 1, смесителя с

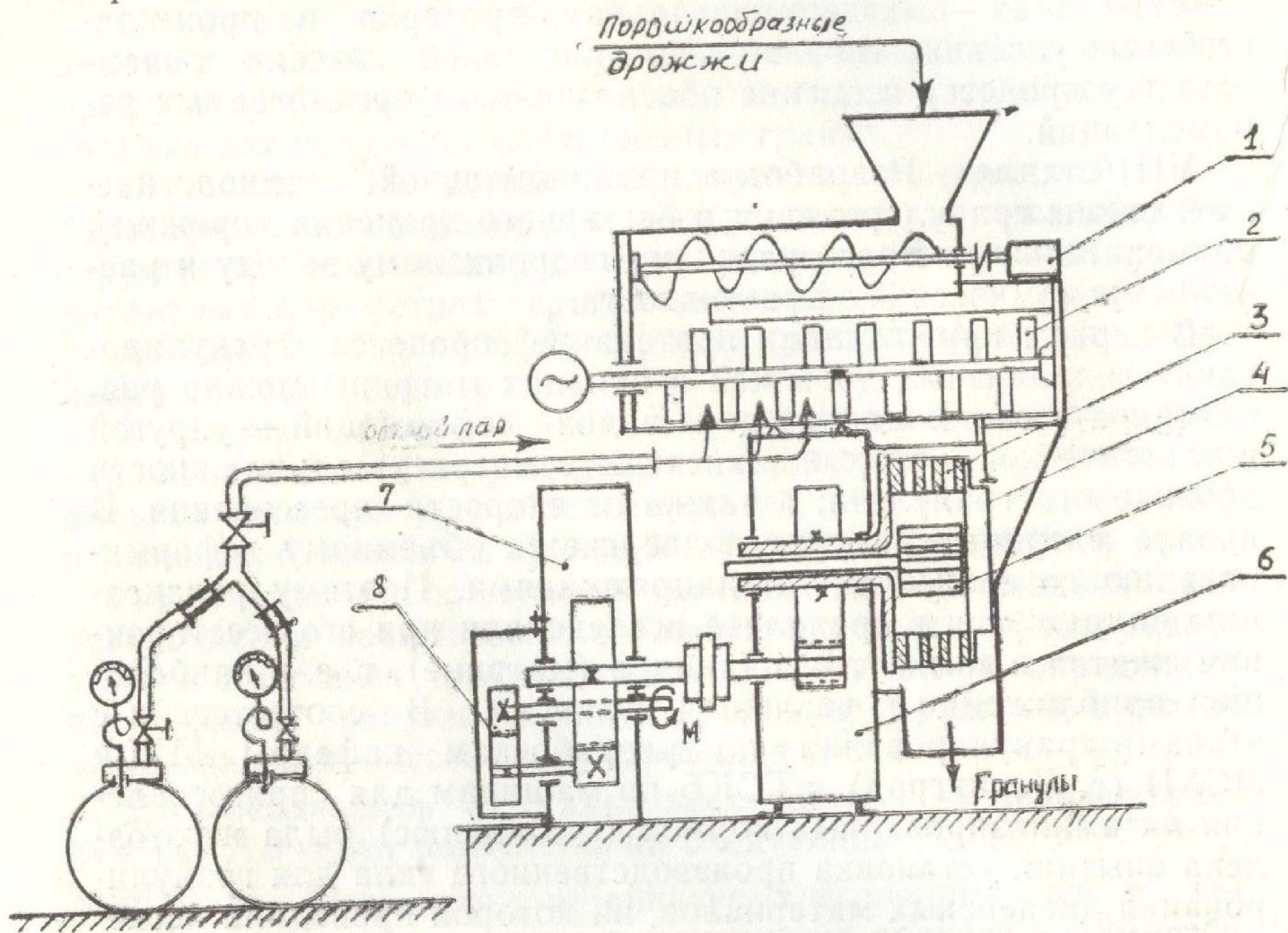


Рис. 2. Схема экспериментальной полупроизводственной установки для гранулирования гидролизных дрожжей.

электродвигателем 2, коробки передач 8, главного приводного электродвигателя, прессующего узла 3, бункера, двух паровых электрических котлов.

Зазор между прессующими валками и матрицей устанавливали на неработающем грануляторе перед проведением опыта. Мощность, потребляемую прессом гранулятором, и мощность холостого хода замеряли с помощью прибора К-51. Мощность, потребляемую на гранулирование дрожжей находили по формуле:

$$N_{гр} = N_{об} - N_{хх}, \text{ кВт} \quad [6]$$

где  $N_{гр}$  — удельный расход электроэнергии, кВт;  
 $N_{об}$  — общая потребляемая мощность, кВт;  
 $N_{хх}$  — мощность холостого хода, кВт.

Удельный расход электроэнергии.

Крошимость гранул определяли во вращающемся параллелепипеде ( $300 \times 300 \times 150$  мм) при угловой скорости вращения 5,23 рад/сек в течение 10 мин. Результаты экспериментов обрабатывали методами математической статистики. При обработке результатов многофакторного планирования экспериментов использовали математический аппарат регрессионного анализа.

#### IV. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ГРАНУЛИРОВАНИЯ ГИДРОЛИЗНЫХ ДРОЖЖЕЙ

##### Исследование дисперсного состава и гигроскопических свойств сухих гидролизных дрожжей

По результатам ситового анализа установлено, что около 80% частиц лепесткообразных дрожжей имеют средневзвешенный размер  $3 \cdot 10^{-3}$  м и 50% из них не более  $1,5 \cdot 10^{-3}$  м остальные 20% представляют собой частицы лепесткообразной формы с линейными размерами от 3,5 до  $15 \cdot 10^{-3}$  м.

