

В. А. Афанасьев

**ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА
СПЕЦИАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ
ЗЕРНОВЫХ КОМПОНЕНТОВ
В ТЕХНОЛОГИИ КОМБИКОРМОВ**

Воронеж 2002

УДК 636.085.55

ББК 36.824

А 94

Афанасьев В. А. Теория и практика специальной обработки зер-
А 94 новых компонентов в технологии комбикормов. – Воронеж: Воро-
нежский государственный университет, 2002. – 296 с.

ISBN 5-9273-0184-3

В книге представлены научные данные о методах обработки зерновых компонентов с целью повышения их питательности при производстве комбикормов, предназначенных в первую очередь для молодняка сельскохозяйственных животных, а также домашних животных, рыб, пушных зверей и др.

Рассмотрены с теоретической точки зрения основы теплообмена при различных способах подвода тепла, приведены результаты экспериментальных исследований и производственных испытаний установок для обработки зерна различными способами. Всего исследовано десять способов обработки зерна: токами высокой частоты, конвективный (горячим воздухом), кондуктивный (поджариванием), конвективно-кондуктивный, микронизация (обработка инфракрасными лучами), пропаривание, пропаривание с поджариванием, пропаривание с плющением, экструдирование компонентов и экспандирование комбикормов. Материалы включают исследования теплофизических, технологических, биохимических и микробиологических показателей, изменение структуры зерна с помощью электронного сканирующего микроскопа, а также результаты зоотехнических исследований.

Автор выражает большую благодарность сотрудникам – Орлову А. И., Лищицкой Н. В., Бойко Л. Я., Любимову С. П. и др., принимавшим участие в проведении исследований и оформлении книги.

Книга предназначена для научных работников, студентов и специалистов в области производства комбикормов.

Библиография – 266 названий.

ISBN 5-9273-0184-3

© Афанасьев В. А., 2002

© Воронежский
государственный
университет, 2002

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	7
Глава 1. КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ СПЕЦИАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ЗЕРНА И КОМБИКОРМОВ	9
Глава 2. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЗЕРНА С ВОДОЙ	14
2.1. Экспериментальные исследования взаимодействия зерна с водой	18
Глава 3. ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ЗЕРНА ТОКАМИ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ	24
3.1. Влияние ТВЧ-обработки на биохимические свойства зерна ...	24
Глава 4. ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ЗЕРНА КОНВЕКТИВНЫМ МЕТОДОМ	27
4.1. Основы теплообмена в слое зерна при конвективном нагреве	27
4.1.1. Элементарный слой	27
4.1.2. Толстый слой	28
4.2. Изменение температуры зерна в процессе нагрева	31
4.3. Изменение технологических свойств зерна	32
4.4. Влияние тепловой обработки нагретым воздухом на показатели качества зерна	33
4.4.1. Степень декстринизации крахмала	33
4.4.2. Содержание глюкозы и клетчатки	34
4.4.3. Переваримость крахмала (in vitro)	35
4.4.4. Переваримость протенна (in vitro)	37
Глава 5. ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ЗЕРНА КОНДУКТИВНЫМ МЕТОДОМ	41
5.1. Основы теплообмена в слое зерна при кондуктивном нагреве	41
5.2. Изменение температуры при обработке зерна кондуктивным методом	49
5.3. Влияние поджаривания на углеводный комплекс ячменя	53
5.4. Влияние тепловой обработки поджариванием на декстринизацию крахмала	53
5.5. Влияние тепловой обработки поджариванием на белковый комплекс ячменя	59
5.6. Влияние поджаривания на микроструктуру зерна ячменя	60
Глава 6. ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ЗЕРНА КОНВЕКТИВНО- КОНДУКТИВНЫМ МЕТОДОМ	63
6.1. Изменение температуры в процессе нагрева и охлаждения зерна при конвективно-кондуктивном методе	63
6.2. Влияние конвективно-кондуктивного нагрева на физические свойства и показатели качества зерна	70

6.3.	Обработка зерна конвективно-кондуктивным методом в обжарочных агрегатах	72
6.4.	Влияние обработки зерна в барабанном обжарочном агрегате на его микробиологические показатели	82
Глава 7.	ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ЗЕРНА МЕТОДОМ МИКРОНИЗАЦИИ	84
7.1.	Математическая модель нагрева зерна при микронизации	91
7.2.	Расчет необходимой длительности ИК-обработки зерна	93
7.3.	Механизм деформации зерна при интенсивной тепловой обработке	95
7.4.	Ориентировочный расчет давления внутри зерновки при взрыве в условиях микронизации и механизм взрыва	96
7.5.	Термораднационные и оптические характеристики зерна ячменя	100
7.6.	Процесс ИК-нагрева зерна ячменя	110
7.6.1.	Влияние плотности падающего потока излучения на процесс ИК-нагрева зерна ячменя	110
7.6.2.	Выбор оптимальной плотности падающего потока излучения при ИК-обработке ячменя	111
7.6.3.	Выбор оптимальной плотности падающего потока излучения при микронизации зерна ячменя	113
7.7.	Влияние толщины и состояния слоя зерна ячменя на процесс ИК-нагрева	115
7.8.	Кинетика обезвоживания зерна в процессе ИК-нагрева	117
7.9.	Изменение углеводного комплекса зерна ячменя при ИК-нагреве	118
7.9.1.	Влияние ИК-нагрева на степень декстринизации крахмала зерна ячменя	118
7.10.	Влияние ИК-нагрева зерна ячменя на переваримость крахмала (in vitro)	126
7.11.	Влияние ИК-нагрева на изменение содержания восстанавливающих сахаров в зерне ячменя	128
7.12.	Изменение белкового комплекса зерна ячменя при ИК-нагреве	129
7.13.	Влияние ИК-нагрева на изменение физико-химических свойств зерна ячменя	135
7.14.	Влияние ИК-нагрева на микроструктуру зерна ячменя	136
7.15.	Влияние ИК-нагрева на санитарное состояние ячменя	139
7.15.1.	Влияние ИК-нагрева на токсичность зерна ячменя	141
7.16.	Испытания цеха микронизации на Новобелицком КХН Беларуси	142
7.16.1.	Процесс ИК-нагрева зерна на микронизаторе MicroRed	143
7.16.2.	Влияние влаго- и влаготепловой обработки зерна на процесс микронизации	148

Глава 8.	ГИДРОТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ЗЕРНА МЕТОДОМ ПРОПАРИВАНИЯ	153
8.1.	Основы теплообмена в слое зерна при пропаривании	153
8.1.1.	Нагрев и увлажнение зерна при пропаривании	156
8.2.	Влияние пропаривания на углеводный комплекс зерна	159
8.2.1.	Влияние пропаривания на степень клейстеризации крахмала зерна	159
8.2.2.	Влияние пропаривания на степень декстринизации крахмала зерна	160
8.2.3.	Производство хлопьев из пропаренного зерна (флакирование)	162
8.2.4.	Влияние пропаривания и плющения на переваримость крахмала ячменя (<i>in vitro</i>)	163
8.2.5.	Переваримость крахмала хлопьев (<i>in vitro</i>) различной толщины	166
8.3.	Влияние пропаривания и плющения на белковый комплекс ячменя	167
8.3.1.	Влияние пропаривания и плющения на содержание и фракционный состав белка	167
8.3.2.	Влияние пропаривания и плющения на переваримость белков ячменя (<i>in vitro</i>)	167
8.4.	Влияние пропаривания на микроструктуру зерна ячменя	169
8.5.	Разработка, внедрение и испытания линии плющения на Варенском КХП Литовского ПО "Малиба"	170
8.5.1.	Описание и принцип работы линии плющения	170
8.5.2.	Испытания технологического оборудования линии плющения	175
Глава 9.	ГИДРОТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ЗЕРНА МЕТОДОМ ПРОПАРИВАНИЯ С ПОСЛЕДУЮЩИМ ПОДЖАРИВАНИЕМ	182
9.1.	Влияние пропаривания с последующим поджариванием на декстринизацию крахмала ячменя	182
9.2.	Влияние пропаривания с последующим поджариванием на биохимические свойства ячменя	187
9.3.	Влияние пропаривания с последующим поджариванием на микроструктуру зерна ячменя	187
9.4.	Испытания линии влаготепловой обработки зерна на Кузнецовском комбикормовом заводе	189
Глава 10.	ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ЗЕРНА И КОМБИКОРМОВ МЕТОДОМ ЭКСТРУДИРОВАНИЯ	193
10.1.	Некоторые вопросы теории одношнекового пресс-экструдера	198
10.2.	Технические характеристики экструдера КМЗ-2У	200
10.3.	Исследование режимов экструдирования неизмельченного ячменя при различных способах подготовки	202
10.4.	Процесс экструдирования измельченного ячменя	208

10.5.	Режимы экструдирования смеси ячменя и отрубей при различной подготовке	212
10.6.	Режимы экструдирования смеси компонентов, входящих в состав рецепта СК-II	223
10.7.	Режимы экструдирования зерновых компонентов, входящих в состав рецептов СК	227
10.8.	Влияние экструдирования на сохранность витаминов в зерновых компонентах комбикорма	231
10.9.	Влияние экструдирования на микробиологические показатели сырья и комбикормов	233
10.10.	Влияние экструдирования на микроструктуру зерна	236
10.11.	Режимы экструдирования кукурузы и пшеницы	238
10.12.	Испытания линии экструдирования зерновых компонентов на Кузнецовском комбикормовом заводе	241
Глава 11.	ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА КОМБИКОРМОВ МЕТОДОМ ЭКСПАНДИРОВАНИЯ	244
11.1.	Режимы экспандирования комбикормов	245
11.2.	Влияние экспандирования на биохимические показатели комбикормов	249
11.3.	Влияние экспандирования на санитарно-гигиенические и микробиологические показатели опытных партий комбикормов ..	251
11.4.	Аминокислотный состав комбикормов (опытных партий)	252
11.5.	Сохранность витаминов в опытных партиях комбикормов	254
Глава 12.	ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЖИВОТНЫМИ КОМБИКОРМОВ, ПОДВЕРГНУТЫХ СПЕЦИАЛЬНОЙ ОБРАБОТКЕ	255
12.1.	Эффективность использования поросятами раннего отъема комбикормов, включающих пропаренный, поджаренный, пропаренный с ИК-обработкой и микронизированный ячмень ..	255
12.2.	Эффективность использования поросятами-отъемышами комбикормов с экструдированной зерновой частью	257
12.3.	Эффективность использования комбикормов с зерновыми компонентами, подвергнутыми специальной обработке способами микронизации и экструдирования, при выращивании поросят	260
12.4.	Эффективность использования телятами комбикормов с зерновыми компонентами, подвергнутыми специальной обработке способами микронизации двойного гранулирования и экструдирования	262
12.5.	Эффективность использования экспандированных комбикормов цыплятами-бройлерами	266
ЛИТЕРАТУРА		281

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время в комбикормовой промышленности непрерывно повышаются требования к качеству комбикормов, усовершенствованию технологии, расширяется номенклатура сырья, ассортимент продукции.

Особые требования предъявляются к комбикормам для молодняка животных, ценных пород и молоди рыб, домашних животных и др. В монографии представлены данные по углубленной переработке зерновых компонентов и комбикормов с целью улучшения их питательности, вкусовых качеств, снижения расхода корма на единицу привеса, улучшения товарного вида, повышения санитарных показателей.

В структуре кормового баланса 50–80 % занимает зерно, поэтому повышение питательной ценности зернового сырья, несомненно, скажется на повышении усвояемости комбикорма.

Тепловая (специальная) обработка зерна повышает его питательную ценность за счет перевода сложных высокомолекулярных веществ в простые. Для молодняка животных, у которых слабо развита активность амилолитических ферментов, целесообразно преобразовывать крахмал в легкоусвояемые углеводы – декстрины, мальтозу, тем самым улучшая его переваримость. Предварительная тепловая обработка зерна, при которой часть процессов, в частности перевод части сложных веществ в простые, за счет термического гидролиза, проходит вне желудка животного, является несомненно необходимой.

Исследования по тепловой обработке сырья и комбикормов во ВНИИКП начались после того, как в начале 70-х годов на комбикормовых заводах, построенных при крупных свиноподкомплексах мощностью 108 тыс. свиней в год, были пущены в эксплуатацию линии поджаривания зерна итальянской фирмы Джи-э-Джи.

В данной книге представлены следующие методы обработки зерна теплом: нагрев горячим воздухом (конвективный), поджариванием на металлической поверхности (кондуктивный), конвективно-кондуктивный, обработка ИК-лучами (микронизация), пропаривание, пропаривание с последующим поджариванием, пропаривание с плющением, экструдирование, а также экспандирование комбикормов. Нами предложена схема классификации методов тепловой обработки зерна и комбикормов.

Критериями оценки каждого способа обработки служили изменение свойств крахмала (степень декстринизации и клейстеризации, его переваримость), белка (переваримость белка, его фракционный состав), инактивация антипитательных факторов, санитарные показатели, а также привесы живот-

ных, затраты корма, издержки производства. При этом должны быть найдены оптимальные значения, так как жесткие режимы обработки отрицательно сказываются на белковом комплексе: переваримость крахмала должна повышаться, происходит его декстринизация, а переваримость белка не снижается. При высоких температурных режимах происходит реакция меланоидинообразования (реакция Мейларда), т.е. начинается взаимодействие между свободными аминокислотами и редуцирующими сахарами, приводящими к их связыванию и непереваримости, что является основным недостатком тепловой обработки.

Глава I

КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ СПЕЦИАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ЗЕРНА И КОМБИКОРМОВ

Разработана схема классификации методов специальной обработки (рис. 1.1).



Рис. 1.1. Схема классификации методов специальной обработки зерновых компонентов и комбикормов

Зерно как сложная термодинамическая система и живой организм активно взаимодействует с окружающей средой и претерпевает изменения своих свойств и структуры, в качестве ответной реакции на приложенное внешнее воздействие. При изменении влажности и температуры в зерне развиваются сложные процессы физико-химической и биохимической природы: набухание биополимеров зерна при их обводнении, активизация ферментной системы зерна и т. п. В результате происходит более или менее заметное преобразование биохимических свойств зерна, в соответствии с параметрами его обработки; благодаря этому изменяется и питательная ценность зерна.

В связи с практической важностью этого вопроса, его изучению посвятили свои труды многие отечественные и зарубежные ученые, среди которых особенно следует отметить Егорова Г. А. [65, 65], Казакова Е. Д. [86, 87], Кретовича В. Л. [101, 102], Яковенко В. А. [214, 215, 216, 217], Доронина А. Ф. [62], Козьминой Н. П. [95], Афанасьева В. А. 9, 10, 15, 17, 20], Орлова А. И. [140, 146, 148], а из зарубежных Costa P. [226], Cornett C. D. [227], Fernandes T. H. [234], Lawtence J. [242], Seib P. [255] и др.

При всех видах тепловой, гидротермической и термомеханической обработки зерна наблюдаются изменения свойств углеводов зерна, прежде всего, основного их представителя – крахмала. Это связано, в первую очередь, с тем, что при влажности продукта выше 15 % и температуре свыше 65 °С происходит клейстеризация крахмала, его гранулы деградируют, образуется сплошная гомогенная масса с высокой вязкостью, четко выраженными клеящими свойствами, находящаяся в вязко-текучем состоянии. Пределы влажности и температуры являются специфическими для крахмала каждой зерновой культуры.

Такой оклейстеризованный крахмал легче расщепляется на простые углеводы, т. е. проявляет более высокую податливость действию амилолитических ферментов.

Кроме того, вследствие деструкции макромолекул крахмала происходит образование различных декстринов. При этом повышается содержание водорастворимых веществ. Разными исследователями установлено, что при различных вариантах обработки зерна содержание декстринов в зерне возрастает от 3 до 18 раз [113, 146, 153, 222]. Конечным продуктом ферментативного расщепления макромолекул крахмала является мальтоза, а затем и моносахара. Однако содержание моносахаров и дисахаров может и снижаться, вследствие участия их в реакции меланоидинообразования [17, 144, 153].

Параллельно с изменением свойств углеводов наблюдается изменение белкового комплекса. Степень этих изменений связана с видом обработки и параметрами режима данного процесса, и для каждой культуры характеризу-

ется некоторыми различиями. Но, независимо от культуры, имеется много общего в характере происходящих изменений.

В исследованиях различных авторов [9, 56, 85, 118, 121] установлено изменение соотношения между соле- и щелочерастворимыми фракциями белка, отмечено изменение состава аминокислот, в том числе незаменимых. Например, найдено, что при поджаривании ячменя содержание водо- и спирторастворимого белка снижается на 70...75 %, при одновременном увеличении содержания щелочерастворимого белка в размере около 10 %. В ряде работ прослежено изменение содержания аминокислот [9, 90, 112, 119] в подвергнутом различной обработке зерне. Прежде всего это касается свободных аминокислот, которые при повышении влажности и температуры зерна активно вступают в реакцию меланоидинообразования с простыми сахарами. Это явление зарегистрировано в случае обработки зерна любых культур.

В опытах по гидротермической обработке гороха, гречихи ячменя и некоторых других культур получено, что снижение содержания аминокислот находится в пределах 20...30 %. Но имеются и такие наблюдения, в которых общее содержание аминокислот сохранилось на неизменном уровне [9, 138, 151, 172, 213]. Несомненно, эти расхождения в результатах обусловлены различием использованных вариантов обработки и параметрами режима этого процесса.

Важным фактором ценности продуктов является доступность белков действию протеолитических ферментов. При всех вариантах термической, гидротермической и термомеханической обработки атакуемость белков ферментами изменяется. В большинстве исследовательских работ показано, что переваримость белков повышается при использовании продуктов из зерна, прошедшего такую обработку. Но при очень жестких режимах обработки может быть получен и обратный эффект [187, 193, 199, 202, 212].

При падающих режимах обработки зерна витамины не претерпевают заметных изменений, но при повышении сверх 80 °С температуры нагрева зерна их содержание может снизиться. Наиболее устойчивыми к тепловому воздействию оказываются жирорастворимые витамины [125, 144, 182, 189, 232].

Таким образом, при любом варианте термической, гидротермической или термомеханической обработки зерна в нем происходят сложные процессы физико-химической и биохимической природы, результатом которых является изменение биохимических и физических свойств зерна и его питательности, как компонента комбикормов.

При производстве комбикормов, наряду с обеспечением их высокой питательности и биологической полноценности, обязательно требуется достигнуть его безупречного санитарного состояния.

Наибольший вклад в содержание грибковой и бактериальной микрофлоры в комбикормах вносит зерно и зерновые продукты (мучка, отруби и т. п.). Все зернопродукты характеризуются постоянным присутствием в них большого числа спор и вегетативного тела грибов, а также различных бактерий. При этом в числе этой микрофлоры нередко присутствуют и патогенные представители; например, некоторые грибки могут вызывать микозы, а грибки рода *Aspergillus* при определенных условиях могут производить сильнейшие яды афлатоксины. В практике известны случаи отравления молодняка птицы и некоторых животных различными микотоксинами [33, 69]. Установлено, что в общей сложности различные грибы способны производить более 200 вредных и токсических веществ.

С открытием канцерогенного действия многих представителей токсинов проблема обсемененности кормовых средств и пищевых продуктов приобрела особо важное значение.

Особое место среди микотоксинов занимают афлатоксины. Например, при наличии в корме всего 15 мкг на 1 кг корма афлатоксина В₁ достаточно, чтобы вызвать 100 %-ное возникновение опухолей печени у самцов крыс [4, 26, 38].

Восприимчивость животных к микотоксинам различна у разных групп; так, опухоль печени была обнаружена у утят при содержании в корме 30 мкг на 1 кг корма афлатоксина В₁, а взрослые свиньи спокойно перенесли употребление корма, в котором было 230 мкг на 1 кг этого вещества; крупный рогатый скот оказался еще более устойчивым, и на его состояние не повлияло употребление корма с 300 мкг на 1 кг этого афлатоксина.

Кроме того, в зерне и продуктах его переработки обнаружено присутствие и других микотоксинов, среди которых видное место занимают охратоксины, цитринин, патулин, стеригматоцистин, пеницилловая кислота, лютеокскирин, цитреовиридин и др. [79, 107, 202]. Все эти микотоксины способны вызывать отравление или же расстройство нормального функционирования различных органов животных и человека, развитие новообразований и т. п. Поэтому остро стоит вопрос о санитарном состоянии зерна, которое является основой для производства большого числа разнообразных пищевых продуктов и кормовых средств.

Все существующие способы стерилизации материалов можно разделить на физические, химические и биологические. Физические методы основаны на использовании температуры, давления, облучения; именно эти методы могут применяться в комбикормовом производстве, т. к. они удовлетворительно вписываются в технологический процесс. Губительно действует на микрофлору обработка зерна СВЧ, ИКЛ, пропаривание при повышенном давлении, экструдирование и экспандирование. Например, в работах нашего института показано, что гранулирование комбикорма с высоким содержанием зернового

компонента при избыточном давлении пара 0,42 МПа обеспечивает уничтожение плесневых грибов в размере 98...99 % от их первоначального содержания [14, 26, 33, 38, 79]. В этих опытах установлено также эффективное обеззараживание комбикорма, в котором предусмотрено поджаривание зерна, поджаривание в сочетании с предварительным пропариванием и экструдирование [146, 147, 150, 152].

Таким образом, физические методы оказывают эффективное действие на микрофлору зерна и других компонентов комбикормов. В технологии комбикормов они являются основными для этой цели, применение химикатов не рекомендуется, а различные биологические методы находятся вне нашей технологии.

Глава 2

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЗЕРНА С ВОДОЙ

Во всех процессах термической, гидротермической и термомеханической обработки зерна присутствующая в нем вода играет важную роль. Происходящие при этом преобразования физических, структурно-механических и физико-химических свойств зерна развиваются с различной интенсивностью, в зависимости от размера обводнения биополимеров зерна и степени энергетического взаимодействия воды с ним. Поэтому исследование особенностей взаимодействия зерна с водой имеет важное теоретическое и практическое значение. Рассмотрение механизма этого явления дает возможность провести инженерное решение задачи оптимизации параметров процессов обработки зерна в производственных условиях.

Как отмечено выше, по современным представлениям зерно следует рассматривать как сложносоставное тело, анатомические части которого сложены из биополимеров белковой и углеводной природы. Следует учитывать, что зерно представляет собой полимерное тело, поэтому оно является типичным представителем группы коллоидно-капиллярно-пористых тел; зерно - живой организм, поэтому во всех процессах проявляется управляющее влияние биологической системы зерна, в соответствии с потребностями его, как живого организма. Зерно активно обменивается с окружающей средой энергией, массой и информацией.

Общее рассмотрение особенностей зерна приводит к заключению, что его следует трактовать как термодинамическую открытую сложную систему с большим числом внутренних и внешних связей.

Эти особенности зерна определяют сложный характер взаимодействия его с водой. Типичным представителем зерновых компонентов является зерно пшеницы, поэтому наиболее подробно механизм увлажнения и обезвоживания зерна изучен именно для него [65, 85, 87]. Классическое изложение этого механизма взаимодействия зерна пшеницы с водой представлено в работах Г. А. Егорова [65]. Автор определяет, что механизм взаимодействия зерна с водой построен биологически целесообразно, т. е. его особенности определяются потребностями зерна, как семени, призванного дать начало новому растению.

При непосредственном контакте зерна с жидкой водой, например, в условиях иммерсионного увлажнения, вначале быстро насыщаются водой плодовые оболочки зерна; их сорбционная емкость составляет от 3 до 5 %, в расчете на массу зерна. Поглощенная ими вода находится в пустотелых клетках этих

оболочек и поэтому энергетически очень слабо взаимодействует с ними – здесь преобладает механическая связь влаги, т. е. такая, которая очень быстро может быть преодолена при изменении внешних условий (например, при незначительном повышении температуры), и тогда накопленная в плодовых оболочках влага может быть десорбирована и потеряна для зерна. Поэтому под влиянием биологической системы зерна эта влага в течение короткого промежутка времени перемещается в семенную оболочку, а оттуда – в алейроновый слой и зародыш зерна.

В этих анатомических частях зерна вода удерживается достаточно длительный промежуток времени. Обусловлено это тем, что клетки алейронового слоя и зародыша являются физиологически активными, они сохраняют жизнедеятельность, и поэтому вода должна находиться именно в них, чтобы процессы физиологической и биохимической природы получили необходимое развитие для начала стадии прорастания зерна. В этих анатомических частях зерна сконцентрированы активные протеолитические, амилолитические и липолитические ферменты, и вода удерживается в алейроновом слое и зародыше в течение такого периода времени, который необходим для достижения этой ферментной системой зерна высокой активности. Только после этого вода начинает постепенно проникать в тело крахмалистой части эндосперма зерна, сложенного из запасных углеводов и белков. Начинается их гидролиз, образовавшиеся низкомолекулярные вещества транспортируются к зародышу, где и происходит синтез новых тканей проростков растения.

Таким образом, можно выделить три этапа этого сложного процесса поглощения воды зерном: вначале происходит захват воды плодовыми оболочками зерна, затем быстрое перемещение ее в алейроновый слой и зародыш и удержание здесь в течение достаточно длительного времени, необходимого для активизации ферментов, присутствующих в жизнедеятельных клетках этих анатомических частей, и, наконец, постепенный перенос воды внутрь эндосперма зерна и распределение ее молекул в равновесном соотношении между белками и крахмалом, и связывание ее энергетически ненасыщенными и активными центрами макромолекул этих биополимеров.

Как показывает анализ этого механизма, для преобразований свойств зерна особо важное значение имеет второй этап – задержка воды в тканях алейронового слоя и зародыша.

По классическим законам теории тепломассопереноса вода внутри коллоидных капиллярно-пористых тел должна перемещаться под воздействием градиента энергии связи влаги в направлении повышенного значения этой энергии связи [4, 65, 86]. Но в данном случае наблюдается нарушение этого закона, в связи с влиянием биологической системы зерна на процесс переноса влаги.

На рис. 2.1 приведен график зависимости энергии связи влаги в зерне пшеницы, рассчитанной по термодинамическому уравнению [44, 65]:

$$E = -R \cdot T \cdot \ln(P/P_0), \quad (2.1)$$

где R – универсальная газовая постоянная, Дж/моль·град,
 T – температура по термодинамической шкале, град,
 P/P_0 – относительное давление паров в атмосфере над поверхностью зерна.

График показывает, что при повышении влажности происходит быстрое снижение энергии связи влаги. Следовательно, если влажность алейронового слоя составляет 25...27 %, а влажность прилегающего к нему субалейронового слоя крахмалистой части эндосперма равна 12 %, то на границе между ними возникает градиент энергии связи величиной 104...105 кДж/моль·м.

Одновременно с этим возникает и градиент влагосодержания величиной такого же порядка, т. е., примерно, 103...104 %/м. Такое положение приводит к тому, что на протяжении этого периода, в течение которого наблюдается задержка воды в тканях алейронового слоя зародыша, в зерне возникает ме-

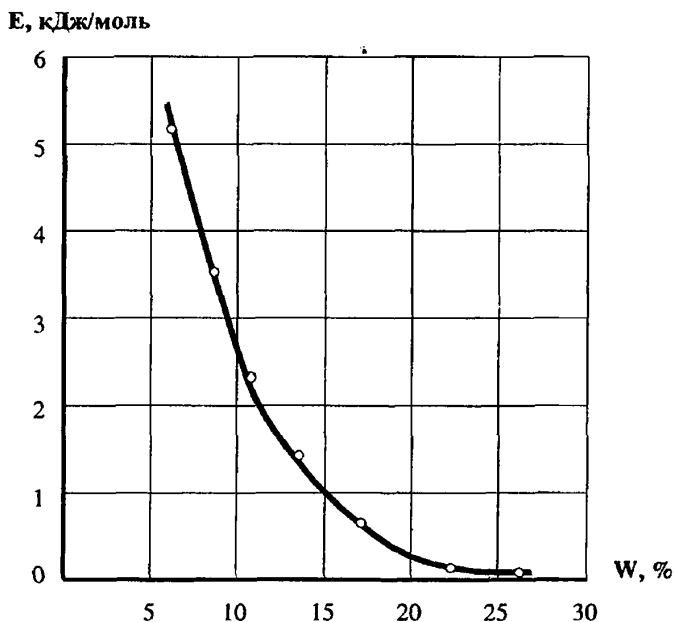


Рис. 2.1. Зависимость энергии связи влаги в зерне пшеницы от его влажности

ханически напряженное состояние. В результате этого в плотной структуре эндосперма зерна происходит спонтанное образование микротрещин, эндосперм разрыхляется, стекловидный эндосперм через некоторое время приобретает все признаки мучнистого эндосперма.

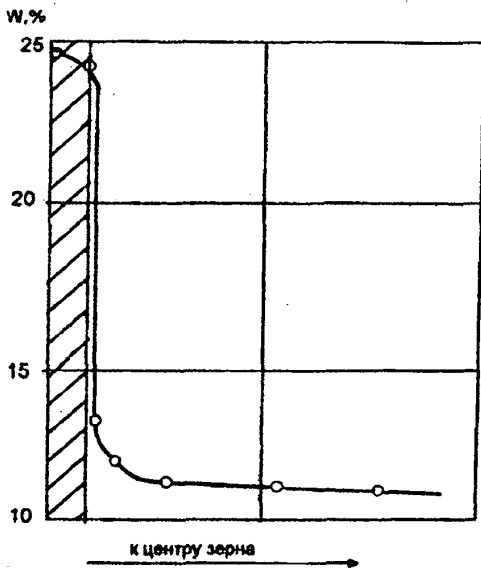


Рис. 2.2. Распределение влаги внутри зерна при задержке ее в алейроновом слое (заштрихован)

На рис. 2.2 приведены экспериментальные данные, полученные Г. А. Егоровым [65], о распределении влаги в анатомических частях зерна пшеницы в условиях холодного кондиционирования, т. е. при температуре около 20 °С.

Даже по истечении 1 часа после увлажнения зерна существует четко выраженная разница во влажности поверхностных слоев и его эндосперма. Для выравнивания термодинамического равновесия в распределении влаги между анатомическими частями зерна требуется значительное время. Конечно, при повышении температуры этот период существенно сокращается, вследствие повышения интенсивности влагопереноса. По экспериментальным

данным, коэффициент диффузии влаги зависит от температуры в соответствии со следующим уравнением [44, 65, 86]:

$$a_m = 10^{-49} \cdot T^{15,5}, \text{ м}^2/\text{с}. \quad (2.2)$$

Интересно, что описанный механизм увлажнения зерна сохраняется в общих чертах и при пропаривании зерна, как это показано в исследовании скоростного кондиционирования пшеницы. Оказывается, что и при обработке зерна паром влага не проникает сразу же внутрь эндосперма, а в течение некоторого времени удерживается в алейроновом слое и зародыше зерна.

Если зерно выдержать достаточно длительное время в неизменных термодинамических условиях, то постепенно процесс распределения влаги в нем завершается, влага распределяется между биополимерами зерна, в соответствии с их сорбционной емкостью, определяемой количеством и энергетической характеристикой активных центров их макромолекул.

При гидротермической или же термомеханической обработке зерна в технологии комбикормов обычно производится предварительное увлажнение зерна жидкой водой или же паром. Чаще всего при этом не происходит завершение распределения воды по анатомическим частям и биополимерам зерна в равновесном соотношении, вода обычно реагирует с веществами зерна с невысокой энергией связи. Поэтому при повышении температуры она быстро высвобождается и ее молекулы приобретают высокую кинетическую энергию и высокую подвижность, что определяется резким возрастанием значения коэффициента диффузии влаги, как это следует из уравнения (2.2).

2.1. Экспериментальные исследования взаимодействия зерна с водой

Зерно является капиллярно-пористым коллоидным телом, поэтому проникновение воды внутрь него при увлажнении происходит на основании законов диффузии, осмоса, а также путем капиллярного всасывания.

Зерно по весу сухих веществ более чем на 90 % состоит из гидрофильных биополимеров – белков и углеводов. Белки при набухании могут поглощать до 220 % воды, крахмал до 40 %, клетчатка до 30 %. Способность гидрофильных биополимеров зерна поглощать и удерживать влагу зависит от температуры окружающей среды, температуры процесса и некоторых других факторов.

Вода, проникающая в зерно при увлажнении, при дальнейшей тепловой обработке зерна способствует биохимическим превращениям крахмала и белка. При последующем быстром прогреве влага превращается в пар, создающий высокое давление в зерновке. Это приводит к эффекту "взрыва" и, как следствие, к высокой степени декстринизации крахмала, улучшающей питательную ценность продукта.

Опыты проводили с внесением расчетного количества воды в зерновую массу, чтобы конечная влажность равнялась 18 %.

Процесс увлажнения изучали при изменении температуры воды от 20 до 100 °С, температуры зерна от 20 до 150 °С и длительности обработки – до 10 минут (табл. 2.1).

Экспериментальными результатами показано, что основная масса добавленной воды впитывается зерном в первые 1–3 мин. На процесс увлажнения оказывает влияние как температура зерна, так и температура воды. Для примера на рис. 2.3 приведена кинетика увлажнения зерна, нагретого до 60 °С водой различной температуры от 20 до 100 °С.

Наиболее интенсивно проходит процесс увлажнения водой, нагретой до 40–60 °С. При этих условиях в течение одной минуты зерно полностью впи-

Таблица 2.1

Изменение влажности зерна при увлажнении водой

t _{воздух} , °C	20										40										60											
	исх.		1	3	5	7	10	исх.		1	3	5	7	10	исх.		1	3	5	7	10	исх.		1	3	5	7	10				
	t _{зерна} , °C																															
20	12.8		17.0	17.4	17.4	17.5	17.4	12.2		17.4	17.8	17.8	17.6	17.0	12.2		17.8	17.6	17.7	17.0	12.2		17.8	17.6	17.7	17.0	12.2		17.8	17.6	17.7	17.0
40	11.4		16.0	17.5	17.7	17.8	17.7	11.4		17.7	17.3	17.1	17.0	17.0	11.4		17.0	16.8	16.5	16.4	11.4		17.0	16.5	16.5	16.4	11.4		17.0	16.8	16.5	16.4
60	10.2		16.5	17.8	18.0	17.9	17.7	10.2		18.0	17.8	17.6	17.5	17.5	10.2		17.6	17.6	17.3	17.4	10.2		17.6	17.6	17.6	17.4	10.2		17.6	17.6	17.3	17.4
80	9.1		15.5	17.0	17.7	17.5	17.0	9.1		16.8	16.7	16.5	16.3	16.2	9.1		16.2	16.0	15.5	15.2	9.1		16.2	15.5	15.5	15.2	9.1		16.2	16.0	15.5	15.2
100	9.2		13.8	13.6	13.5	13.4	13.4	9.2		13.6	15.3	11.5	11.2	10.9	9.2		14.0	15.0	13.8	11.6	9.2		14.0	15.0	13.8	13.2	9.2		14.0	15.0	13.8	11.6
150	8.3		9.7	8.3	8.3	8.2	8.0	8.3		9.7	8.7	8.2	7.5	7.3	8.3		9.8	8.7	8.4	8.0	8.3		9.8	8.7	8.4	8.0	8.3		9.8	8.7	8.4	8.0
	80																															
	исх.		1	3	5	7	10	исх.		1	3	5	7	10	исх.		1	3	5	7	10	исх.		1	3	5	7	10				
20	12.2		16.8	17.9	17.7	17.5	17.4	12.2		17.6	17.7	17.2	17.0	17.0	12.2		17.6	17.7	17.2	17.0	12.2		17.6	17.7	17.2	17.0	12.2		17.6	17.7	17.0	17.0
40	11.4		15.5	16.0	15.8	14.0	13.7	11.4		13.5	13.0	12.8	12.0	12.7	11.4		13.5	13.0	12.8	12.0	11.4		13.5	13.0	12.8	12.0	11.4		13.5	13.0	12.8	12.7
60	10.2		16.5	15.8	15.0	14.7	14.0	10.2		14.5	15.0	13.8	12.8	11.7	10.2		14.5	15.0	13.8	12.8	10.2		14.5	15.0	13.8	12.8	10.2		14.5	15.0	13.8	11.7
80	9.1		14.2	13.5	13.3	13.2	13.2	9.1		12.7	12.5	11.8	10.7	10.7	9.1		12.7	12.5	11.8	10.7	9.1		12.7	12.5	11.8	10.7	9.1		12.7	12.5	10.7	10.7
100	9.2		14.0	13.7	12.7	12.5	10.4	9.2		13.6	13.2	12.1	11.6	12.5	9.2		13.6	13.2	12.1	11.6	9.2		13.6	13.2	12.1	11.6	9.2		13.6	13.2	12.1	12.5
150	8.3		10.2	8.6	8.3	7.8	7.4	8.3		9.6	9.6	8.0	7.6	7.5	8.3		9.6	9.6	8.0	7.6	8.3		9.6	9.6	8.0	7.6	8.3		9.6	9.6	7.6	7.5

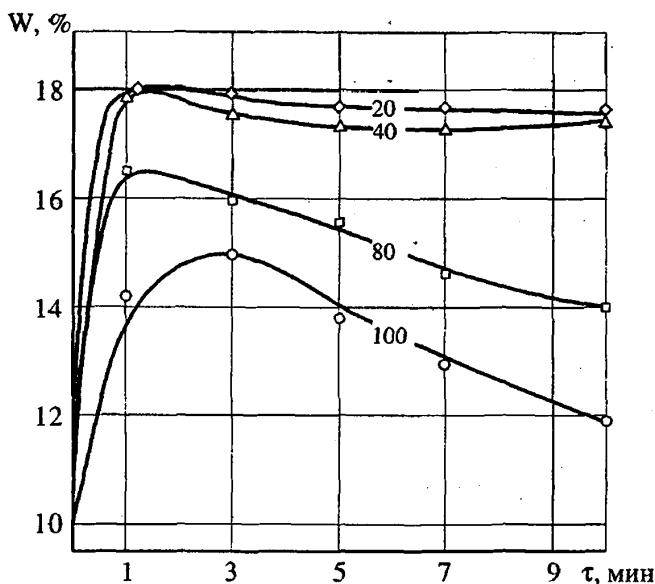


Рис. 2.3. Кинетика увлажнения зерна водой различной температуры
 $t_{\text{воды}} = 20, 40, 80, 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ($T_{\text{зерна}} = 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$)

тывает внесенную воду. Аналогичный характер имеют кривые увлажнения водой зерна, нагретого до различной температуры.

Данные, приведенные для одной серии опытов на рис. 2.4 при температуре воды $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и различной температуре зерна, показывают, что наиболее интенсивно проходит процесс увлажнения водой зерна, нагретого до $60 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Определено (рис. 2.5), что наибольшее увлажнение происходит при температуре воды, нагретой до $60 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Причем в этих пределах при заданной степени увлажнения на 6–8 % температура воды не оказывает большого влияния на интенсивность процесса. Это подтверждается расчетами и экспериментальными данными.

Количество тепла, вносимое с нагретой водой, составляет 10–15 % от общего количества тепла, затрачиваемого на нагрев всей зерновой массы до одинаковой температуры. Поэтому добавление воды с низкой температурой приводит сначала к некоторому снижению температуры (на 5–10 градусов) зерновой массы, затем после распределения воды по массе зерна температура их выравнивается.

Проникновение воды в зерно интенсифицируется с повышением температуры зерна до $60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 2.6).

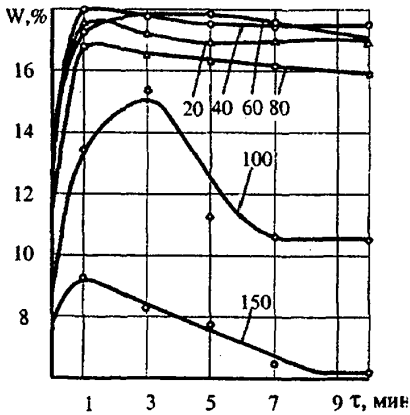


Рис. 2.4. Кинетика увлажнения зерна различной температуры ($t_{\text{зерна}} = 20 - 150 \text{ }^\circ\text{C}$) водой ($t_{\text{воды}} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$).