Микроскопические исследования показали, что сухие порошкообразные дрожжи представляют собой образование сферической формы с размерами отдельных частиц от 4,5 до 68,5 мкм. Средний арифметический размер частиц 27,9 мкм. Насыпная масса лепесткообразных и порошкообразных дрожжей — величина не постоянная и зависит от влажности. С ростом влажности от 6,5 до 12,0% насыпная масса изменяется с 450 до 520 кг/м<sup>3</sup> у порошкообразных и с 325 до 455 кг/м<sup>3</sup> у лепесткообразных. Коэффициент их внутреннего трения также зависит от влажности и колеблется в пределах 1,22—1,26 у порошкообразных и 5,8—7,7 у лепесткообразных. Сухие гидролизные дрожжи являются весьма гигроскопичным материалом и могут терять или поглощать влагу в зависимости от изменения температуры и относительной влажности воздуха. При этом будет изменяться и количество влаги, добавляемой к дрожжам до гранулирования.

Время достижения равновесной влажности их зависит от температуры и относительной влажности воздуха и составляет 5—10 суток.

## Исследование влияния некоторых технологических параметров на эффективность гранулирования рассыпных дрожжей

В данном разделе работы нами было изучено влияние кондиционирования рассыпных дрожжей водяным паром до пресования, диаметра рабочих каналов матрицы, скорости пресования и величины зазора между валками матрицей на технологическую эффективность гранулирования дрожжей.

Кондиционирование осуществлялось вводом насыщенного водяного пара (3,0 бар) через окна смесителя пресса, в котором во взвешенном состоянии находились дрожжи, непрерывно подаваемые дозатором пресса. На 100 кг дрожжей вводили 2 кг пара общим теплосодержанием 2,7 кдж/кг. Температура дрожжей после кондиционирования водяным паром повышалась на 295—298 К, что не оказывало какого-либо отрицательного действия на кормовую ценность дрожжей. Влажность дрожжей определяли экспресс-методом с помощью влагомера ВТМ-1. Регулируя подачу пара в смеситель, влажность рассыпных дрожжей до гранулирования изменяли от 7,0 до 16,0%. Анализируя кривую зависимости производительности от выше указанных параметров (рис. 3), можно отметить увеличение производительности гранулятора в области от 7,0 до 12,0%. С увеличением влажности биомассы от 7,0 до 12,0% снижается крошимость и повышается плотность гранул. Дальнейшее увлажнение дрожжей отрицательно сказывается на эффективности процесса гранулирования — снижается производительность пресса и увеличивается крошимость гранул. Исследование влияния размеров рабочих отверстий матрицы на производительность пресса и качество гранул показало, что с увеличением диаметра рабочих отверстий матрицы производительность пресса увеличивается, но при этом снижаются качественные показатели гранул — их плотность и крошимость. Плотность уменьшается до 1200 кг/м<sup>3</sup>, крошимость достигает 2,6%. Более высокие технологические показатели были получены при гранулировании дрожжей на матрице с диаметром рабочих отверстий 0,0010 м.

Величину рабочего зазора в опытах устанавливали от 0,36 до  $1,2 \cdot 10^{-3}$  м. Гранулирование дрожжей влажностью 12—13% проводили на матрицах с диаметром рабочих отверстий 0,0010 м при числе оборотов 40 рад/сек. Из представленных графиков на рис. 3 видно, что производительность пресса при изменении величины рабочего зазора между валками и матри-