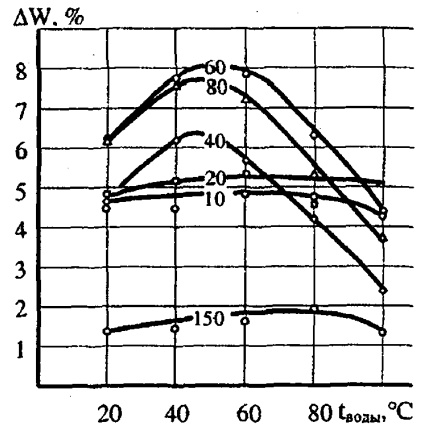


Рис. 2.5. Зависимость степени увлажнения зерна от температуры воды при длительности 1 мин ($t_{\text{зерна}} = 20 - 150 \text{ }^\circ\text{C}$).

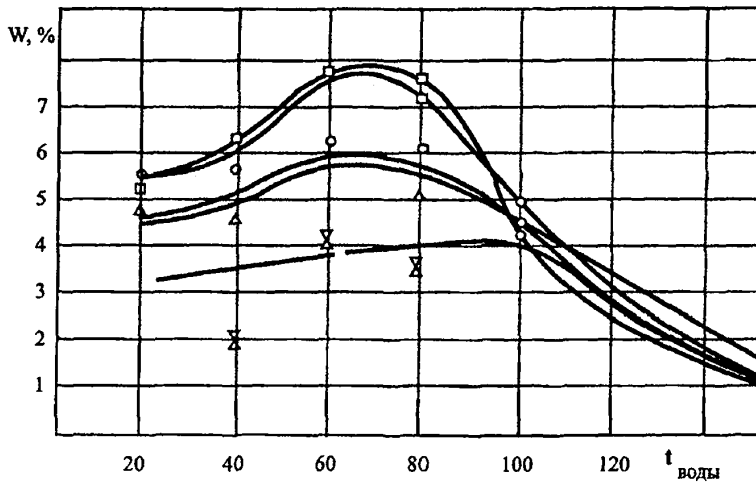


Рис. 2.6. Зависимость степени увлажнения зерна от температуры зерна при длительности 1 мин

Повышение как температуры воды, так и температуры зерна до $100 \text{ }^\circ\text{C}$ дает увеличение влажности всего на 2–3 % при обработке в течение 1–2 мин, дальнейшее перемешивание зерна в течение времени до 10 мин приводит к

снижению влажности его исходной. Внесение воды в зерновую массу, нагретую до 150 °С, не приводит к ее увлажнению, так как вода при этих условиях испаряется и наблюдается даже снижение влажности до исходного значения.

Анализ результатов экспериментов показывает, что наиболее интенсивное увлажнение происходит в течение 1–2 мин при температуре зерна от 60 до 80 °С и воды от 40 до 60 °С. При этих условиях вся влага впитывается зерном.

Следует отметить, что по литературным данным "горячее" кондиционирование при 40–50 °С вызывает повышение активности амилазы в зерне и увеличение содержания восстанавливающих сахаров, что повышает качество продукта.

Установлено, что для осуществления биохимических превращений в зерне необходимо, чтобы температура прогрева его не превышала 60–70 °С, так как при этой температуре достигается максимум набухания крахмала и его клейстеризация. Сначала крахмал зерновых набухает и впитывает до 30 % воды, при повышении температуры набухание ускоряется и усиливается во много раз. При температуре свыше 70 °С крахмальные зерна разрушаются, распадаются на несколько частей, и крахмал превращается в клейстер.

В табл. 2.2 приведены результаты определения степени клейстеризации зерна в процессе увлажнения в смесителе с подогревом (температура воды и зерна 60 °С).

Из результатов табл. 2.2 следует, что в первый момент значительного увеличения влажности (до 17,9 %) происходит наибольшее увеличение степени клейстеризации, для которой существуют необходимые условия – влажность и температура. В дальнейшем степень клейстеризации увеличивается незначительно, на что влияет в данном случае увеличение набухаемости и благо-

Таблица 2.2

Степень клейстеризации крахмала, %

Наименование образца	Длительность увлажнения т, мин	Влажность, W, %	Степень клейстеризации, %
Ячмень исходный	-	11,4	12,0
Ячмень увлажн.	1	17,9	16,0
	3	17,6	18,8
	5	17,5	20,0
	7	17,2	20,5
	10	17,0	23,0

приятная температура. При изучении изменения влажности зерна при замачивании его с водой различной температуры установлена та же закономерность; поглощение влаги происходит в два этапа – в начальный период резко возрастает влажность, затем вода медленно проникает внутрь эндосперма [65].

Таким образом, в результате опытов по увлажнению зерна в зависимости от температуры его увлажняющего агента – воды установлено:

- подогрев зерна благодаря расширению капилляров в оболочках облегчает проникновение воды в зерно;

- лучшие результаты по увлажнению получены, когда зерно подвергается влаготепловой обработке при температуре воды 40–60 °С и зерна – до 60–80 °С в течение 1–2 мин.

Глава 3

ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ЗЕРНА ТОКАМИ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ

3.1. Влияние ТВЧ-обработки на биохимические свойства зерна

Высокочастотный нагрев материалов в настоящее время получил широкое распространение во многих отраслях промышленности и даже в бытовом обиходе. Преимущество этого метода заключается, в частности, в том, что для нагрева материала не требуется осуществлять подвод теплоты извне – она генерируется в самом материале. При этом можно обеспечить разогрев материала на различной глубине от поверхности, в зависимости от конкретной характеристики аппарата и свойств данного материала. Дополнительным положительным фактором является возможность обрабатывать даже воздушно-сухое зерно, без его увлажнения или же пропаривания.

В настоящее время созданы и эксплуатируются различные установки на основе использования ТВЧ в технике и бытовых приборах. Определенный интерес представляет также изучение воздействия ТВЧ на зерновые компоненты комбикормов – при получении удовлетворительных результатов можно будет внедрить этот процесс в практику комбикормового производства.

В нашем исследовании изучено воздействие ТВЧ-обработки на зерно ячменя и кукурузы. Анализу подвергнуты технологические и биохимические свойства зерна и изменение их питательной ценности, как компонентов комбикормов. Для опытов использована лабораторная установка ТВЧ марки ЛД-1-06.

В опытах использовали зерно различной влажности, причем ее изменение проводили как увлажнением водой, так и пропариванием.

Опыты показали, что зерно нагревается до 100 °С в течение трех-четырех минут, а через пять-шесть минут воздействия ТВЧ происходит растрескивание зерна.

В таблице 3.1 приведены данные, полученные при ТВЧ-обработке зерна. Установлено, что в исходном зерне ячменя и кукурузы содержание декстринов до обработки составляло 1,1 и 0,8 %, после обработки повысилось: в зерне ячменя в 5...9 раз, а в зерне кукурузы – в 6...8 раз, в зависимости от длительности воздействия ТВЧ на зерно. Одновременно найдено, что атакуемость крахмала амилолитическими ферментами также повышается в 1,5...2 раза. Однако изучение переваримости протеина показало, что она несколько снижается при использовании жестких режимов обработки.

Таблица 3.1

Влияние ТВЧ-обработки на свойства зерна

Образец	Влажность, %	Время обра- ботки, мин.	Содержание декстринов, %	Степень клейстеризи- зации, %
Ячмень				
Исходный	12,6	-	1,10	10,0
	12,6	3	5,29	48,0
	12,6	5	7,86	75,0
	12,6	7	8,72	95,0
Увлажненный водой	20,5	3	6,02	32,0
	20,5	5	7,48	45,0
	20,5	7	9,61	82,0
	26,0	3	7,59	34,0
	26,0	5	10,12	72,0
Пропаренный	26,0	7	15,89	95,0
	20,7	7	16,24	95,0
	24,8	7	17,04	95,0
	29,2	7	17,14	95,0
Кукуруза				
Исходный	11,8	-	0,80	8,0
	11,8	3	5,54	8,0
	11,8	6	6,88	10,0
Увлажненный водой	17,8	3	5,83	12,0
	17,8	6	5,87	27,0
	22,5	6	4,36	50,0
Пропаренный	21,3	3	5,88	62,0
	21,3	6	6,12	68,0

Благотворно влияет на биохимические изменения зерна предварительное его увлажнение, в особенности пропаривание, с доведением влажности зерна до 20...25 %. При этом содержание декстринов в обработанном зерне ячменя возрастает до 17 %, а в зерне кукурузы до 6 %, а степень клейстеризации крахмала у обеих культур достигает 90...95 %.

Вследствие таких преобразований биохимических свойств зерна заметно повышается его питательная ценность, возрастает переваримость крахмала. Например, если при обработке зерна ячменя исходной влажности атакуемость крахмала амилалитическими ферментами возросла в 1,5...2 раза, то при дополнительной обработке паром – в 2,5 раза.

Таким образом, при обработке зерна ТВЧ получены результаты, свидетельствующие о положительном влиянии способа на биохимические свойства зерновых компонентов комбикормов и их питательную ценность. Но этот способ обработки связан с высокой затратой энергии и не имеет заметного преимущества перед другими, более экономичными способами обработки. Вследствие этого, на основании экономической оценки способа, мы не считаем возможным рекомендовать его к использованию в комбикормовом производстве.

Глава 4

ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ЗЕРНА КОНВЕКТИВНЫМ МЕТОДОМ

4.1. Основы теплообмена в слое зерна при конвективном нагреве

При конвективном нагреве зерна важную роль играет толщина слоя, его состояние (плотный, разрыхленный) и параметры горячего воздуха. Поэтому исследование процесса теплообмена следует проводить в элементарном слое, где создаются одинаковые условия для каждого отдельного зерна, и в толстом слое, где параметры теплоагента изменяются по высоте слоя.

4.1.1. Элементарный слой

Исследование процесса теплообмена в тонком элементарном слое позволяет выявить кинетику нагрева зерна в зависимости от температуры воздуха, скорости его движения, а также влажности зерна и воздуха.

Тепло, переданное зерну (единица объема) от воздуха

$$q = -\alpha_v f_G (t_1 - t_3), \quad (4.1)$$

расходуется на разогрев его

$$Q_{\text{нагр.}} = c \gamma \frac{dt}{d\tau} \quad (4.2)$$

и на испарение влаги

$$Q_{\text{исп.}} = -\gamma_0 \cdot \Gamma \frac{dw}{d\tau}. \quad (4.3)$$

Составим тепловой баланс

$$\alpha_v f_G (t_1 - t_3) = -c \gamma \frac{dt}{d\tau} + \gamma_0 \Gamma \frac{dw}{d\tau}, \quad (4.4)$$

где f_G – удельная поверхность зерна, $\text{м}^2/\text{кг}$.

Приняв, в первом приближении, что коэффициент объемной усадки зерна мал, считаем $\gamma = \gamma_0$. Перепишем уравнение (4.4) в виде:

$$\frac{dt}{d\tau} = - \frac{\alpha_v f_G}{c\gamma} (t_1 - t_3) + \frac{r}{c} \frac{dw}{d\tau}. \quad (4.5)$$

Закон изменения влажности зерна в элементарном слое принимаем в виде:

$$\frac{dw}{d\tau} = - K (W - W_0) = - K (W_H - W_p) \exp(-\kappa \tau). \quad (4.6)$$

Подставим в уравнение (4.5)

$$\frac{dt}{d\tau} = - \frac{\alpha_v f_G}{c\gamma} (t_1 - t_3) + \frac{r}{c} K (W_H - W_p) \exp(-\kappa \tau). \quad (4.7)$$

Линейное неоднородное уравнение решается методом вариации произвольной постоянной.

Окончательное решение получается в виде:

$$\frac{t_1 - t}{t_1 - t_0} = \exp\left(-\frac{\alpha_v f_G}{c\gamma} \cdot \tau\right) + \frac{K \frac{r}{c} (W_H - W_p)}{\left(\frac{\alpha_v f_G}{c\gamma} - K\right)(t_1 - t_0)} \exp\left[\left(-\frac{\alpha_v f_G}{c\gamma} - \kappa\right) \cdot \tau\right]. \quad (4.8)$$

При нагреве сухого зерна (без испарения влаги) 2-й член правой части уравнения исключается.

Анализ формулы показывает, что вторая ее часть отражает влияние влажности зерна на интенсивность нагрева.

Величина $\frac{K \frac{r}{c} (W_H - W_p)}{\left(\frac{\alpha_v f_G}{c\gamma} - K\right)(t_1 - t_0)}$ будет постоянной для принятого режима, функ-

ция $\exp(-\kappa \tau)$ убывает с течением времени. Эти составляющие будут понижать величину безразмерной температуры зерна. Влажное зерно будет нагреваться медленнее, чем сухое.

Следует отметить, что формула (3.10) является приближенной, поскольку коэффициент сушки K имеет переменную величину в процессе нагрева, и характеристики зерна (теплоемкость, удельный вес и др.) также изменяются в ходе высушивания.

4.1.2. Толстый слой

Теплообмен в условиях слоя складывается главным образом из передачи тепла от газа конвекцией и излучением и от одной частицы слоя к другой.

Роль излучения газа при нагреве слоя невелика, вследствие небольших размеров каналов между частицами и невысоких концентраций трехатомных газов. Для слоя, состоящего из зерен, имеющих форму эллипсоида вращения, можно пренебречь теплообменом теплопроводностью между отдельными зернами, поскольку количество тепла, передаваемого зернами друг другу путем контактного теплообмена мало, по сравнению с тем количеством тепла, которым обмениваются частицы с протекающим через слой воздухом. Допускаем, что температурный градиент внутри частиц, образующих слой, настолько мал, что им можно пренебречь. Указанное условие, в зависимости от требований, предъявляемых к точности результатов, может достигаться уже при значении критерия Био $B_i = \frac{\alpha \cdot R}{\lambda} < 1$, для зерна пшеницы $B_i = 0,3 \dots 0,5$, (4.9)

$$B_i = \frac{\alpha \cdot R}{\lambda} < 1, \text{ для зерна пшеницы } B_i = 0,3 \dots 0,5, \quad (4.9)$$

Для того чтобы ход процесса нагрева представить теоретически, примем, что теплопроводящая среда – воздух поступает с постоянной температурой t_1 и скоростью V в слой зерна, имеющего температуру t_0 . Теплофизические характеристики зерна и воздуха постоянны. Требуется определить температуру зерна и воздуха как функцию времени и пространства. Рассматриваем элемент объема с поперечным сечением в 1 м^2 толщиной dz на расстоянии z от входа нагретого воздуха. В момент времени τ зерно содержит в элементарном объеме количество тепла $C_m t_m dz$, а в момент времени $(\tau + d\tau)$ теплосодержание элементарного объема становится равным

$$C_m \left(t_m + \frac{\partial t_m}{\partial \tau} d\tau \right) dz. \quad (4.10)$$

Тепло, переданное материалу, будет равно

$$dQ = C_m \frac{\partial t_m}{\partial \tau} d\tau dz. \quad (4.11)$$

Изменение теплосодержания газа по направлению потока

$$\frac{\partial Q}{\partial z} dz = C_r V d\tau \frac{\partial t_r}{\partial z} dz \quad (4.12)$$

и во времени

$$\frac{\partial Q}{\partial \tau} d\tau = C_r V d\tau \frac{\partial t}{\partial \tau} d\tau = C_r \frac{\partial t}{\partial \tau} dz d\tau, \quad (4.13)$$

так как $V d\tau = dz$.

Количество тепла, которое газ отдает зерну по закону теплопередачи

$$dQ = -\alpha_v (t_r - t_m) dz d\tau. \quad (4.14)$$

Приравняв уравнения 4.11, 4.12, 4.13, 4.14, получим

$$C_r V \frac{\partial t_r}{\partial z} + C_r \frac{\partial t_r}{\partial \tau} = -\alpha_v (t_r - t_m) \quad (4.15)$$

и

$$C_m \frac{\partial t_m}{\partial \tau} = \alpha_v (t_r - t_m). \quad (4.16)$$

Таким образом, получим систему уравнений, которая определяет теплообмен в слое

$$\begin{cases} C_r \left[\frac{\partial t_r}{\partial \tau} + V \frac{\partial t_r}{\partial z} \right] = \alpha_v (t_r - t_m), \\ C_m \frac{\partial t_m}{\partial \tau} = \alpha_v (t_r - t_m). \end{cases} \quad (4.17)$$

Вводя новые переменные

$$Y = \frac{\alpha_v z}{VC}, \quad (4.18)$$

$$Z = \frac{\alpha_v}{C_m V} (V\tau - z), \quad (4.19)$$

получим

$$\begin{cases} \frac{\partial t}{\partial Z} = t_r - t_m, \\ \frac{\partial t}{\partial Y} = t_m - t_r. \end{cases} \quad (4.20)$$

Решение этой системы в общем виде было дано впервые А. Анцелиусом и позже Т. Шуманом в виде бесконечного ряда.

4.2. Изменение температуры зерна в процессе нагрева

Величина скорости теплоносителя выбиралась с учетом условий обработки зерна в барабанных обжарочных агрегатах, где падающий слой продувается смесью топочных газов с воздухом, движущейся со скоростью до 3,0 м/с. При конвективном нагреве исследования проводили при скорости воздуха 2,0–3,0 м/с, т. е. слой зерна находился в кипящем состоянии.

Температура воздуха в опытах изменялась от 100 до 300 °С, длительность обработки от 0,5 до 20 мин, в зависимости от температуры греющего агента. Для опытов применялся нешелушенный ячмень (исходный) влажностью 13 % и пропаренный при атмосферном давлении до влажности 16, 22, 32 %.

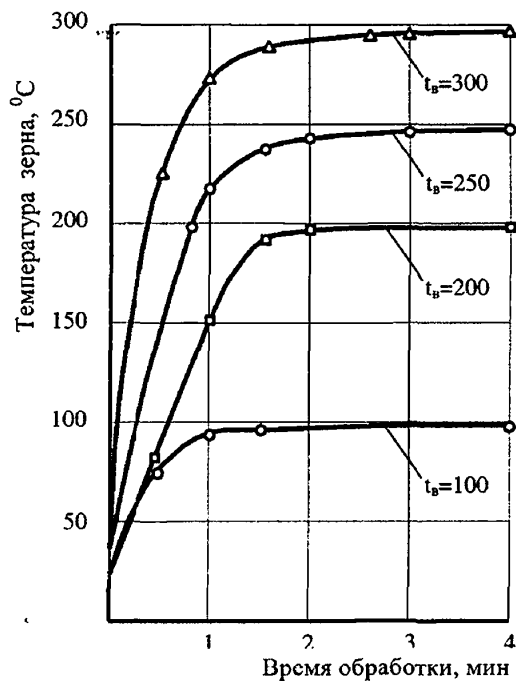


Рис. 4.1. Изменение температуры зерна в процессе нагрева конвективным способом $W_3 = 13\%$

Экспериментальные данные, представленные на рис. 4.1, показывают, что нагрев проходит очень интенсивно. При температуре воздуха $t_{\text{в}} = 100$ °С уже к концу первой минуты температура зерна достигает 80–90 °С, а через 2 мин возрастает почти до 95–96 °С и дальше поддерживается на этом уровне. При более высокой температуре греющего агента степень нагрева зерна выше. Так, при температуре воздуха 250 °С после обработки в течение 30 с зерно нагревается до 140–150 °С, через 1 мин до 200–210 °С, а через 2 мин температура зерна достигает величины 230–240 °С и в дальнейшем повышается почти до температуры теплоносителя. При обработке ячменя воздухом, нагретым до 300 °С, температура зерна уже через 1 мин приближается к температуре 250–260 °С.

С увеличением влажности зерна интенсивность нагрева и величина его несколько (на 5–10 градусов) ниже, вследствие того, что часть тепла тратится на испарение влаги. Однако достаточный теплоподвод за счет высокой скорости воздуха способствовал интенсивному нагреву зерна и высокой влажности.

4.3. Изменение технологических свойств зерна

Интенсивное повышение температуры зерна при конвективном способе нагрева сопровождается его высушиванием. Количество испарившейся влаги зависит от температуры греющего агента, длительности обработки и начальной влажности зерна. Интенсивность снижения влажности зерна повышается с увеличением температуры воздуха. Так, например, через 2 мин обработки количество испарившейся влаги в зависимости от начальной влажности зерна составляет при температуре воздуха 150 °С от 20 до 60 %; при 200 °С – от 27 до 68 %; при 250 °С – от 74 до 89 % и при 300 °С – 97 %. Эта закономерность прослеживается при всех экспозициях обработки. Наиболее интенсивно процесс испарения протекает при температуре греющего агента 300 °С и количество испарившейся влаги уже через 0,5 мин обработки составляет 71–75 %.