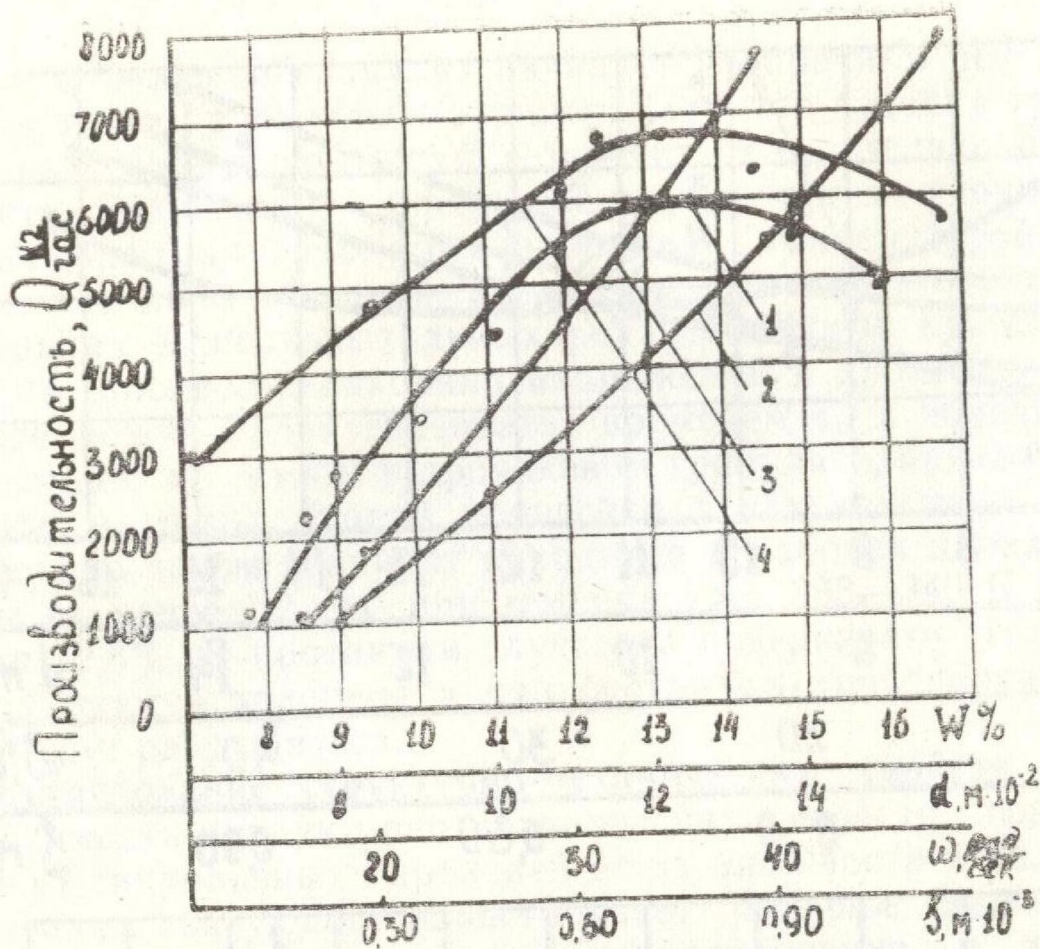


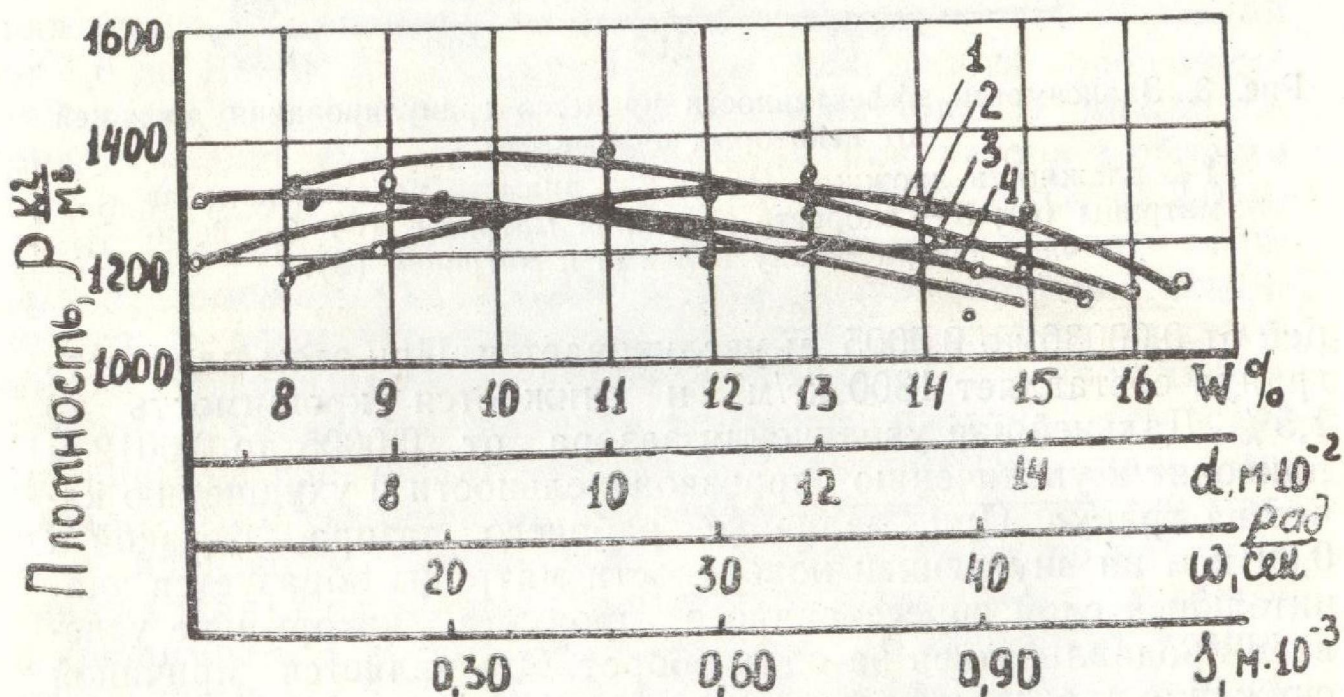
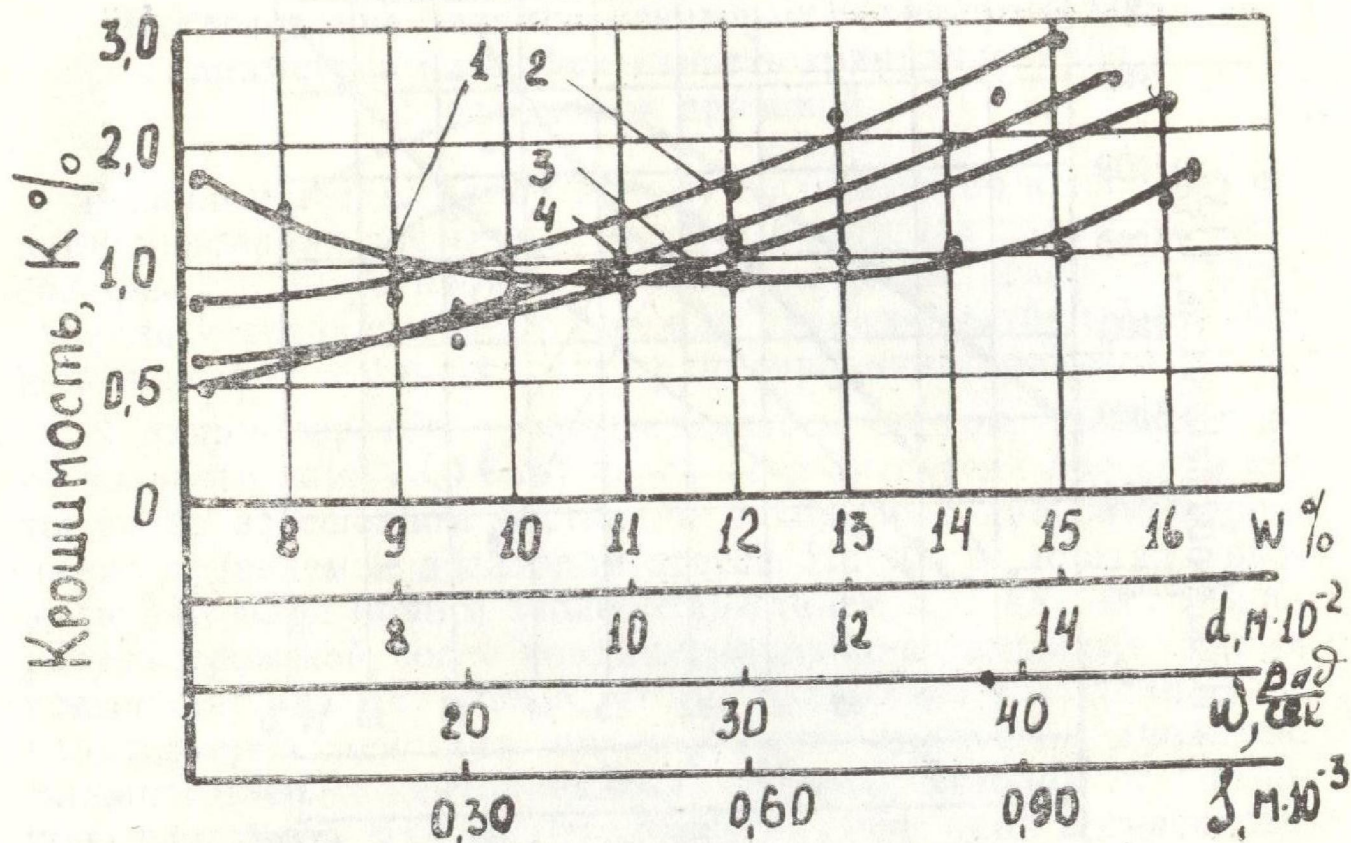
Рис. 3. Зависимость эффективности процесса гранулирования дрожжей от некоторых параметров.

1 — влажность дрожжей (W%); 2 — диаметр рабочих каналов матрицы (d); 3 — скорость вращения матрицы (ω); 4 — величина зазора между валками и матрицей (S).

цей от 0,00036 до 0,0005 м увеличивается. При этом плотность гранул составляет 1300 кг/м<sup>3</sup> и снижается крошимость до 1,5%. Дальнейшие увеличения зазора от 0,0005 до 0,0012 м приводят к увеличению производительности и ухудшению качества гранул. При величине рабочего зазора, близкой к 0,0012 м на внутренней поверхности матрицы образуется значительный слой спрессованного продукта, который не успевает продавливаться за один оборот. Это является причиной снижения производительности гранулятора.

Таким образом, результаты однофакторных экспериментов позволили установить, что выше указанные параметры оказывают существенное влияние на эффективность процесса гранулирования дрожжей. Влияние этих параметров на процесс гранулирования рассматривалось нами обособленно, без их взаимодействий и без взаимосвязи с другими параметрами (интенсивность загрузки пресса, расположение крестовины прессующих валков, физико-механические свойства материа-

с. в. 12116/012117



ла, температура и время нахождения материала в зоне прессования, угол наклона образующей питающего приемника, расположение оси рабочих отверстий к радиусу матрицы и т. п.), так же сильно влияющих на процесс гранулирования.

Релаксационные свойства гранулята гидролизных дрожжей. В зоне прессования в результате сжатия кондиционированные рассыпные дрожжи превращаются в сплошную среду — дрожжевой гранулят. Под действием приложенного дав-

ления дрожжевой грануляты начинает необратимо деформироваться и течь в каналы матрицы. Характер течения гранулята и качество готовых гранул зависит от его релаксационных свойств. Релаксация напряжений определяется структурным состоянием гранулята, его влажностью, температурой, величиной начального напряжения и скоростью прессования.

Анализ экспериментальных релаксационных кривых показал, что процесс релаксации напряжений в дрожжевом грануляте можно характеризовать временем  $\tau_p$  и конечным напряжением  $\sigma_k$ . Чтобы в дрожжевом грануляте, находящемся в канале матрицы, успели произойти релаксационные процессы, нужно чтобы грануляты находились в рабочих каналах матрицы не менее 1,2 сек. при температуре 333—343 К и влажности 12,8%. В противном случае на поверхности гранул образуются трещины и при бестарном транспортировании они будут разрушаться.

**Исследование структурно-механических свойств гранул.** Зависимость структурно-механических свойств гранулированных гидролизных дрожжей от их влажности и количества введенных связующих веществ имеет большое значение для выбора способа бестарного транспортирования и хранения гранул.