Скорость испарения влаги повышается с увеличением начальной влажности зерна. Так, например, при температуре воздуха 150 °С и времени обработки 4 минуты количество испарившейся влаги составляет 32 % при исходной влажности 13 %; 55 % – при исходной влажности 22 и 66 % – при исходной влажности 32 %. Такая же тенденция прослеживается при других температурах воздуха в исследованном диапазоне.

Быстрое испарение влаги при нагревании зерна конвективным способом вызывает разрушение эндосперма микротрещинами, вспучивание, взрывание зерновки, в результате чего физико-технологические свойства продукта претерпевают значительные изменения.

При тепловом воздействии длительностью до 6 мин и сравнительно невысокой температуре агента (150 °С) объемная масса ячменя несколько увеличивается, что обуславливается уменьшением влажности и увеличением плотности зерна. Интенсивный нагрев приводит к вспучиванию ячменя и, следовательно, к уменьшению его плотности и объемной массы. С показателем объемной массы непосредственно связан показатель гранулометрического состава продукта. Изменение гранулометрических характеристик связано с изменением структуры зерна. Тепловая обработка является процессом взаимосвязанного теплолагпереноса. При низких температурах греющего агента (до 150 °С) процессы нагрева и испарения влаги протекают довольно медленно и по мере высыхания геометрические размеры зерен незначительно уменьшаются за счет усадки. При высоких температурах греющего агента, т. е. при температуре воздуха более 150 °С, быстрый нагрев и испарение влаги приводят к вспучиванию зерен ячменя и, следовательно, к увеличению их размеров.

Результаты измерений сыпучести говорят о том, что этот показатель несколько увеличивается при обработке зерна ячменя при низких температурах воздуха (до 150 °С), благодаря подсушиванию продукта. Однако обработка при более высоких температурах греющего агента снижает показатель сыпучести продукта за счет вспучивания его и уменьшения объемной массы.

4.4. Влияние тепловой обработки нагретым воздухом на показатели качества зерна

4.4.1. Степень декстринизации крахмала

За критерий оценки режимов обработки при конвективном способе нагрева была выбрана степень декстринизации крахмала. При всех исследуемых температурах греющего агента (рис. 4.1, 4.2, 4.3) количество декстринов в зерне возрастает с увеличением длительности обработки и достигает наибольшего значения при температуре воздуха 200 °С через 20 мин, при 250 °С через 4,0 мин, при 300 °С через 2,5 мин. Исходная влажность зерна влияет на степень декстринизации крахмала при нагревании. Так, например, при температуре греющего агента 200 °С через 20 мин обработки количество декстринов в зерне, исходная влажность которого 13 %, составляет 9,0 %, в зерне с исходной влажностью 16, 22 и 32 % содержание декстринов увеличивается соответственно до 12,8; 14,7 и 13,9 %. При температуре греющего агента 300 °С, через 2,5 мин обработки количество декстринов доходит до 25,4 % в ячмене с начальной влажностью 13 % и до 39,4; 33,8 и 24,1 % в зерне с исходной влажностью 16, 22 и 32 % соответственно.

Результаты опытов показывают (рис. 4.1–4.3), что при одинаковой влажности продукта и длительности обработки степень декстринизации крахмала повышается с увеличением температуры греющего агента. Так, например, в ячмене с начальной влажностью 16 % количество декстринов увеличивается через 2 мин обработки с 0,5 до 2,4 % при температуре воздуха 200 °С; до 18,6 % при температуре – 250 °С и до 36,2 % при температуре – 300 °С. Наибольшая степень декстринизации ячменя достигается после обработки его в течение 2–2,5 мин при температуре 300 °С и составляет по отношению к крахмалу 52 % для исходного продукта, 78 – для зерна, увлажненного до 16 %, 66 – для увлажненного до 22 % и 50 – для увлажненного до 32 %.

При всех исследованных режимах обработки выявлена одна общая тенденция: степень декстринизации крахмала ячменя сначала возрастает с повышением его влажности до 16 и 22 %, а затем при дальнейшем увеличении содержания влаги до 32 % – уменьшается.

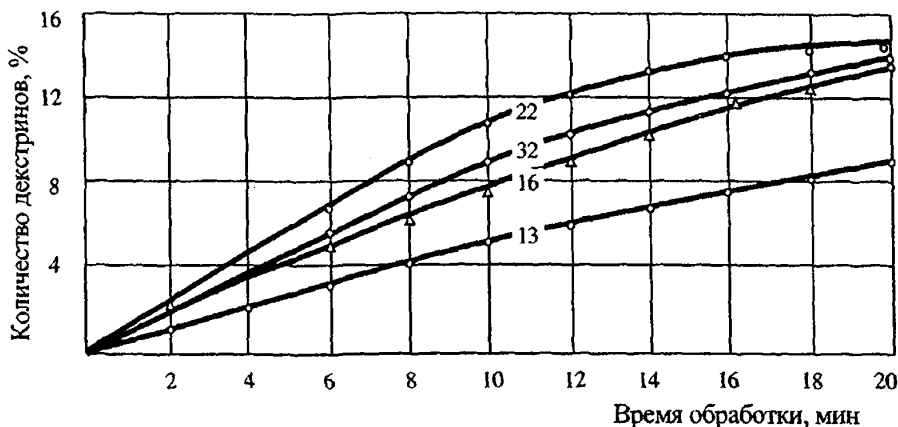


Рис. 4.1. Изменение содержания декстринов в зерне различной влажности ($W = 13, 16, 22, 32 \%$) при конвективном способе обработки, $t_0 = 200 \text{ }^\circ\text{C}$

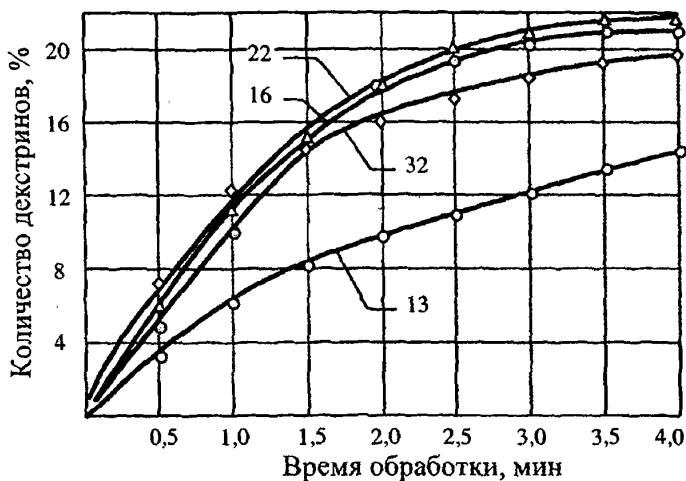


Рис. 4.2. Изменение содержания декстринов в зерне ячменя различной влажности при конвективном способе обработки, $t_0 = 250 \text{ }^\circ\text{C}$

4.4.2. Содержание глюкозы и клетчатки

Проводились опыты по изучению влияния тепловой обработки конвективным способом на содержание "сырой" клетчатки и глюкозы в ячмене.

Установлено (табл. 4.1), что при всех исследуемых режимах обработки практически не происходит разрушение "сырой" клетчатки. Разница в содер-

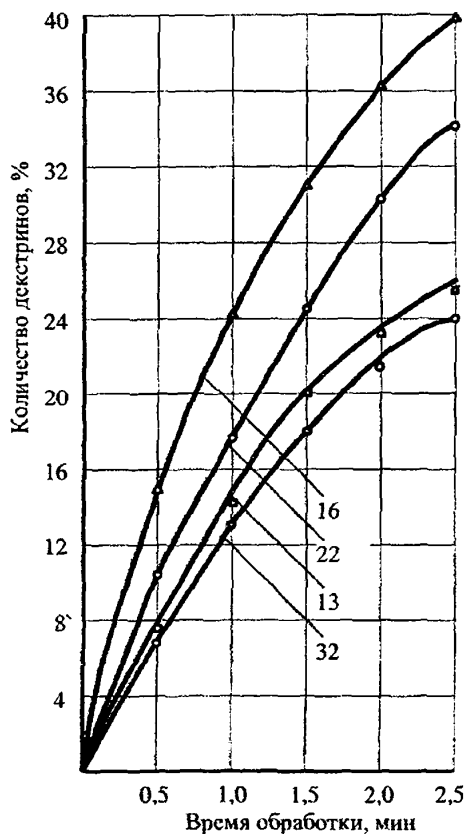


Рис. 4.3. Изменение содержания декстринов в зерне ячменя различной влажности при конвективном способе обработки, $t_n = 300$ °C

жании ее в исходном продукте и в зерне после тепловой обработки конвективным способом при всех режимах не превышает 0,5 % и находится в пределах ошибки опыта.

Содержание глюкозы в образцах также остается неизменным при всех режимах обработки (разница в показаниях находится в пределах ошибки опыта). Казалось бы, что количество глюкозы при нагревании должно уменьшаться за счет реакции меланоидинообразования — взаимодействия редуцирующих сахаров с лизином. Однако, по-видимому, термический гидролиз при конвективном способе нагрева протекает настолько интенсивно, что вызывает расщепление крахмала не только до декстринов, но и более глубокое — до глюкозы. И та

часть ее, которая вступила в реакцию с аминокислотой, компенсируется за счет образовавшейся в результате гидролиза; и поэтому общее количество глюкозы в продукте не снижается.

4.4.3. Переваримость крахмала (*in vitro*)

Переваримость или атакуемость крахмала ферментами характеризуется интенсивностью процесса образования из него легкоусвояемых питательных веществ, таких как глюкоза, под воздействием амилолитических ферментов. Количество образовавшихся при действии ферментов легкоусвояемых веществ показывает эффективность использования корма.

Способность крахмала превращаться в легкоусвояемые питательные вещества под действием ферментов может быть исследована в лабораторных условиях (*in vitro*) с помощью методов, позволяющих определить количество образовавшейся в результате гидролиза глюкозы. Исследованиям подверга-

Таблица 4.1

Влияние температуры греющего агента и длительности обработки на содержание глюкозы и "сырой" клетчатки в ячмене

Температура воздуха, °С	Длительность обработки, мин	Начальная влажность зерна, %	Содержание глюкозы, %	Содержание "сырой" клетчатки, %
Исходный ячмень	-	13	0,05	5,10
150	20	13	0,07	4,94
		16	0,08	5,15
		22	0,08	5,27
		32	0,07	5,11
200	20	13	0,03	4,83
		16	0,03	4,98
		22	0,04	5,16
		32	0,03	5,32
250	4	13	0,06	4,85
		16	0,05	4,99
		22	0,05	5,26
		32	0,04	5,03
300	2	13	0,05	4,71
		16	0,04	4,89
		22	0,04	5,06
		32	0,03	5,00
300	2,5	13	0,06	5,01
		16	0,05	4,96
		22	0,05	4,75
		32	0,04	4,92

лись образцы ячменя после обработки их горячим воздухом при температуре 150, 200, 250, 300 °С. Экспериментально показано, что (рис. 4.4) наименьшей переваримостью обладает крахмал необработанного (исходного) ячменя. Количество образовавшейся глюкозы в нем через 5 ч инкубирования составляет 125 мг/г продукта, т. е. 12,5 %.

Переваримость крахмала или количество выделившейся глюкозы повышается с увеличением температуры греющего агента. Так, после 20 мин обработки при температуре 150 °С количество образовавшейся глюкозы через 5 ч инкубирования составило 190 мг/г продукта, а с повышением температуры греющего агента до 200 °С – увеличилось до 290 мг/г.

Наилучшей переваримостью обладает крахмал ячменя, обработанного при температуре 300 °С в течение 2,5 минут. Количество образовавшейся глюкозы через 5 часов инкубирования в нем составляет 420 мг/г продукта, что в 3,5 раза больше, чем в исходном зерне.

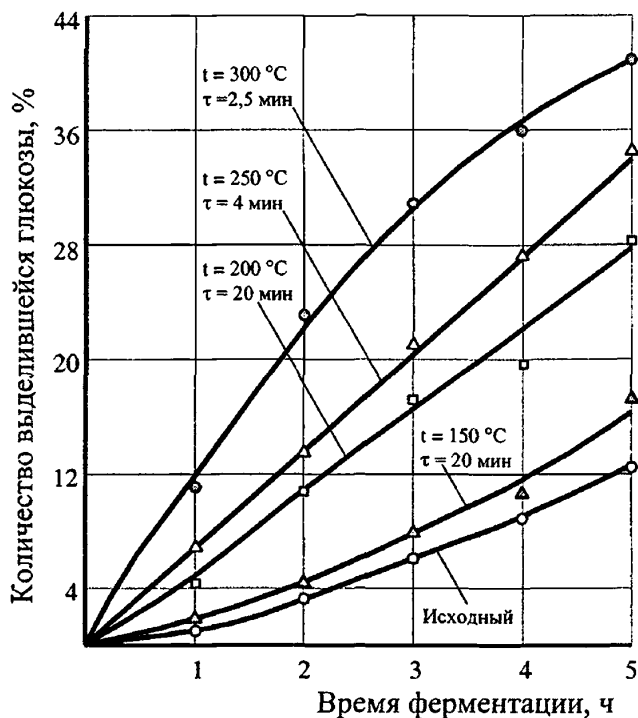


Рис. 4.4. Образование глюкозы при ферментативном гидролизе крахмала в ячмене, подвергнутом обработке нагретым воздухом

Наблюдается общая закономерность повышения переваримости крахмала с увеличением степени декстринизации его (рис. 4.5). Например, через 1 ч инкубирования в образцах, содержащих 7 % декстринов высвобождается 15 мг на 1 г продукта, а содержащих 36 % декстринов – 105 мг на 1 г продукта. Через 5 часов инкубирования в тех же образцах высвобождается соответственно 190 и 420 мг глюкозы на 1 г продукта.

4.4.4. Переваримость протешна (*in vitro*)

В процессе тепловой обработки изменения претерпевает не только углеводный, но и белковый комплекс зерна.

Ранее было установлено, что под действием тепла и влаги происходит потеря белком растворимости, что говорит о его денатурационных изменениях. Денатурация белков улучшает атакуемость их пищеварительными ферментами животных. Однако из ряда литературных источников известно отрицатель-

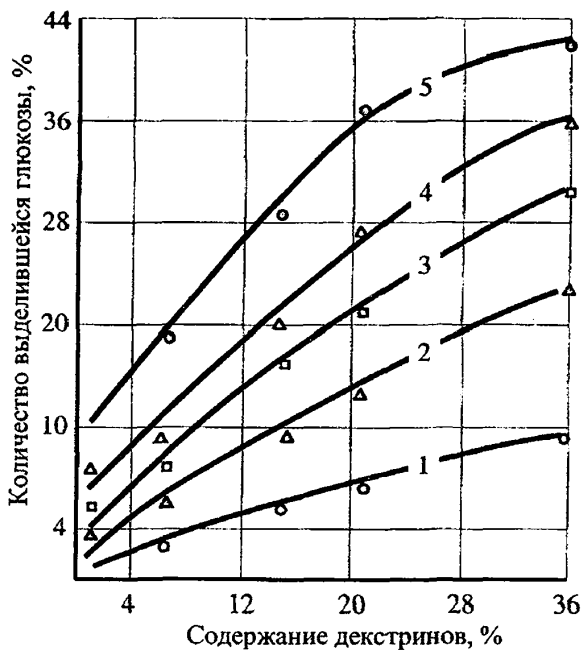


Рис. 4.5. Зависимость переваримости крахмала (*in vitro*) от степени его декстринизации при $\tau_{ферм.}$ = 1, 2, 3, 4, 5 часов

ное воздействие нагревания на питательную ценность белков (*in vitro*). Это объясняется тем, что воздействие тепла может вызвать изменение химических и физических свойств белка. Прежде всего эти изменения объясняются так называемой реакцией Майяра, т. е. взаимодействием свободного лизина с глюкозой, в результате чего образуется неусвояемый комплекс лизин-фруктоза.

Кроме того в результате перегрева белков ϵ -аминогруппа лизина вступает в реакцию с амидами и образует соединения, которые под действием ферментов расщепляются на биологически недоступные пептиды.

Экспериментальные данные (таблица 4.2) свидетельствуют о том, что содержание общего белка в образцах остается неизменным после обработки при всех режимах. Расхождения в показаниях находятся в пределах ошибки опыта. Однако переваримость протеина (*in vitro*) при некоторых параметрах обработки снижается. Так, после нагревания ячменя с исходной влажностью 16 и 22 % при температуре воздуха 150 °С в течение 20 мин снижения коэффициента переваримости протеина не происходит (расхождения в показаниях находятся в пределах ошибки опыта), однако в образцах с исходной влаж-

Таблица 4.2

Зависимость коэффициента переваримости протеина ячменя от температуры греющего агента и длительности обработки

Температура воздуха, °С	Время обработки воздухом, мин.	Влажность пропаренного ячменя	Сырой протеин, г/100 г	Переваримый протеин, г/100 г	Коэффициент переваримости, %
Исходный ячмень	-	-	13,38	10,31	78
150	20	16,0	14,25	10,38	73
		22,0	14,20	9,83	69
		32,0	13,77	8,79	64
200	20	13,0	13,89	6,94	50
		16,0	13,85	6,74	49
		22,0	13,71	5,81	42
		32,0	13,69	5,37	39
250	4	13,0	14,19	8,33	59
		16,0	13,97	7,48	53
		32,0	14,02	6,97	50
300	0,5	13,0	12,12	9,29	77
		16,0	12,38	9,30	75
		22,0	12,60	9,51	75
		32,0	12,11	9,00	74
300	1,0	13,0	12,40	9,95	80
		16,0	12,66	9,98	78
		22,0	13,00	9,85	76
		32,0	12,06	9,01	74
300	1,5	13,0	12,69	9,50	75
		16,0	12,01	8,88	74
		22,0	13,11	9,80	75
		32,0	13,78	9,65	70
300	2,0	13,0	12,66	9,49	75
		16,0	12,48	9,00	72
		22,0	13,16	9,21	70
		32,0	13,37	8,59	64
300	2,5	13,0	13,10	6,55	50
		16,0	12,39	6,44	52
		22,0	13,16	6,21	47
		32,0	12,90	4,38	34

ностью 32 %, обработанных при тех же параметрах, переваримость протеина снижается более чем на 10 %.

Существенное снижение коэффициента переваримости протеина (in vitro) до 40 % наблюдается в ячмене после обработки в течение 20 мин при температуре 200 °С и 4 мин при температуре 250 °С. Наибольшее разрушение пере-

варимого протеина при этих режимах обработки также происходит в зерне с исходной влажностью 32 %. Обработка ячменя при температуре 300 °С от 0,5 до 2,0 мин не снижает переваримости протеина; уменьшение коэффициента переваримости (причем значительное – до 28–44 %) наблюдается лишь при экспозиции 2,5 мин. Обобщая результаты полученных данных, можно отметить, что обработка ячменя при температуре 300 °С в течение 2 мин не снижает переваримости протеина, в то время как обработка при меньших температурах 200 °С и 250 °С, но при более длительной экспозиции – 20 и 4 мин соответственно приводит к значительному разрушению переваримого протеина. Наибольшее снижение коэффициента переваримости протеина при всех режимах обработки наблюдается у зерна с исходной влажностью 32 %.

Таким образом, для сохранения качества белка при тепловой обработке зерна следует применять кратковременное интенсивное тепловое воздействие, медленный нагрев приводит к ухудшению качества.

На основании исследований можно сделать следующее заключение:

– температура зерна при обработке в кипящем слое нагретым воздухом со скоростью 2,0–2,5 м/с в течение 2 мин приближается к температуре греющего агента;

– вследствие интенсивного нагрева в течение 2 мин до температуры 200 °С зерна вспучиваются, их объемная масса уменьшается до 240–300 г/л;

– количество декстринов в ячмене кондиционной влажности при обработке нагретым до температуры 300 °С возрастает до 20 %;

– наибольшее улучшение углеводного комплекса ячменя достигается при пропаривании до влажности 16 % и последующем нагреве воздухом с температурой 300 °С в течение 2 мин.

Глава 5

ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ЗЕРНА КОНДУКТИВНЫМ МЕТОДОМ

5.1. Основы теплообмена в слое зерна при кондуктивном нагреве

Нагрев зерновой массы при соприкосновении с греющей поверхностью можно рассматривать как нестационарный процесс передачи тепла путем теплопроводности. Для описания этого процесса применим математический аппарат, разработанный для сплошных сред.

При изучении передачи тепла теплопроводностью основной задачей является нахождение температурного поля, которое описывается дифференциальным уравнением

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a \nabla^2 \theta = a \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right), \quad (5.1)$$

где $\theta = [t_{(x,y,z, \tau)} - t_0]$ – разность между переменной температурой тела и постоянной температурой окружающей среды,
 $\nabla^2 \theta$ – дифференциальный оператор Лапласа.

При кондуктивном нагреве зерновую массу будем рассматривать как полуграниченное тело и задачу как одномерную.

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2}, \quad (5.2)$$

где $\theta = [t_{(z, \tau)} - t_0]$ – разность между переменной температурой тела и температурой поверхности,
 a – коэффициент теплопроводности.

Рассмотрим задачу нахождения температурного поля в слое зерна на поверхности массива, имеющего начальную температуру t_0 ; при контакте с греющей поверхностью температура мгновенно возрастает до t_n и сохраняется неизменной во времени. Решение уравнения (5.2) при граничных условиях:

$$\begin{aligned} \tau = 0; t_{(z, \tau)} &= t_0; \\ z = 0; t_{(z, \tau)} &= t_n \end{aligned} \quad (5.3)$$

известно [115]:

$$\frac{\theta(z, \tau)}{\theta_a} = \frac{t_{(z, \tau)} - t_n}{t_o - t_n} = \operatorname{erf} \left(\frac{z}{2\sqrt{a\tau}} \right), \quad (5.4)$$

где $\operatorname{erf} \left(\frac{z}{2\sqrt{a\tau}} \right)$ — функция Крампа.

Полученное уравнение (5.4) справедливо при очень больших коэффициентах теплообмена, т. е. в случае идеального теплового контакта. В реальных случаях следует принимать во внимание поверхностное сопротивление нагреваемого тела, которое возникает за счет контакта по точкам и воздушной прослойки в контактной зоне. Тогда решение уравнения (3.24) при граничных условиях, учитывающих коэффициент теплообмена:

$$\begin{aligned} \tau = 0; t_{(z, \tau)} &= t_o \\ z = 0; \lambda \frac{\partial t}{\partial z} &= \alpha [t_{(z, \tau)} - t_n] \end{aligned} \quad (5.5)$$

имеет вид [115]:

$$\frac{\theta(z, \tau)}{\theta_a} = \operatorname{erf} \left(\frac{z}{2\sqrt{a\tau}} \right) + \exp \left[\frac{\alpha}{\lambda} \left(z + \frac{\alpha}{\lambda} a\tau \right) \right] \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{z}{2\sqrt{a\tau}} + \frac{\alpha}{\lambda} \sqrt{a\tau} \right) \right]. \quad (5.6)$$

Температура на поверхности тела, которую можно получить, положив $z = 0$ в формуле (5.6), запишется в виде:

$$\frac{t_{(o, \tau)} - t_n}{t_o - t_n} = \exp \left[\left(\frac{\alpha}{\lambda} \right)^2 a\tau \right] \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{\alpha}{\lambda} \sqrt{a\tau} \right) \right]. \quad (5.7)$$

Тепловой поток на поверхности массива определяется по формуле:

$$q = -\lambda \frac{\partial \theta_{(o, \tau)}}{\partial z}. \quad (5.8)$$

Для того, чтобы найти градиент температуры в момент времени в любой точке тела z , продифференцируем выражение (5.6) по z :

$$\frac{\partial \theta_{(z, \tau)}}{\partial z} = \theta_a \frac{\alpha}{\lambda} \exp \left[\frac{\alpha}{\lambda} \left(z + \frac{\alpha}{\lambda} a\tau \right) \right] \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{z}{2\sqrt{a\tau}} + \frac{\alpha}{\lambda} \sqrt{a\tau} \right) \right]. \quad (5.9)$$

На поверхности тела градиент температуры получим, подставив в уравнение (5.9) $z = 0$:

$$\frac{\partial \theta_{(0,\tau)}}{\partial z} = \theta_a \frac{\alpha}{\lambda} \exp \left[\left(\frac{\alpha}{\lambda} \right)^2 a \tau \right] \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{\alpha}{\lambda} \sqrt{a \tau} \right) \right]. \quad (5.10)$$

Тогда удельный тепловой поток на поверхности тела будет равен:

$$q = \lambda (t_n - t_0) \frac{\alpha}{\lambda} \exp \left[\left(\frac{\alpha}{\lambda} \right)^2 a \tau \right] \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{\alpha}{\lambda} \sqrt{a \tau} \right) \right]. \quad (5.11)$$

Дифференцируя (3.28) по τ , можно найти скорость нагревания или охлаждения в любой точке тела:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta_{(z,\tau)}}{\partial \tau} = & \theta_a \frac{z}{\sqrt{\pi a \tau}} \exp \left(-\frac{z^2}{4a\tau} \right) + \left(\frac{\alpha}{\lambda} \right)^2 a \exp \left[\frac{\alpha}{\lambda} \left(z + \frac{\alpha}{\lambda} a \tau \right) \right] \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{z}{2\sqrt{a\tau}} + \frac{\alpha}{\lambda} \sqrt{a\tau} \right) \right] - \\ & - \exp \left[\frac{\alpha}{\lambda} \left(z + \frac{\alpha}{\lambda} a \tau \right) - \left(\frac{z}{2\sqrt{a\tau}} + \frac{\alpha}{\lambda} \sqrt{a\tau} \right)^2 \right] \left[\frac{\alpha}{2\lambda} \sqrt{\frac{a}{\tau}} - \frac{z}{2\tau \sqrt{\pi a \tau}} \right]. \end{aligned} \quad (5.12)$$

Анализ формулы (5.6) показывает, что на температурное поле в начальные моменты времени оказывает большое влияние вторая ее часть. Ввиду этого температура контактирующей поверхности тела постепенно (а не мгновенно) приближается к температуре греющей поверхности.

Исходная формула (5.6) для расчета очень сложна, т. к. функция ошибок быстро убывает, а экспоненциальная функция быстро возрастает.

Заменив текущие координаты

$$\frac{z}{2\sqrt{a\tau}} = M,$$

$$\left(\frac{z}{2\sqrt{a\tau}} + \frac{\alpha}{\lambda} \sqrt{a\tau} \right) = N = M + P, \quad (5.13)$$

получим более удобную формулу:

$$F = \operatorname{erf}(M) + \exp [N^2 - M^2] [1 - \operatorname{erf}(N)]. \quad (5.14)$$

Значения функции $\operatorname{erf}(M)$ были взяты из пятнадцатизначных таблиц Вычислительного центра и введены в машину.

Пределы варьирования теплофизических характеристик принимались следующими:

коэффициент теплообмена α — от 0 до ∞ ;

коэффициент теплопроводности λ – от 0,1 до 0,6 ккал/час °С;
 коэффициент температуропроводности $a = (0,3 \div 0,7) 10^{-3} \text{ м}^2/\text{ч}$.
 При этом безразмерные (обобщенные) показатели изменялись

$$\frac{z}{2\sqrt{a\tau}} = 0...3,$$

$$\frac{\alpha}{\lambda} \sqrt{a\tau} = 0,2...12; \frac{\alpha}{\lambda} \sqrt{a\tau} \rightarrow \infty. \quad (5.15)$$

Результаты расчета приведены на рис. 5.1 в виде обобщенного графика, который показывает, что температура на поверхности и в глубине зернового массива будет достигать наибольшей величины при $\alpha \rightarrow \infty$, т. е. при идеальном тепловом контакте. Вполне закономерно, что при уменьшении коэффициента теплообмена слой зерна будет прогреваться медленнее. Анализ графика показывает, что температура прилежащего слоя возрастает быстро, в глубину массива тепловой поток проникает сравнительно медленно. На расстоянии 20 мм от поверхности температура зерна начинает повышаться только через ≈ 15 –20 мин.

Таким образом, если воспользоваться принятым математическим аппаратом, то можно охарактеризовать температурное поле в зерновом массиве при известных теплофизических характеристиках зерна и коэффициенте теплообмена на границе контакта.

Ввиду того что зерновая масса представляет дисперсную систему, среда и фаза которой разделены сильно развитой поверхностью, передача тепла уже не ограничивается одной теплопроводностью, а складывается из теплопроводности в местах соприкосновения частиц, молекулярной теплопроводности газа между частицами, конвекции газа в межзерновом пространстве, излучения от частицы к частице.

Оценим роль отдельных видов теплопередачи и установим предел их проявления.

Передача тепла путем теплопроводности в дисперсном материале осуществляется посредством перехода тепла от частицы к частице через непосредственные контакты между ними и перехода тепла от частицы через разделяющую промежуточную среду, а также путем переноса тепла по зернам. При установлении общих закономерностей, определяющих теплопроводность зернистых материалов, необходимо знать их механическую структуру, степень дисперсности, характер сложения частиц материала, форму, размер и способ контактирования частиц. Важнейшим фактором, определяющим тепловые свойства дисперсной системы, является природа частиц, но главную роль при

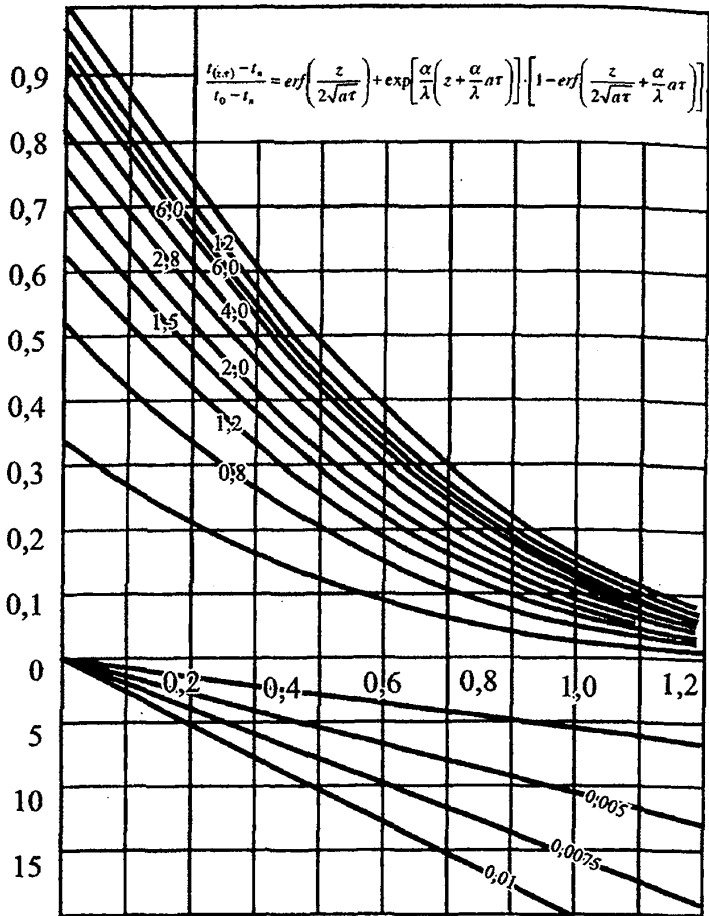


Рис. 5.1. Зависимость безразмерной температуры в слое зерна

при кондуктивном нагреве от безразмерной величины $\frac{z}{2\sqrt{a\tau}}$

этом играет соотношение в количестве составляющих материал частиц и пор. При большом различии коэффициента теплопроводности частиц и промежуточной среды эффективная теплопроводность отличается не столь велико ввиду относительно небольшой роли контактной теплопередачи в общем процессе теплообмена и потому, что теплопередача определяется в основном теплопроводностью промежуточной среды (воздух).

Большое влияние на теплопроводность зернистого материала оказывает степень дисперсности его. Чем меньше размер пор, тем меньше эффективный коэффициент теплопроводности дисперсной системы. При большем размере пор и той же общей пористости коэффициент теплопроводности материала будет выше. Вероятно, причиной этого является увеличенная роль конвекции и излучения. Чем меньше частицы, составляющие скелет зернистого материала, тем меньше его теплопроводность при прочих равных условиях.

Таким образом, только зная реальные особенности дисперсных систем: тип структуры, размеры и формы частиц и пор, характер контактирования частиц между собой, пористость, можно определить картину теплообмена в дисперсной системе.

Однако до сих пор предлагаемые теории не могут учесть влияния на контактную теплопроводность реального распределения частиц и пор по размерам, их форму и контакты с соседними частицами и порами, правильно оценить температурный скачок на границе твердая частица – газ и количественно выразить этот скачок.

Естественная конвекция возрастает в слое материала под действием температурного градиента, который обусловлен различием в плотности газа или жидкости, заполняющих промежутки между зернами. Величина минимального температурного градиента, необходимого для образования конвективных токов в пористой среде, выражается уравнением:

$$X = \frac{4\pi^2 \nu a}{Kg\rho\beta_0 d^2} \quad (5.16)$$

или в критериальной форме:

$$(\text{GrPr}) \geq 680,$$

здесь

$$\begin{aligned} \text{Gr} &= \frac{gd^3}{\nu^2} \frac{\Delta T}{T} = \frac{\beta_0 \Delta T g d^3}{\nu^2} \text{ — критерий Грасгофа,} \\ \text{Pr} &= \frac{\mu C_p}{\lambda} = \frac{\nu \rho c_p}{\lambda} \text{ — критерий Прандтля} \end{aligned} \quad (5.17)$$

Оценим роль свободной конвекции в зернистом материале для условий кондуктивного теплообмена.

Наилучшие условия для возникновения конвекции газа имеются в прилежащем к греющей поверхности слое.

Расчет проводим для следующих условий: температура греющей поверхности $t_n = 200$ °С, температура зерна $t_0 = 20$ °С.

Данные для расчета:

пористость зерновой массы – 40 %

площадь поверхности 1 кг зерна – 1,2 м²

$d_{\text{экв}}$ – эквивалентная толщина слоя, которая выражается через пористость материала и поверхность зерен в единице объема слоя f следующим образом:

$$\begin{aligned} d_{\text{экв}} &= \frac{4\rho}{f} = 0,0018 \text{ м,} \\ \text{Pr} &= 0,71, \\ \text{Gr} &= 300, \\ (\text{Pr Gr}) &= 213 < 680. \end{aligned} \quad (5.18)$$

Как видим из расчетов, естественная конвекция в зерновой насыпи незначительна. Критерий конвективного теплообмена в этом случае имеет постоянную величину $\text{Nu} = 2$ (Nu – критерий Нуссельта), это значит, что тепло распространяется теплопроводностью в неподвижной среде.

По литературным данным максимально возможный процент передачи тепла конвекций к общей теплопередаче для таких систем, как зерновая масса (пшеница $d = 4$ мм) достигает 5 %.

Излучение в дисперсном материале является наиболее сложным и наименее изученным.

Теплообмен излучением между поверхностями описывается формулой:

$$q_p = \sigma_1 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \quad (5.19)$$

где T_1, T_2 – температуры стенок излучающей поверхности,
 σ_1 – приведенный коэффициент лучеиспускания, связанный с коэффициентом излучения обеих поверхностей σ_1 и σ_2 абсолютного черного тела σ_0 соотношением:

$$\frac{1}{\sigma_1} = \frac{1}{\sigma_1} + \frac{1}{\sigma_2} - \frac{1}{\sigma_0}. \quad (5.20)$$

Для практических расчетов воспользуемся формулой определения лучистой составляющей коэффициента теплопроводности в слое дисперсного материала по литературным данным:

$$\lambda_s = 2\varepsilon^2 \sigma T^3 h. \quad (5.21)$$

Приняв: $h = 0,004$ м – размер пор, равный высоте одного ряда зерен,
 $\epsilon = 0,8$ – степень черноты,
 $T = 373$ К – температура поверхности нагрева,

получим $\lambda_n = 0,054$ ккал/м·с·°С, что составляет 4 % от λ зерна.

Таким образом, количество тепла, переданного по воздушной среде, будет зависеть от размера пор. С увеличением размера пор возрастает количество тепла, передаваемого естественной конвекцией и излучением.

Расчеты показывают, что тепловое излучение сказывается лишь в материалах с частицами размером свыше 1 мм. Для крупных частиц (диаметром 6 мм) удельный вес теплопередачи излучением не превышает 7 % от общей теплопередачи.

Наибольшее воздействие излучение будет оказывать непосредственно от греющей поверхности первому ряду зерен. Для оценки передачи тепла от нагретой поверхности к первому слою зерна проведен следующий расчет. Если толщина слоя воздуха меньше 4 мм, то передача тепла происходит лишь за счет молекулярной теплопроводности воздуха (Q_K) и за счет обмена излучением между поверхностями, ограничивающими рассматриваемый объем (Q_R):

Общее количество тепла будет равно их сумме

$$Q = Q_K + Q_R = F \left[\frac{\lambda_K}{S} (t_1 - t_2) + \sigma \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \right]. \quad (5.22)$$

Введем обозначения

$$Q_R = F \tau \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] = F \frac{\lambda_R}{S} (t_1 - t_2). \quad (5.23)$$

Если стенки, ограничивающие рассматриваемый объем газа, изготовлены из материала с большим значением коэффициента поглощения, то величина $\sigma = 4$ ккал/м²·ч·°С, тогда

$$\lambda_R = 0,16 \left(\frac{T}{100} \right)^3 S. \quad (5.24)$$

При этом общий коэффициент теплопроводности можно представить в виде

$$\lambda = \lambda_K + \lambda_R.$$

Проведя расчет для прослойки толщиной 2 мм, получим, что лучистая составляющая эффективного коэффициента теплопроводности слоя зерна достигает величины 8,5 %.

Таким образом, излучение в тонком слое воздуха мало сказывается на общем количестве переданного тепла при кондуктивном нагреве.

Перенос тепла во влажных дисперсных системах нельзя рассматривать независимо от переноса влаги. Влияние процесса переноса вещества на процесс переноса тепла особенно сказывается в мелкодисперсных и сильно увлажненных материалах.

Расчеты и исследования показывают, что пока температура среды не становится выше 50 °С, удельный вес фактора, обуславливающего перенос тепла паром, составляет до 10 % от полного эффекта переноса тепла. При высоких температурах и значительных температурных перепадах для переувлажненного состояния среды следует исходить из совместной системы дифференциальных уравнений для тепло- и массопереноса.

Подводя итоги анализа передачи тепла в дисперсных системах, заключаем, что нагрев зернистого материала кондуктивным способом теоретически решить чрезвычайно трудно. В настоящее время вопросы нестационарного теплообмена в слое дисперсного материала в основном решаются эмпирически.

5.2. Изменение температуры при обработке зерна кондуктивным методом

Эксперименты по поджариванию зерна проведены на нагретой металлической поверхности. Результаты исследований представлены на рис. 5.2...5.6. При температуре поверхности $t_n = 100$ °С в течение 1–2 мин температура зерна возрастает до 70 °С, в течение 4 мин – до 85 °С, далее темп нагревания снижается. Вполне закономерно, что при более высокой температуре греющей поверхности, степень нагрева зерна выше. Так при температуре $t_n = 250$ °С в течение 2 мин зерно нагревается до 150 °С, за 4 мин – до 170 °С и за 10 мин – до 200 °С.