Гранулирование рассыпных гидролизных дрожжей проводили на лабораторном прессе-грануляторе и в производственных условиях на прессах грануляторах ДГ-1 и С/125. Для выяснения влияния водяного пара и связующего вещества на качественные показатели гранулированных гидролизных дрожжей были проведены исследования их прочностных свойств: ударной прочности, когезии, крошимости и прочности при статическом нагружении. Экспериментальные данные, характеризующие прочностные свойства гранулированных дрожжей представлены в табл. 1, 2.

Таблица 1

Ударная прочность гранул, полученных с применением водяного пара (дж/кг)

Влажность гранул, %	Лепесткообразные дрожжи		Порошкообразные дрожжи	
	диаметр гранул, м			
	0,005	0,009	0,005	0,009
8,20	300	90	380	150
9,10	390	175	450	200
10,20	500	200	580	290
10,8	600	250	690	300
12,1	700	280	750	350

Крошимость гранул, полученных с применением пара (%)

Влажность гранул, %	Лепесткообразные дрожжи		Порошкообразные дрожжи	
	диаметр гранул М			
	0,005	0,009	0,005	0,009
8,00	1,50	2,00	1,35	1,80
9,10	1,32	1,80	1,20	1,62
10,0	1,25	1,60	1,10	1,55
11,1	1,15	1,50	1,00	1,40
12,1	1,00	1,40	1,00	1,30
13,2	1,00	1,35	1,00	1,25

Из таблиц 1, 2 видно, что ударная прочность гранул с увеличением влажности возрастает, а крошимость их понижается. Данные по статической прочности гранул позволяют судить об условиях их хранения в емкостях силосного типа.

Математическая обработка экспериментальных данных позволила установить, что когезия (К) гранул изменяется по параболическому закону:

$$K = 0,167 + 0,418W - 0,022W^2. \quad [7]$$

где W — влажность гранул, %.

Экспериментальные кривые, характеризующие гигроскопические свойства гранул при относительной влажности воздуха  $\varphi = 90\%$  и температуре  $T = 303\text{ К}$  представлены на рис. 4, 5. Исследования показали, что через 20 суток хранения на их поверхности образуются продольные и поперечные микротрещины. В отличие от рассыпных дрожжей на интегральных и дифференциальных кривых сорбции гранулами к этому моменту времени появляется второй «максимум», что свидетельствует о резком повышении поглощения влаги гранулами.

Следовательно, хранение гранул при высокой относительной влажности и температуре воздуха по истечении 20 суток отрицательно сказывается на их качестве.