Степень нагрева зерна различных культур зависит от их размеров. При прочих равных условиях крупные зерна нагреваются медленнее. При $t_n = 100...250$ °С зерна гороха и кукурузы, соприкасающиеся с греющей поверхностью в течение 2 мин, нагрелись до 45...100 °С, за 10 мин – до 70...185 °С соответственно. Для того чтобы обобщить результаты измерений температуры при кондуктивном нагреве, экспериментальные данные для каждой исследуемой культуры представлены в виде зависимостей безразмерной температуры зерна от времени (рис. 5.3). Используя эти зависимости можно определить степень нагрева зерна в тонком слое при известных начальной температуре зерна и греющей поверхности в любой заданный промежуток времени до 60 мин. Анализ графического материала показывает, что температура зер-

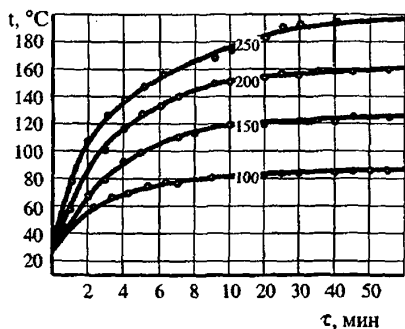


Рис. 5.2. Изменение температуры зерна (ячменя) в процессе поджаривания в тонком слое при $t_n = 100, 150, 200, 250$ °C

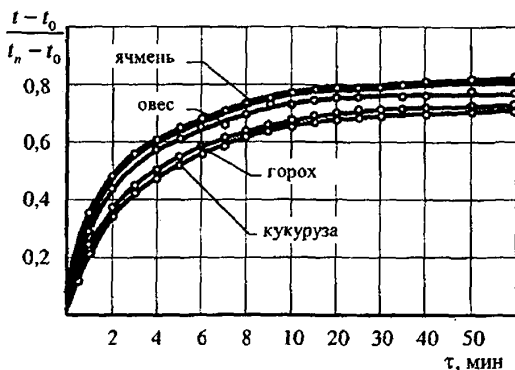


Рис. 5.3. Изменение безразмерной температуры зерна в процессе поджаривания

на с течением времени медленно приближается к температуре греющей поверхности ($(t-t_0)/(t_n-t_0) \rightarrow 1$), однако практически величины их не выравниваются. Наибольшая интенсивность нагрева наблюдается в начальные 10 мин и безразмерная температура достигает величины 0,65...0,75, в дальнейшем темп нагрева снижается и через 60 мин $(t-t_0)/(t_n-t_0)$ приближается к значению 0,75...0,85.

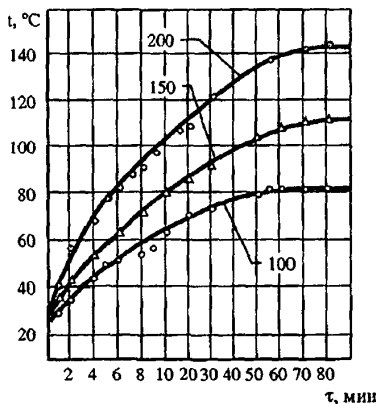


Рис. 5.4. Изменение температуры зерна (ячменя) в процессе поджаривания в толстом слое при $t_n = 100, 150, 200$ °C

При поджаривании в толстом перемешиваемом слое (высота слоя составляла 200...250 мм) тепло зерновой массе передается от дна и стенок камеры. Для равномерного нагрева всей массы зерно перемешивается специальным устройством – мешалкой. Данные замеров температуры зерна в различных местах камеры и на разной высоте слоя показали, что максимальное расхождение значений температуры не превышает 6...7 градусов. Вполне естественно, что более высокая температура зерна наблюдалась у стенок и дна камеры, однако подгорания зерна не было. Средняя температура зерна в камере возрастала менее ин-

тенсивно, чем в тонком слое, но уже через 10 мин составляла 60 °С (рис. 5.4) при температуре поверхности 100 °С и 90 °С при $t_n = 200$ °С. При дальнейшем нагреве температура зерна поднималась медленнее и через 60 минут достигала 80...85 °С при $t_n = 100$ °С и 140...145 °С при $t_n = 200$ °С. В течение 90 мин зерно нагревалось до 80...85 °С при $t_n = 100$ °С, до 110...115 °С при $t_n = 150$ °С и до 140...145 °С при $t_n = 200$ °С.

На основании исследований процесса кондуктивного нагрева зерна подтверждено, что температурное поле в перемешиваемом слое зерна описы-

вается уравнением (3.28) при теплофизических характеристиках $\frac{\alpha}{\lambda} = 650 \text{ л/м}$, $a = 5,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{ч}$. Температурное поле в слое зерна в координатах безразмер-

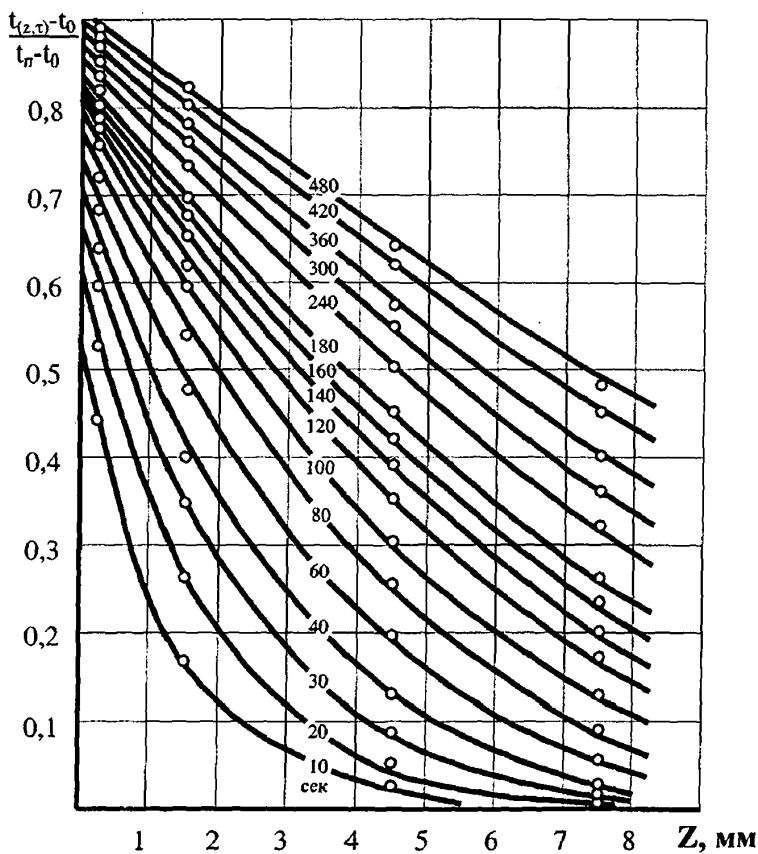


Рис. 5.5 Безразмерное температурное поле в перемешиваемом слое зерна при кондуктивном нагреве

ная температура – толщина неперемешиваемого слоя при кондуктивном нагреве приведена на рис. 5.5 при различной длительности теплового воздействия.

Сплошными линиями показано расчетное значение температуры, точками – экспериментальные данные исследований. Расхождение расчетных и экспериментальных данных не превышает 5...7 %. Этот обобщенный график позволяет определить температуру зерна на заданной глубине слоя в произвольный момент времени при известных начальных значениях температуры зерна и поверхности.

Анализ данных показывает, что температура поверхности контакта в течение нескольких секунд приближается к температуре греющей поверхности, вглубь массива тепло распространяется медленно. При длительности контакта до 30 секунд температурный перепад релаксируется в пределах одного ряда зерен, при времени теплового воздействия до 60 секунд тепловой поток захватывает второй ряд зерен. В дальнейшем тепло проникает в последующие слои, однако скорость распространения теплового потока уменьшается со временем. Это подтверждается изменением температурного градиента по направлению теплового потока. Аналитическим путем (формула 3.32) установлено, что градиент температуры имеет переменную величину во времени и по координате и зависит от разности температур греющей поверхности и материала. На рис. 5.6 представлено изменение градиента температуры во времени и по толщине слоя на основе формулы (2.32) при следующих тепло-

физических характеристиках $\frac{\alpha}{\lambda} = 650 \text{ л/м}$, $a = 5,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{ч}$. Эксперименталь-

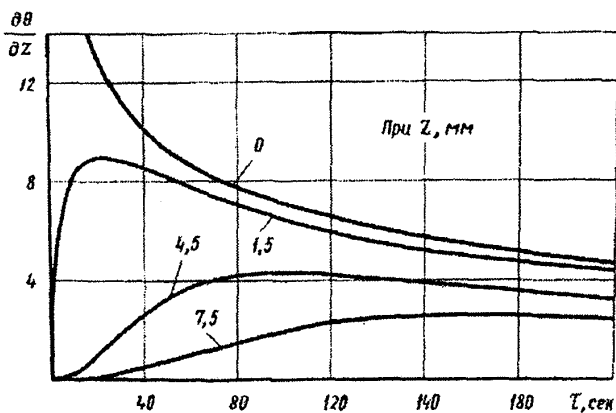


Рис. 5.6. Изменение градиента температуры, отнесенного к первоначальному перепаду, при кондуктивном нагреве слоя

ные значения градиента температуры были получены методом графического дифференцирования. Как показывают результаты, величина градиента температуры достигает наибольшего значения в начальный период у поверхности зерна, а затем убывает со временем и сдвигается в глубину слоя.

Таким образом, при кондуктивном подводе тепла вследствие малой величины активной поверхности теплообмена по сравнению с общей поверхностью зерновая масса без интенсивного перемешивания нагревается медленно, хотя коэффициент теплообмена между греющей поверхностью и зерном имеет значительную величину. При непродолжительном контакте это приводит к локальному нагреву контактирующего ряда зерен.

5.3. Влияние поджаривания на углеводный комплекс ячменя

Приведенные в таблице 5.1 данные свидетельствуют о том, что количество “сырой” клетчатки в процессе поджаривания нешелушенного ячменя не изменяется. Происходит значительное разрушение крахмала, количество разрушенного вещества составляет 7,64–16,41 %.

Таблица 5.1

Изменение углеводов ячменя (необрушенного) в процессе поджаривания

№ п/п	Температура обработки, °С	Время воздействия, мин	Показатели			
			Влажность, %	“Сырая” клетчатка, кол-во	крахмал	
					к-во	разруш., %
1	Исходный	-	11.3	5.19	51.32	-
2	100	90	7.42	4.71	42.70	16.80
3	150	60	7.01	5.57	45.50	11.34
4	175	30	6.44	5.03	-	-
5	200	10	7.82	4.63	44.60	13.10
6	200	30	6.42	4.54	47.40	7.64
7	200	60	1.83	4.90	45.30	11.74
8	200	90	2.08	5.50	42.90	16.41
9	250	5	7.38	5.02	47.30	7.84
10	250	15	6.41	5.27	47.40	7.64
11	250	30	4.51	4.88	42.70	16.79

5.4. Влияние тепловой обработки поджариванием на декстринизацию крахмала

а) сухого ячменя

Как уже отмечалось, зоотехническими исследованиями показано, что для молодняка животных, в частности поросят, у которых активность амилолити-

ческих ферментов в слюне развита недостаточно, необходимо перевести крахмал в легкоусвояемую форму углеводов – декстрины и т. п. Декстрины образуются при неполном гидролизе крахмала. На практике осуществляется ферментный гидролиз, термический, кислотный.

На комбикормовых заводах, с оборудованием итальянской фирмы Джи-э-Джи с этой целью установлены машины для декстринизации крахмала ячменя методом поджаривания.

В лабораторных условиях, моделирующих условия в обжарочной печи фирмы Джи-э-Джи, установлено, что при температуре поверхности до 150 °С и времени поджаривания до 5 мин температура зерна составляет до 100 °С (табл. 5.2). В этом случае преобразование крахмала в декстрины можно объяснить ферментативным гидролизом. Однако увеличение содержания декстринов незначительно и составляет в среднем 1 %. При этом процесс декстринизации происходил примерно одинаково как для шелушеного, так и нешелушеного ячменя. Влажность зерна (постоянно) уменьшалась до 6–7 %, снижение влажности тормозило ферментативный гидролиз. С повышением температуры греющей поверхности до 200–250 °С температура зерна через несколько минут (4–10 мин) превышает 100 °С и через 30 мин достигает 150–200 °С. Влажность зерна уменьшалась более интенсивно, в течение 90 мин зерно высушивалось до 3–4 %. Содержание декстринов увеличивалось до 2,0...2,5 %. Очевидно, при этих условиях происходит термический и кислотный гидролиз за счет фосфорной и других органических кислот, содержащихся в зерне. Участие в этом процессе ферментов по всей вероятности незначительно, т. к. известно, что нагревание ферментов до 60–70 °С приводит к их частичной инактивации, а при температуре 100 °С они полностью теряют свою активность.

Таким образом, при обработке ячменя влажностью до 14,0 % сухим теплом количество декстринов увеличивается на 2,0...2,5 %. Дальнейшее повышение режимных параметров: температуры греющей поверхности и длительности обработки приводило к обугливанию зерна. Зерно приобретало обгорелый (не товарный вид) и горьковатый вкус. Эндосперм зерна имел хрупкую структуру и изменял цвет от белого до желтого и светло-коричневого.

В зерне, поджаренном при высоких параметрах обработки, цвет декстринов также изменяется от белого в исходном ячмене, до желтого. Желтый цвет декстринов свидетельствует о том, что они относятся к группе пиродекстринов – труднопереваримых углеводов. Последние образуются при сухом нагреве зерна до температуры 200 °С и выше за счет молекулярных изменений крахмала, сопровождающихся реакциями образования новых связей.

Таким образом, при обработке ячменя влажностью до 14 % сухим теплом, в частности методом поджаривания на нагретой металлической поверх-

Таблица 5.2

Влияние температуры греющей поверхности и длительности обработки на степень декстринизации крахмала

№ п/п	Температура греющей поверхности, °С	Время обработки, мин	Наименование продукта					
			нешелушенный ячмень			шелушенный ячмень		
			начальная влажность, %	конечная влажность, %	содержание декстринов, %	начальная влажность, %	конечная влажность, %	содержание декстринов, %
		исходный образец	14,0		2,7	12,0	12,0	3,1
1	100	30		11,6	2,8		9,6	3,2
		60		11,0	3,6		9,4	3,5
		90		10,2	4,0		8,8	3,8
		120		9,4	5,0		8,3	4,2
2	150	30		11,3	2,8		9,3	3,1
		60		9,8	3,2		8,9	3,5
		90		7,2	3,5		7,8	3,8
		120		6,4	4,2		6,5	4,2
3	200	30		10,5	3,0		8,7	3,5
		60		4,5	3,7		4,9	4,0
		90		4,1	4,3		3,5	4,5
4	250	30		6,2	3,5		5,1	3,5
		60		5,1	4,9		4,8	4,4
		90		3,6	5,5		3,2	5,2

ности, при условии сохранения товарного вида зерна, крахмал в незначительном количестве (до 2,0–2,5 %) преобразуется в декстрин. В результате обработки ячменя при высоких режимных параметров, когда зерно изменяет цвет, в конечном продукте образуются пиродекстрины, которые относятся к труднопереваримым углеводам, следовательно, питательная ценность такого продукта не улучшается.

б) влажного ячменя

Известно, что гидролиз крахмала более интенсивно проходит при наличии свободной влаги. Для выявления влияния влажности ячменя на процесс декстринизации его крахмала. В опытах использовали зерно ячменя, искусственно увлажненное до 11, 13, 15, 17, 19, 23, 26, 30, 35, 40, 45 %. Увлажнение зерна проводили водой комнатной температуры, затем помещали в банки с притертыми пробками и выдерживали при температуре +3 ... +5 °С (в холодильнике) в течение 3–4 суток для равномерного распределения влаги по всему объему зерна.

Поджаривание увлажненного зерна осуществляли на греющей поверхности в тонком слое. В этих опытах наблюдалось большее вспучивание зерна и

при высокой температуре греющей поверхности зерна растрескивались. Измерение температуры в зернах показало, что они начинают растрескиваться при температуре порядка 110–120 °С. При этом зерна почти в 2 раза уменьшаются в объеме.

Наблюдение за процессом поджаривания влажного зерна показало, что зерна сначала вспучиваются, затем растрескиваются, при дальнейшей обработке влажность их снижается до 5–6 %, и при большой длительности процесса могут обугливаться.

Было отмечено, что наибольшее количество декстринов образуется в зерне, если оно растрескивается и затем подсушивается. Поскольку при низкой температуре нагрева зерна даже не вспучиваются, поэтому для интенсификации процесса поджаривания температура греющей поверхности была повышена от 250 до 300 °С.

При этом длительность обработки составила: при $t_n = 250$ °С – 40 мин, при $t_n = 270$ °С – 15 мин и при $t_n = 300$ °С – 10 мин.

Эксперименты показывают (рис. 5.7, 5.8), что влажность зерна оказывает большое влияние на степень декстринизации крахмала. При поджаривании ячменя влажностью до 15 % происходит незначительное увеличение содержания декстринов в нем. Количество декстринов значительно возрастает при повышении влажности до 20–25 % и достигает максимального значения при полном увлажнении зерна – 35–40 %. При исследованных режимах, которые могут применяться в практике, количество декстринов достигало 18–20 % ко всему зерну. Если учесть, что в исходном ячмене содержится ≈ 51 % крахмала, то, следовательно, на этого количества почти 40 % преобразовалось в декстрины.

Влияние влаги на декстринизацию крахмала следует проанализировать исходя из форм связи влаги с материалом. В настоящее время установлено, что в зерне вся влага связана физико-химически. Согласно классификации акад. П. А. Ребиндера, принятой в настоящее время, формы связи влаги делятся на три группы: химическая, физико-химическая и физико-механическая.

Анализируя наши данные (рис. 5.8, 5.9) по изменению влажности и степени декстринизации в процессе поджаривания, можно утверждать, что большая часть декстринов образуется, когда влага в зерне соответствует физико-химической форме связи. К этим видам относятся влага осмотически удержанная (влага набухания), структурная влага, адсорбционно-связанная.

Связанная вода, особенно прочно адсорбированная на поверхности мицелля, отличается рядом свойств – повышенной плотностью, температурой замерзания, труднее испаряется, является плохим растворителем и др.

При поджаривании происходит высушивание зерна. Вначале удаляется влага макро- и микрокапилляров (связанная физико-механическая), затем

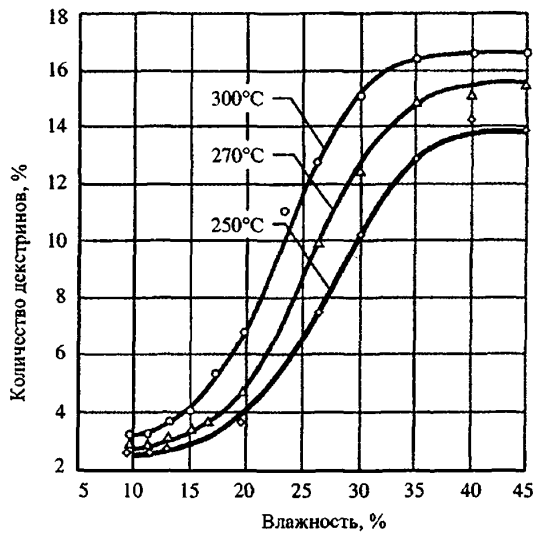


Рис. 5.7. Зависимость степени декстринизации крахмала от влажности зерна при поджаривании (ячмень шелушенный)

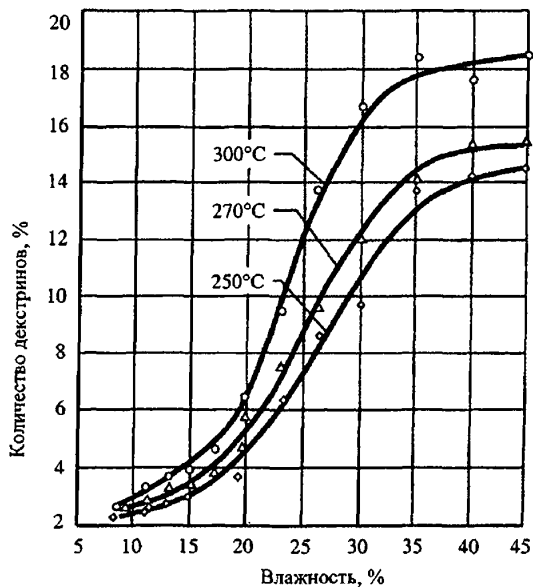


Рис. 5.8. Зависимость степени декстринизации крахмала от влажности зерна при поджаривании (ячмень нешелушенный)

физико-химическая влага. Поскольку процесс нагрева протекает интенсивно, а процесс сушки во много раз медленнее, то влага в зерне прежде всего превращается в пар.

Анализ опытов показывает, что процесс декстринизации протекает при наличии слабо связанной влаги в зерне, т. е. при влажности зерна выше 15 %. При этом наличие воды и высокая температура способствуют быстрому протеканию процесса гидролиза крахмала до декстринов. Очевидно, в реакции гидролиза с повышением температуры зерна участвует влага всех форм связи. Вначале нагретая свободная вода (влага набухания, структурная) значительно ускоряет реакцию гидролиза крахмала. В этой фазе образуется основное количество декстринов. Далее по мере высушивания в реакции участвует влага, адсорбированная на стенках клеток. Температура зерна в этой стадии достигает значения выше 150 °С, следовательно, влага находится уже в виде пара. Переходя в парообразное состояние, влага во много раз увеличивается в объеме, и, ограниченный стенками клеток, пар создает значительное давление. По мере нагрева давление достигает такой величины, что разрывает стенки клеток ткани и оболочки зерна.

По всей вероятности, влага участвует в реакции гидролиза, находясь и в парообразном состоянии.

С увеличением длительности нагрева температура зерна достигает 200 °С и выше. Зерна вспучиваются, увеличиваются в объеме более чем в 2 раза, оболочки их разрываются. Преобразование крахмала в декстрины здесь уже осуществляется за счет термического гидролиза и, частично, кислотного.

При одинаковой влажности продукта количество декстринов, образующихся в нем при поджаривании, зависит от температуры греющей поверхности и увеличивается с повышением последней. Так, например, в нешелушенном ячмене влажностью 26 %, обработанном при температуре 250 °С, получается 8,7 % декстринов, при $t_n = 270$ °С – 9,5 %, при $t_n = 300$ °С – 13,7 %. Эта тенденция сохраняется при всех исследованных значениях влажности – от 15 до 35 %. Максимальное количество декстринов было получено в ячмене влажностью 35 % при поджаривании его на греющей поверхности $t_n = 300$ °С в течение 10 мин и составляло нешелушеного ячменя 18,7 % для шелушеного – 16,5 %. Увеличение степени декстринизации с повышением температуры можно объяснить не только гидролизом крахмала, но и деструкцией его, т. е. разрывом и укорачиванием цепей крахмальных зерен, происходящим в результате взрывания зерновки. При поджаривании температура зерна достигает 200 °С и выше. При этом почти вся влага, в том числе и внутриклеточная, адсорбированная на поверхностях коллоидных частиц, превращается в парообразное состояние, значительно увеличиваясь в объеме. Пар, равномерно распределенный по всему зерну, создает давление внутри зерновки. Величина этого давления зависит от ис-

ходной влажности, температуры нагрева и прочности оболочек, в которые заключен пар. Если структура и оболочка зерновки не повреждена, вероятно, давление внутри ее будет больше, и, следовательно, конечный эффект взрывания будет выше. Исследования, проведенные с шелушеным и нешелушеным ячменем, показали, что при прочих равных условиях в нешелушенном ячмене образуется больше декстринов на 4–5 %. Это можно объяснить тем, что плотная оболочка зерна препятствует быстрому испарению пара в зерне, в результате чего внутри зерна создается давление, приводящее к вспучиванию зерна, разрушению его структуры и разрыву наружной оболочки (взрыву зерна). Обрушенные зерна меньше вспучивались, очевидно, из-за того, что через разрывы тканей и поврежденную наружную поверхность пар выходил из зерновки, не создавая высокого давления. Количество декстринов у этого ячменя было меньше.

Таким образом, наибольшая степень декстринизации крахмала достигается в ячмене с начальной влажностью 30–35 % при поджаривании его в тонком слое на греющей поверхности с температурой 280...300 °С и составляет 16–18 % – по отношению ко всему зерну.

5.5. Влияние тепловой обработки ячменя поджариванием на белковый комплекс ячменя

Экспериментальные результаты представлены в таблицах 5.3 и 5.4.

Приведенные данные свидетельствуют о том, что при обжаривании ячменя в пленках при температуре не ниже 200 °С разрушения “сырого” протеина не происходит.

Таблица 5.3

Изменение белков необрушенного ячменя в процессе поджаривания

Режим обработки		Влажность, в %	Содержание белка (N _{оx5,7}) в %	Содержание фракций белков в % к общему белку				Белки нерастворимого остатка %
температура, °С	длительность, мин			водорастворимых	соле-растворимых	спирто-растворимых	шелоче-растворимых	
Исходный		11.8	13.8	7.41	4.38	15.69	54.72	19.80
150	30	9.6	13.71	6.62	3.68	10.64	49.09	28.02
“.”	60	7.7	13.64	5.90	4.30	10.46	43.20	36.14
“.”	90	4.0	13.67	1.29	4.61	9.00	40.68	44.42
200	30	7.3	13.55	5.42	2.73	5.47	55.16	31.22
“.”	60	5.2	13.22	3.75	2.20	4.22	59.16	33.67
“.”	90	3.3	12.94	2.68	1.51	4.89	59.60	21.32
250	30	6.5	13.46	4.93	3.25	4.11	59.85	27.86
“.”	60	4.7	12.87	3.59	2.62	2.35	60.68	23.76

Таблица 5.4

Изменение белков обрубленного ячменя в процессе поджаривания

Режим		Влажность, %	Сырой протеин кол-во, %	Фракции белка, %				Переваримого протеина %	Коефф. переваримости %
температура обработки, °С	Время воздействия, мин			водорастворимые	соле-растворимые	спирто-растворимые	щелочерастворимые		
Исходный		11,86	13,87	7,50	4,58	14,50	55,80	11,52	83,0
150	30	9,87	13,71	6,70	4,21	12,60	49,09	11,39	82,5
150	60	7,70	13,64	6,0	3,98	11,52	43,20	11,07	81,8
150	90	4,00	13,67	2,10	3,90	9,00	40,68	10,90	80,0
200	30	7,37	13,53	5,71	2,80	8,12	50,0	10,02	78,5
200	60	5,20	12,80	4,85	2,70	7,10	49,1	9,86	77,0
200	90	3,86	12,81	3,80	2,55	6,05	47,5	9,60	75,0

Кроме того, при всех температурных режимах обработки и экспозициях происходит снижение растворимости альбуминов, глобулинов, глютолинов и проламинов ячменя, что свидетельствует о происходящем процессе денатурации, причем глубина процесса повышается с увеличением режима обработки. При высоких температурах (250 °С) растворимость белков понижается, что говорит о более глубоком распаде белковой молекулы.

Поджаривание обрубленного ячменя при двух температурных режимах 150° и 200 °С в различных экспозициях показало, что обработка при 150 °С не приводит к разрушению “сырого” протеина, температура же 200 °С в течение 30–90 мин снижает количество “сырого” протеина на 7,65–9,46 %.

При температуре 150 °С происходит снижение водорастворимых белков.

Количество переваримого пепсином протеина не изменилось при температуре 150 °С, а при 200 °С в течение 90 мин количество его падает на 9,6 %. Коэффициент переваримости протеина при всех температурных режимах снижается с 83,0 до 75,0 %.

5.6. Влияние поджаривания на микроструктуру зерна ячменя

Исследования микроструктуры зерна, подвергнутого термической и гидротермической обработке, интересно с точки зрения тех представлений, которые объясняют механизм модификации крахмальных гранул и белка под воздействием тепла и влаги. В литературе в настоящее время имеются работы, позволяющие оценить характер изменения микроструктуры зерна злаковых в процессе гидротермической обработки при производстве муки и крупы, а также при кулинарной обработке.

Изучение микроструктуры зерна проводили на электронном сканирующем микроскопе при увеличении в 200, 500, 2000 и 3000 раз. Для исследования были отобраны образцы исходного зерна и обработанного различными методами. На зерновках были выполнены срезы различных их частей: эндосперма и оболочек с алейроновым слоем.

Микрофотографии эндосперма исходного зерна ячменя приведены на рис. 5.9...5.12.

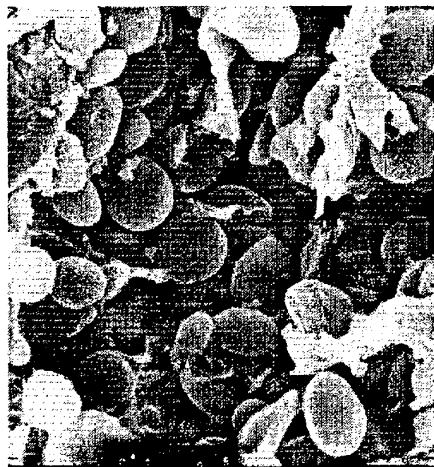
Как видно, эндосперм ячменя состоит из относительно тонкостенных клеток, внутри которых крахмальные гранулы хорошо утоплены в белковую матрицу и образуют монолитную структуру. Гранулы правильной овальной или яйцевидной формы.

Изучение снимков исходного зерна (рис. 5.9, 5.10) подтверждают известную теорию, что в эндосперме неизмельченного зерна протеин образует матрицу, в которую вкраплены крахмальные гранулы. Структура поверхности крахмальных гранул влияет на сорбционную способность водяных паров, химическую реактивоспособность и на интенсивность гидролиза крахмала под действием ферментов.

В наших исследованиях наибольший интерес представляет разрушение крахмальных гранул с точки зрения атакуемости его ферментами. В процессе тепловой обработки поджариванием происходит изменение белковой матрицы и некоторые разрушения крахмальных гранул. Крахмальные гранулы уве-



*Рис. 5.9. Микроструктура
исходного зерна.
Увеличение 500 раз*



*Рис. 5.10. Микроструктура
исходного зерна.
Увеличение 1000 раз*



*Рис. 5.11. Эндосперм исходного зерна ячменя.
Увеличение 5000 раз*



*Рис. 5.12. Алевроновый слой исходного зерна ячменя.
Увеличение 1000 раз*

личиваются в размере (рис. 5.14), происходят частичные разрывы их оболочки, что, в конечном счете, улучшает их атакуемость аминолитическими ферментами. Алевроновый слой также претерпевает значительные изменения (рис. 5.13).



*Рис. 5.13. Алевроновый слой поджаренного зерна ячменя.
Увеличение 1000 раз*



*Рис. 5.14. Эндосперм зерна ячменя, поджаренного в течение 4 мин.
Увеличение 3000 раз*

Глава 6

ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ЗЕРНА КОНВЕКТИВНО-КОНДУКТИВНЫМ МЕТОДОМ

Передача тепла зерну в барабанном обжарочном агрегате (рис. 6.1) осуществляется в основном конвективным способом от топочных газов, пронизывающих слой, и кондуктивным – от нагретых стенок барабана. Количество тепла, переданного каждым способом теоретически определить затруднительно. Нагрев зерна конвекцией определяется скоростью продуваемого теплоносителя и активной поверхностью слоя, которая зависит от степени разрыхления (или перемешивания) его. При нагреве зерна кондукцией в толстом слое температура его определяется длительностью контакта с греющей поверхностью.

По нашим данным при температуре греющей поверхности 200 °С зерно в толстом перемешиваемом слое нагревалось до 95–97 °С через 10 мин, до 110 °С – через 20 мин и до 120 °С через 30 мин. Одновременно совместное воздействие нагретых топочных газов и стенок аппарата будет интенсифицировать процесс нагрева зерна.

На процесс нагрева в барабанном обжарочном агрегате оказывает влияние большое число факторов: температура стенок барабана, температура и скорость воздуха, степень заполнения и скорость вращения барабана и др.

Исследования в лабораторных условиях проводили на лопаточном смесителе с обогреваемыми стенками и продувкой горячим воздухом вдоль смесителя. При этом условия проведения опытов по-возможности приближали к условиям обработки в барабанном обжарочном агрегате, но изменяли температуру стенок смесителя и температуру и скорость воздуха.

6.1. Изменение температуры в процессе нагрева и охлаждения зерна при конвективно-кондуктивном методе

Проведенные исследования показывают, что, как и предполагалось, при нагреве каждым способом в отдельности температура зерна возрастает медленнее, чем при совместном их воздействии. Для примера на рис. 6.2 показано, что при температуре стенок аппарата и воздуха 200 °С температура зерна при кондуктивном способе нагрева составляла при длительности 10 мин – 100 °С, при конвективном – 110 °С, при совместном их воздействии – 120 °С. Поскольку в агрегате стенки барабана и зерно нагреваются одним и тем же теплоносителем – топочными газами, то в дальнейшем исследования проводили при одинаковом значении температур воздуха и стенок аппарата.

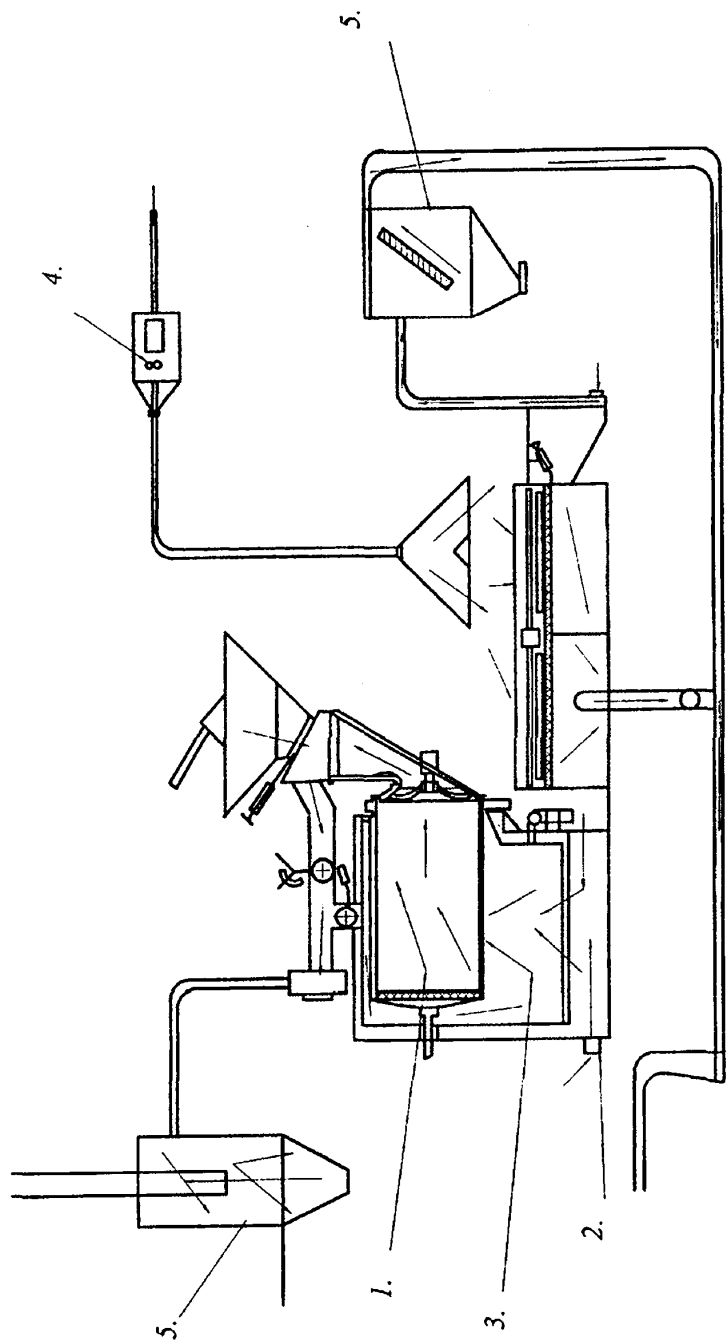


Рис. 6.1. Схема барабанного обжарочного агрегата:
 1 — обжарочный барабан; 2 — форсунки; 3 — топка; 4 — датчик; 5 — вентилятор

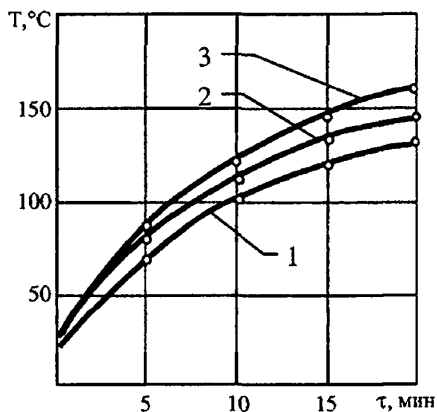


Рис. 6.2. Изменение температуры зерна ячменя ($T = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$) при:
 1 – кондуктивном нагреве;
 2 – конвективном нагреве;
 3 – конвективно-кондуктивном нагреве

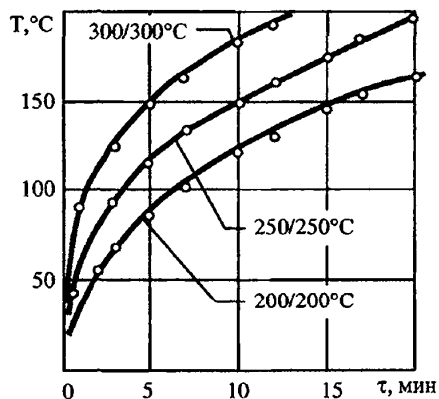


Рис. 6.3. Изменение температуры зерна пшеницы и ячменя при температуре стенок и воздуха 200, 250 и 300 °C

Результаты замеров температуры показывают, что скорость нагрева и величина температуры зерна зависят от температуры греющих стенок и воздуха. При температуре стенок 200 °C и воздуха – 200 °C зерно нагревалось до 120 °C через 10 мин и до 150–160 °C через 20 мин.

При температуре воздуха и стенок аппарата 250 °C температура зерна пшеницы и ячменя составляла 140–150 °C через 10 мин нагрева и достигала 200 °C по истечении 17–18 мин (рис. 6.3).

С повышением режимных параметров до 300 °C темп нагрева зерна возрастал и температура его составляла 180 °C через 10 мин, 200 °C – через 12–13 мин. Нагрев зерна пшеницы и ячменя, как примерно равных по гранулометрическому составу, проходит за одни и те же промежутки времени до одинаковой величины. Темп нагрева кукурузы, имеющей большие размеры, несколько (на 15–20 °C) ниже (рис. 6.4).

О влиянии конвективной составляющей в процессе нагрева указывает тот факт, что с увеличением скорости теплоносителя темп нагрева возрастает (рис. 6.5 и 6.6). На примере нагрева зерна пшеницы и кукурузы показано, что при увеличении скорости продувки в смесителе с 0,5 до 1,5 м/с температура зерна пшеницы и кукурузы повышалась по истечении 10 мин нагрева на 30–35 °C и составляла для пшеницы соответственно 148 и 186 °C, для кукурузы – 122 и 162 °C.

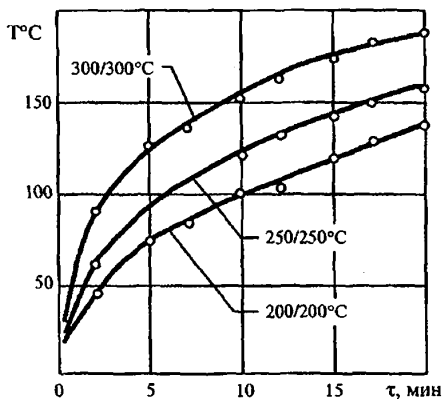


Рис. 6.4. Изменение температуры зерна кукурузы при кондуктивно-конвективном нагреве

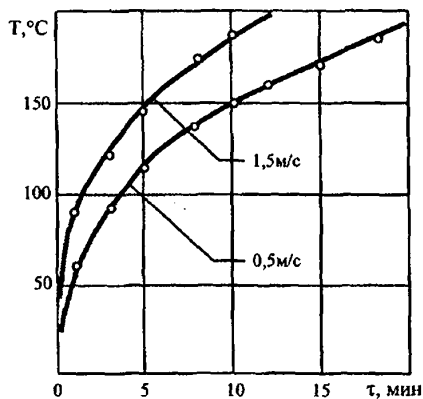


Рис. 6.5. Нагрев зерна пшеницы кондуктивно-конвективным способом при разной скорости воздуха

На этом основании можно сделать заключение, что повышение скорости теплоносителя - воздуха является одним из путей интенсификации нагрева зерна и, следовательно, процесса в целом.