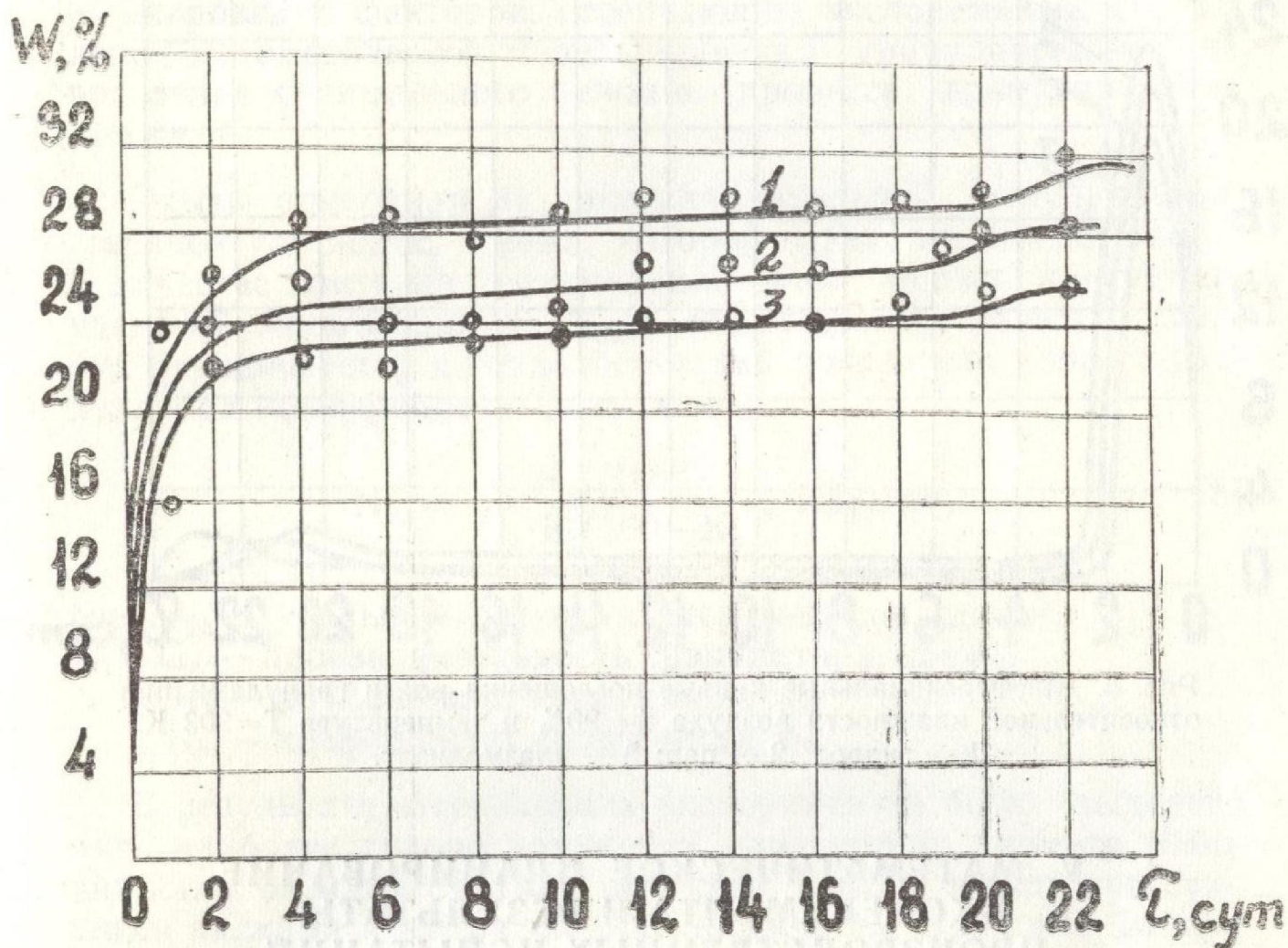


Рис. 4. Интегральные кривые поглощения влаги при относительной влажности  $\phi=90\%$  и температура  $T=303\text{ K}$ .  
1 — гидрол; 2 — пар; 3 — плазмолизат.

Анализ экспериментальных данных по структурно-механическим и гигроскопическим свойствам гранулированных гидролизных дрожжей показал, что гранулы полученные при оптимальном сочетании технологических параметров, обладают высокой ударной прочностью и низкой крошимостью. Это позволяет осуществить операции по многократному перемещению гранул в процессе бестарного хранения и транспортирования на оборудовании, используемом в комбикормовой промышленности.

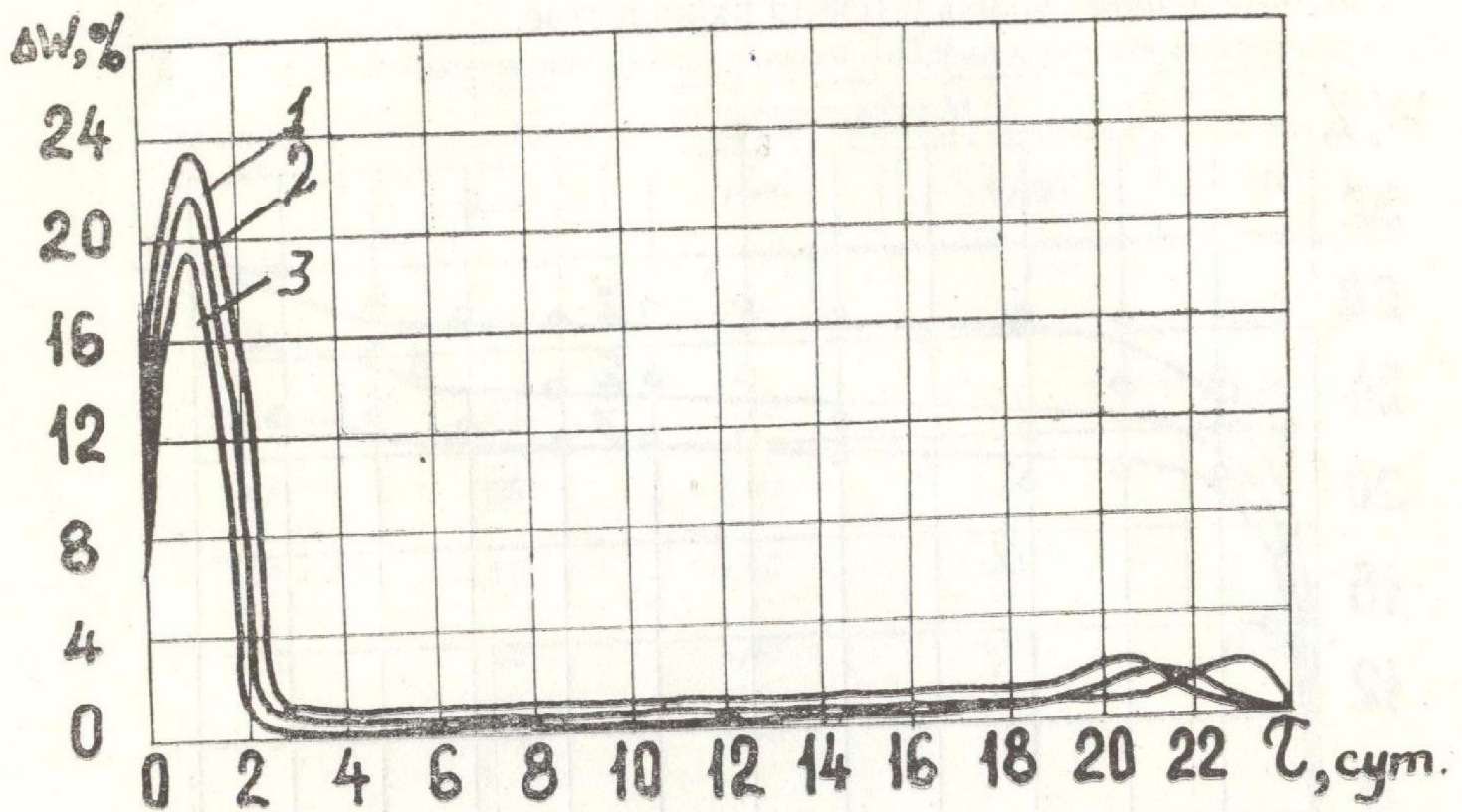


Рис. 5. Дифференциальные кривые поглощения влаги гранулами при относительной влажности воздуха  $\psi=90\%$  и температуре  $T=303\text{ К}$ .  
1 — гидролизат; 2 — пар; 3 — плазмолизат.

## V. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА И РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ

В соответствии с основной целью исследования процесса гранулирования гидролизных дрожжей основные требования, предъявляемые к оптимизации процесса гранулирования, сводятся к следующему:

а) производство заданного количества гранул, обладающих определенными прочностными показателями при высокой производительности пресса, минимальном расходе электроэнергии и пара;

б) гранулированные дрожжи не должны ухудшить свои питательные свойства в процессе гранулирования.

Выполненные экспериментально теоретические исследования показали, что на эффективность процесса гранулирования гидролизных дрожжей оказывают влияние большое количество факторов, действующих одновременно, отыскание опти-

мального сочетания которых является весьма сложной многофакторной экстремальной задачей. Для решения этой задачи был использован метод математического планирования эксперимента. Планирование эксперимента включает априорное ранжирование факторов, отсеивающие эксперименты, составление математической модели процесса гранулирования, определение оптимального режима процесса гранулирования дрожжей.

Опыты проводили на экспериментальной полупроизводственной установке, схема которой представлена на рис. 2. В качестве критерия оптимизации был принят показатель удельной энергоемкости ( $N_{уд}$ ), учитывающий качество гранул (крошимость) и технологический показатель пресса-гранулятора (коэффициент грануляции).

$$N_{уд} = \frac{N_{гр} \cdot 10^{-4}}{G_r \cdot K_r (100 - K_p)}, \text{ Кдж/кг,} \quad [8]$$

где  $N_{уд}$  — удельный расход электроэнергии, кдж/кг;

$G_r$  — производительность гранулятора, кг/сек;

$K_r$  — коэффициент грануляции, %;

$K_p$  — коэффициент крошимости, %.

В результате отсеивающих экспериментов было выделено пять наиболее сильно влияющих параметров: диаметр рабочих каналов матрицы ( $X_3$ ), величина зазора между прессующими валками и матрицей ( $X_8$ ), влажность дрожжей до гранулирования ( $X_2$ ), скорость вращения матрицы ( $X_5$ ), угол наклона образующей питающего приемника ( $X_4$ ). Для отыскания оптимального сочетания выделенных параметров, при котором критерий оптимизации  $N_{уд}$  был бы минимальным при заданной производительности гранулятора был проведен эксперимент, включающий сначала 16 опытов, составляющих полуреплику от полного факторного эксперимента типа  $2^5$  с определяющим контрастом  $J = X_3 X_8 X_2 X_5 X_4$  и генерирующим соотношением  $X_4 = X_3 X_8 X_2 X_5$ , а также выполнена программа крутого восхождения по поверхности отклика. В результате реализации матрицы планирования и программы крутого восхождения по поверхности отклика была получена линейная модель процесса гранулирования гидролизных дрожжей, которая оказалась неадекватной реальному процессу. Пользуясь принципом последовательного усложнения модели для опи-

сания и исследования области оптимума, было проведено исследование по плану  $N_{a5}$  (Хартли), близкому к Д-оптимальному. В ходе эксперимента была реализована матрица выбранного плана. Коэффициенты регрессии были вычислены на ЭВМ «Минск-32». В результате реализации этого плана получили полином второй степени (9). Это уравнение выражает зависимость удельной энергоемкости процесса гранулирования дрожжей от влияния наиболее значимых факторов ( $X_3$ ,  $X_8$ ,  $X_2$ ,  $X_5$ ,  $X_4$ ) и является математической моделью процесса гранулирования гидролизных дрожжей при данных условиях.

$$\begin{aligned} \hat{y} = & 110 - 31,6x_3 + 4,0x_8 + 2,1x_2 - 2,6x_5 - 1,5x_4 - \\ & - 0,3x_3x_8 + 1,84x_3x_2 - 1,5x_3x_5 - 0,8x_3x_4 - 1,0x_8x_2 + \\ & + 0,45x_8x_5 - 1,0x_8x_4 - 1,45x_2x_5 - 1,5x_2x_4 - 0,13x_5x_4 + \\ & + 10x_{3-3}^2 + 2,26x_{8-8}^2 - 6,7x_{2-2}^2 + 2,3x_{5-5}^2 + 3,26x_{4-4}^2 \end{aligned} \quad [9]$$

При исследовании области оптимума была определена геометрическая форма поверхности отклика, для чего было проведено каноническое преобразование уравнения регрессии (7).

Методом перебора комбинаций независимых переменных с квантованием их с выбранным шагом удалось определить численные оптимальные значения независимых параметров. При диаметре рабочих каналов матрицы ( $X_3$ ) — 0,012 м величине зазора между валками и матрицей ( $X_8$ ) — 0,00075 м, влажности дрожжей до гранулирования ( $X_2$ ) — 12,0%, угле обрабатываемой питающего приемника ( $X_5$ ) — 90°, скорости вращения матрицы ( $X_4$ ) — 25 рад/сек, удельный расход электроэнергии составил — 74,5 Кдж/кг.

Режим работы гранулятора, полученный при оптимальном сочетании факторов, был проведен в производственных условиях на прессе-грануляторе Сенчьюри—125. Полученные значения расхода электроэнергии  $N_{уд} = 40—60$  Кдж/кг, показало, что величина критерия оптимизации, достигнутая в опытах, незначительно отличается от расчетного по уравнению (9), а полученные гранулы удовлетворяют условиям бестарного способа хранения и транспортирования.

### Выводы и предложения

Выполненные теоретические и экспериментальные исследования процесса гранулирования гидролизных дрожжей позволяют сделать следующие выводы и предложения:

1. Порошкообразные и лепесткообразные гидролизные дрожжи являются гигроскопичным материалом. Время достижения равновесной влажности их зависит от температуры и относительной влажности воздуха и составляет 5—10 суток. При увеличении относительной влажности воздуха равновесная влажность дрожжей возрастает.

2. На основании анализа физико-механических свойств рассыпных гидролизных дрожжей и конструкций существующих прессов-грануляторов предложено гранулировать дрожжи на прессах с кольцевой матрицей. Процесс гранулирования не оказывает отрицательного действия на кормовую ценность дрожжей.

3. Устанавливаемые на отечественные прессы-грануляторы конусные питающие приемники не обеспечивают равномерной подачи материала в зону прессования. Цилиндрический питающий приемник позволит значительно улучшить равномерную подачу материала в зону прессования и повысить производительность гранулятора.

4. Процесс гидро-термической подготовки материала до гранулирования является необходимым условием как для снижения энергозатрат, так и для повышения производительности пресса и улучшения качества гранул. С увеличением влажности и температуры ускоряются релаксационные процессы в грануляте дрожжей, увеличивается его пластичность, уменьшаются силы трения, что приводит к росту производительности гранулятора. Для получения качественных гранул рассыпные дрожжи до гранулирования должны быть нагреты до температуры 320—330 К и иметь влажность не менее 12,0%. При этом минимальный период пребывания гранул в каналах матрицы должен быть не менее 1,2 сек.

5. Гранулированные гидролизные дрожжи, полученные с применением водяного пара, или связующих веществ (гидрола, плазмолизата), обладают высокой механической прочностью, позволяющей хранить их в емкостях силосного типа и неоднократно транспортировать внутрицеховым транспортом. При этом время достижения равновесной влажности гранулами зависит от температуры и относительной влажности воздуха и составляет 17—26 суток.

6. Применение метода многофакторного планирования экспериментов позволило получить математическую модель процесса гранулирования дрожжей, при помощи которой удалось выделить главные факторы, определяющие процесс гранулирования дрожжей и получить оптимальные их значения:

диаметр рабочих каналов матрицы — 0,012 м; рабочий зазор между прессующими валками и матрицей — 0,00075 м; влажность дрожжей до гранулирования — 12,0%; угловая скорость матрицы — 25 рад/сек; угол образующей питающего приемника — 90°. Удельный расход электроэнергии на образование гранул составляет 74,5 кдж/кг при производительности пресса-гранулятора 7 т/час.

7. В качестве параметров, по которым целесообразно стабилизировать оптимальный режим ведения процесса гранулирования дрожжей рекомендуется: расход пара — 2 кг на 100 кг дрожжей; давление пара 2—3 бар; влажность дрожжей до гранулирования — 12,0%, температура дрожжей до гранулирования 320—330 К.

8. Результаты исследования внедряются Ленинградским институтом ГИПРОБИОСИНТЕЗ при проектировании цехов гранулирования гидролизных дрожжей на вновь строящихся биохимических заводах.

9. В результате проведенных исследований для отраслевого стандарта ОТС-59 на «Дрожжи кормовые» рекомендованы следующие показатели: диаметр гранул — 0,012 м; влажность гранул — 9,0% крошимость гранул — 1,5—2,0% ударная прочность гранул — 780 дж/кг;

10. Годовая экономия от внедрения гранулирования и безтарного хранения гидролизных дрожжей применительно к Волгоградскому биохимическому заводу производительностью 10 тыс. тонн в год составит 45 тыс. рублей.

#### **Основное содержание диссертации опубликовано в соавторстве в следующих работах:**

1. Дисперсная характеристика и гигроскопические свойства гидролизных дрожжей. «Мукомольно-элеваторная промышленность», 1971, № 1.

2. Зависимость релаксации напряжений от температуры и влажности гидролизных дрожжей. «Гидролизное производство», М., 1971, № 9.

3. Структурно-механические свойства гранул гидролизных дрожжей. Материалы XI Всесоюзной конференции «Механика сыпучих материалов», Одесса, 1971.

4. Производственные испытания по гранулированию сухих кормовых дрожжей. «Транспортировка и хранение кормовых дрожжей», М., 1971.

5. Прочностные свойства гранул гидролизных дрожжей. «Мукомольно-элеваторная и комбикормовая промышленность», М., 1972, № 11.

6. Отсеивающие эксперименты по выявлению значимых факторов, влияющих на процесс гранулирования кормовых дрожжей. «Хранение и переработка зерна», серия «Комбикормовая промышленность», М., 1972, вып. 2.

7. Применение экстремального эксперимента для оптимизации процесса гранулирования кормовых дрожжей. «Хранение и переработка зерна», серия «Комбикормовая промышленность», М., 1972, вып. 3.

8. Прочностные свойства гранул гидролизных дрожжей. «Хранение и переработка зерна», серия «Комбикормовая промышленность», М., 1972, № 4.

9. Исследование влияния технологических параметров на эффективность процесса гранулирования порошкообразных и лепесткообразных дрожжей. «Реферативная информация о законченных научно-исследовательских работах», Киев, 1973, вып. 7.

#### **Работа докладывалась и обсуждалась:**

1. На научно-технических конференциях Одесского технологического института пищевой промышленности им. М. В. Ломоносова в 1971, 1972.

2. На XI Всесоюзной конференции «Механика сыпучих материалов», Одесса, 1971.

3. На Всесоюзной научно-технической конференции ВНИИ комбикормовой промышленности «Перспективы развития комбикормовой промышленности», Воронеж, 1972.