Характер нагрева зерновой массы изменяется при добавлении в нее воды. Нашими исследованиями установлено, что вносить воду следует в зерновую массу при температуре 60–80 °С. При выполнении этого условия температура зерна после внесения воды несколько снижалась (рис. 6.7), но затем снова

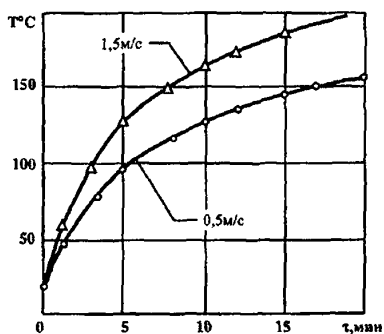


Рис. 6.6. Нагрев зерна кукурузы кондуктивно-конвективным способом при разной скорости воздуха

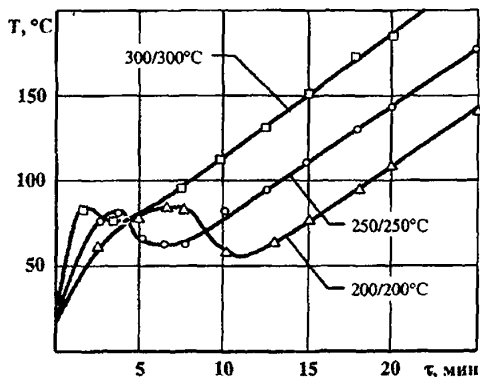


Рис. 6.7. Изменение температуры зерна пшеницы при конвективно-кондуктивном нагреве с увлажнением в процессе обработки

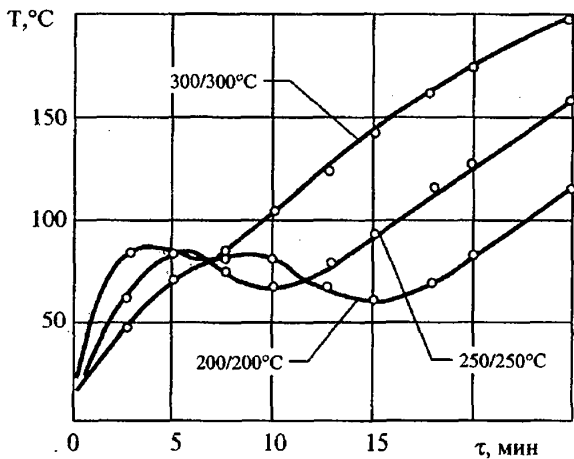


Рис. 6.8. Изменение температуры зерна кукурузы при конвективно-кондуктивном нагреве с увлажнением в процессе обработки

возрастала. Общий период нагрева при этом увеличился на 5–7 мин. Однако качественные показатели были выше, чем при обработке неувлажненного зерна.

Пропаренное зерно нагревается медленнее, чем зерно кондиционной влажности (рис. 6.8), вследствие того, что на испарение влаги затрачивается часть подводимого тепла. В этом случае длительность процесса обжаривания увеличивается на 5–6 мин.

В процессе обжаривания зерно нагревается до температуры 100 °C. После нагрева его необходимо быстро охладить, так как, находясь в течение нескольких минут при такой температуре, зерно начинает обугливаться. В барабанном обжарочном агрегате охлаждение зерна осуществляется на сите в продуваемом переменном слое. Скорость продувки воздухом равна 0,5–0,6 м/сек, начальная нагрузка на решетку 45–50 кг/м².

Экспериментальные исследования показывают, что при скорости воздуха 0,5 м/с в плотном слое охлаждение зерна происходит неравномерно. При высоте слоя 120–150 мм разность температур зерна верхнего и нижнего слоев достигает 50 градусов. Для выравнивания температуры зерна по высоте слоя применяется механическое перемешивание. При этих условиях вся масса зерна охлаждается относительно равномерно.

Процесс охлаждения зерна в плотном перемешиваемом слое (рис. 6.9) при различных нагрузках на решетку показывает, что скорость охлаждения довольно высокая, и при условиях, близких к условиям в барабанном обжарочном агрегате, длительность процесса составляет 3–4 мин. При этом, как и следовало ожидать, длительность охлаждения уменьшается при снижении нагрузки. Темп охлаждения зерна при начальной температуре его 200 °C, температуре воздуха 21 °C, скорости продувки 0,5 м/с и нагрузке 49 кг/м² составляет 80 градусов в минуту, процесс охлаждения заканчивался через 3–4 мин. С уменьшением нагрузки до 7,9 кг/м² темп охлаждения возрастает до 150–170 градусов в минуту и длительность процесса охлаждения сокращается до 1,5–2,0 мин.

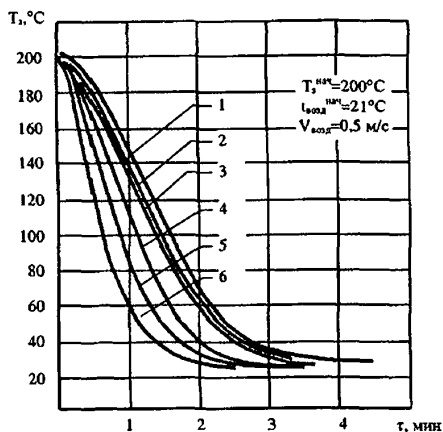


Рис. 6.9. Кривые охлаждения зерна при различной нагрузке на решетку.
 $q_1 = 49,0$; $q_2 = 38,0$; $q_3 = 31,6$;
 $q_4 = 25,0$; $q_5 = 15,7$; $q_6 = 7,9$ кг/м²

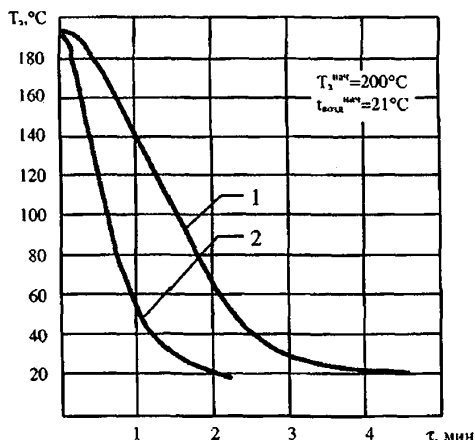


Рис. 6.10. Кривые охлаждения ячменя при различной скорости воздуха.
 $V_1 = 0,5$ м/с; $V_2 = 2,2$ м/с

Известно, что количество переданного тепла определяется коэффициентом теплообмена (условиями процесса) и площадью поверхности, участвующей в теплопередаче. В связи с этим, повышение скорости охлаждающего агента приводит наряду с увеличением коэффициента теплообмена и к увеличению активной поверхности зернового слоя. Увеличение скорости воздуха до величины, при которой плотный слой переходит в кипящее состояние, исключает операцию механического перемешивания. По нашим опытным данным (рис. 6.10) при увеличении скорости воздуха до 2,2 м/с, при которой слой зерна ячменя находится в кипящем состоянии, длительность процесса охлаждения сокращается до 1,5–2,0 мин, темп охлаждения достигает 200 градусов в минуту.

Определено, что при скорости воздуха выше 0,4–0,5 м/с и перемешивании слоя, а также в кипящем слое, качественные показатели зерна не ухудшаются. Установлено, что необходимо быстро снижать температуру зерна во избежание его обугливания и спекания. Конечная температура зерна должна быть ниже 30 °С, так как необходимая масса зерна сохраняет высокую температуру, что при хранении приводит к ухудшению его качества.

Для зерна других культур показано, что зерно кукурузы, как имеющей большие размеры по сравнению с ячменем охлаждается медленнее (рис. 6.11). При начальной температуре зерна 200 °С, температуре воздуха 22 °С, скорости охлаждающего воздуха 0,5 м/сек и удельной нагрузке на решетку до

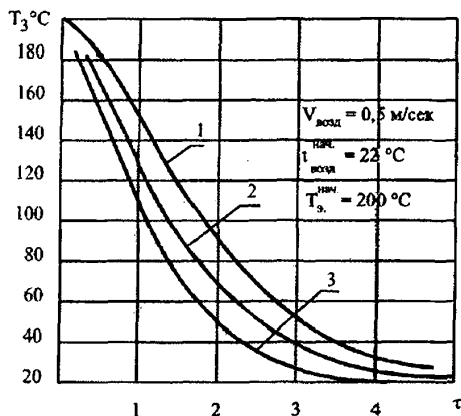


Рис. 6.11. Кривые охлаждения зерна при различной нагрузке на решетку. $q_1 = 47,4$; $q_2 = 31,6$; $q_3 = 15,8$ кг/м²

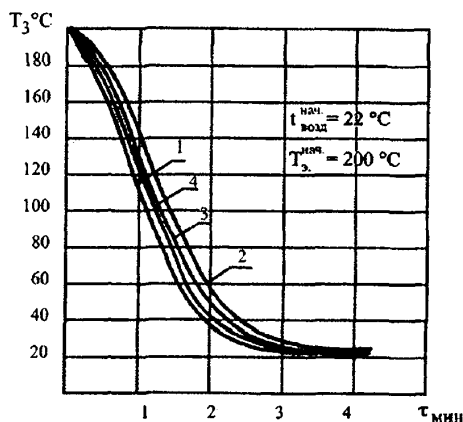


Рис. 6.12. Кривые охлаждения зерна пшеницы.

$$q_1 = 47,4; q_2 = 47,4; q_3 = 31,6; q_4 = 15,8; \text{ кг/м}^2, V_{\text{возд}} = 2,2; V_{\text{возд}} = 0,5; V_{\text{возд}} = 0,5; V_{\text{возд}} = 0,5 \text{ м/с}$$

47,4 кг/м² длительность процесса составляет 4–5 мин, темп охлаждения – около 50 град/мин. Качество зерна при этом не ухудшается.

Процесс охлаждения пшеницы протекает примерно с такой же скоростью, как охлаждение ячменя (рис. 6.12).

При исследованных режимах: начальная температура зерна 200 °С, температура воздуха 22 °С, скорость воздуха от 0,5 до 2,2 м/с – длительность охлаждения составляет до 3–4 мин.

Таким образом, на основании экспериментов установлено, что для предотвращения обугливания и спекания температура обжаренного зерна должна быть в течение 0,5–1,0 мин снижена до безопасного значения (ниже 140...150 °С). Охлаждение зерна должно проводиться до температуры, близкой к температуре охлаждающего воздуха (не превышать ее более чем на 10 градусов), во избежания ухудшения качества при хранении. Общая длительность процесса охлаждения зерна не должна превышать 5–7 мин. Для выполнения этих условий охлаждение зерна должно производиться в перемешиваемом слое при скорости продувки выше 0,5 м/с. Процесс охлаждения интенсифицируется с повышением скорости воздуха и переводом слоя в кипящее состояние. В этом случае темп охлаждения возрастает более чем в 2 раза, а длительность процесса сокращается до 1,5–2,0 мин.

6.2. Влияние конвективно-кондуктивного нагрева на физические свойства и показатели качества зерна

В процессе обработки водой и теплом физические, технологические и качественные показатели зерна претерпевают изменения. Проведенными ранее по этой теме исследованиями показано, как изменяются эти показатели при различных режимах обработки. В данных исследованиях приведены показатели конечного продукта ячменя, кукурузы, пшеницы.

Экспериментальные результаты показывают (табл. 6.1), что с повышением температурного режима длительность обработки до получения продукта высокого качества сокращается.

Обработка зерна при низком температурном режиме имеет большую длительность процесса, что приводит к снижению коэффициента переваримости протеина при незначительном увеличении содержания декстринов.

При повышении температуры воздуха и стенок аппарата до 300 °С длительность обработки зерна кондиционной влажности снижается до 5–6 мин, коэффициент переваримости протеина уменьшается в меньшей степени, содержание декстринов возрастает.

Лучшие показатели по качеству продукта получаются при увлажнении зерна водой, причем внесение воды следует производить после загрузки зерна в нагретый аппарат. Увлажнение зерна до 18 % и последующее обжаривание при температуре 300 °С обеспечило повышение степени декстринизации крахмала до 19 % при сохранении коэффициента переваримости протеина на том же уровне, какой имеет исходное зерно. Большая степень увлажнения зерна – до 25 % не дает существенного повышения качества.

Предварительное пропаривание не имеет большого преимущества для повышения качества зерна перед увлажнением нагретого зерна теплой водой. Хотя пропаривание способствует увеличению степени декстринизации и переваримости крахмала, но в то же время приводит к понижению переваримости протеина.

Влаготепловая обработка зерна кукурузы выявляет ту же закономерность, что и для ячменя. Однако для кукурузы используемого в опытах сорта содержание декстринов было небольшим – до 3 %, переваримость крахмала возрастает по сравнению с исходным. Качество продукта повышается с повышением температуры обработки до 300 °С и увлажнении водой до 18,0 % – за счет улучшения переваримости крахмала при условии сохранения коэффициента переваримости протеина на исходном уровне.

При использовании зерна пшеницы мучнистых сортов получено, что крахмал пшеницы, так же как ячменя, преобразуется в декстрины. Так же как для других зерновых культур, содержание декстринов возрастает с увеличением

Таблица 6.1

Изменение показателей качества при кондуктивно-конвективном нагреве

Режим обработки	Температура, °С		Длительность обработки, мин	Влажность, %		Содержание декстринов, %	Козфф. переваримости протеина
	предварительная обработка	стенки		воздуха	до обработки		
	Ячмень			12,6	-	2,50	66
-	200	200	18	12,6	2,0	9,05	60
-	250	250	10	12,6	1,9	11,07	60
-	300	300	5	12,6	1,2	12,78	63
увлажнение	200	200	23	18,0	1,8	15,02	62
увлажнение	250	250	9	18,2	1,2	16,75	65
увлажнение	300	300	5	18,2	1,0	18,93	67
увлажнение	250	250	7	24,6	3,0	15,87	63
увлажнение	300	300	5	24,6	2,5	18,45	66
пропаривание	250	250	11	18,3	1,4	17,73	61
пропаривание	300	300	7	18,2	1,2	18,83	65
пропаривание	250	250	12	25,2	3,8	12,32	59
пропаривание	300	300	10	25,2	4,0	14,53	64
	Кукуруза						
-	200	240	25	12,8	3,2	1,25	61
-	250	250	20	12,8	2,8	1,67	62
-	300	300	10	12,8	2,5	2,20	61
увлажнение	200	240	15	18,0	3,7	1,78	63
увлажнение	250	250	13	18,0	3,3	2,17	64
увлажнение	300	300	10	18,0	2,4	2,85	68
	Пшеница						
-	200	200	22	12,8	2,8	3,21	50
-	240	240	18	12,8	2,8	4,44	52
-	300	300	6	12,8	1,8	5,79	54
увлажнение	240	240	22	18,6	3,2	4,93	55
увлажнение	300	300	10	18,6	2,6	11,55	54

температурного режима до 300 °С и увлажнения зерна до 18 %. Коэффициент переваримости протеина обжаренного продукта снижается при обработке сухого зерна в течение продолжительного времени и имеет равное значение с исходным зерном при сокращении длительности до 8–10 мин и повышении температуры до 300 °С.

Таким образом, как уже было показано ранее, питательная ценность зерна возрастает в результате влаготепловой обработки, заключающейся в увлажнении нагретого до 60°C зерна водой, последующем интенсивном нагреве при температурном режиме 300°C в течение непродолжительного времени – до 10–12 мин.

6.3. Обработка зерна конвективно-кондуктивным методом в обжарочных агрегатах

Испытания проводили на зерне ячменя с целью определения температурного режима, обеспечивающего повышение качества зерна.

Данные замеров температуры зерна в процессе нагрева показывают, что температурный режим зависит от начальной влажности зерна, количества подаваемого газа на горелки и др. Температура зерна кондиционной влажности непрерывно возрастает до максимально возможной (рис. 6.13), при увлажнении зерна в начале обработки температура устанавливается на уровне $60\text{--}70^{\circ}\text{C}$ в течение некоторого времени, а затем возрастает (опыт 4). С повышением подачи газа темп нагрева увеличивается (опыты 5 и 6), что обеспечивает сокращение длительности обработки.

В результате обработки крахмал зерна ячменя подвергается термическому гидролизу до декстринов (табл. 6.2). Степень декстринизации зависит от

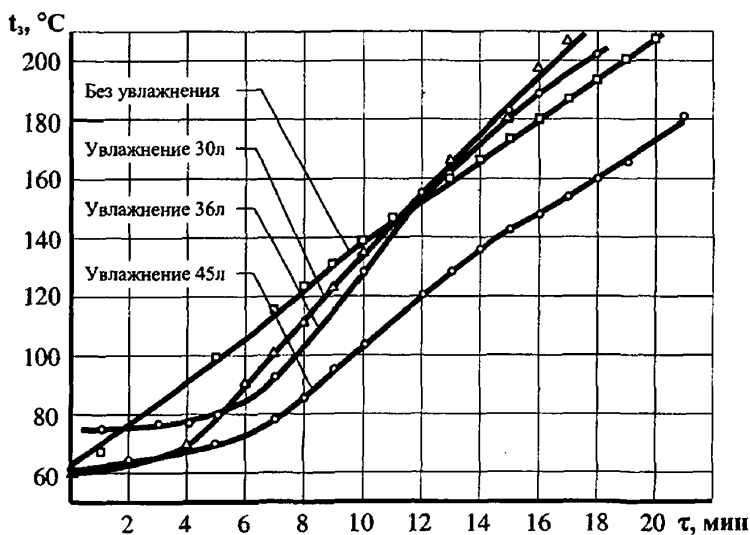


Рис. 6.13. Температурный режим при обжаривании зерна

начальной влажности зерна, длительности обработки и интенсивности подачи газа. Большое количество декстринов образуется при увлажнении зерна водой в барабане в начале обжаривания в объеме 36–40 л.

При обработке зерна кондиционной влажности степень декстринизации крахмала составляет до 16 % при сохранении коэффициента переваримости протеина на исходном уровне. После добавления воды в количестве 36–40 л степень декстринизации возрастает до 34–35 %.

В необрушенном ячмене степень декстринизации крахмала больше, чем в обрушенном, при остальных равных условиях, что объясняется действием "эффекта взрыва" за счет образования пара более высокого давления в неповрежденном зерне, приводящего к деструкции крахмала, разрыву его молекулярных цепей.

Таблица 6.2

*Показатели качества ячменя, обработанного
на барабанном обжарочном агрегате*

№ опыта	Параметры режима			Влажность, %	Содержание декстринов, %	Коэффициент переваримости протеина, %	Клетчатка, %
	подготовка	т, мин	T _ж , °C				
	Ячмень шелушенный			10,0	0,7	57,6	4,04
1	Без увлажнения	10	120	7,2	1,2	58,4	3,94
		15	180	6,0	8,4	59,2	3,52
		18	190	4,0	28,6	51,0	3,40
		21	210	3,6	34,0	46,0	3,12
2	Без увлажнения	13	160	6,4	4,2	58,3	3,62
		16	180	4,2	16,8	58,6	3,65
		19	200	3,6	29,6	52,4	3,68
		22	230	3,2	34,2	46,0	3,18
3	Увлажнение 10 л	10	142	8,2	4,7	59,1	3,70
		16	185	6,0	25,2	59,3	3,59
		19	220	4,2	28,9	56,8	3,55
		22	250	3,0	39,6	45,9	3,40
4	Увлажнение 36 л	10	110	10,4	8,6	58,0	3,92
		15	150	8,6	19,4	59,3	3,70
		20	180	7,6	27,0	55,2	3,60
		25	205	6,0	40,0	41,4	3,48
	Ячмень нешелушенный			10,5	0,5	62,7	4,47
5	Увлажнение 36 л	13	168	14,2	12,8	64,5	3,90
		15	200	11,0	32,9	67,2	3,62
		17	210	9,0	36,2	61,2	3,50
		21	230	6,1	44,4	54,0	3,10
6	Увлажнение 45 л	11	160	15,6	16,0	64,8	3,81
		15	186	12,3	34,2	66,4	3,72
		19	195	9,6	36,8	54,9	3,48
		22	210	7,6	49,6	54,0	3,40

Обжаривание ячменя необрушенного

Использовали ячмень, характеризующийся следующими показателями: исходная влажность 14,8 %, объемная масса 655 г/литр, содержание сырого протеина 13,88 %, переваримого – 8,35 %, крахмала – 55,0 %, клетчатки – 4,97 %, содержание декстринов – 2,42 %.

Регламент работы агрегата следующий: в нагретый барабан загружается порция зерна в количестве 240 кг, включается подача газа, в барабан подается заданное количество воды, далее производится обжаривание, в процессе которого зерно нагревается до 180–200 °С, затем отключается газ и подается порция воды, за счет которой температура зерна снижается, а влажность его возрастает, на этом обжаривание заканчивается и зерно выгружается в охлаждающую чашу.

При обжаривании ячменя без увлажнения (табл. 6.3) (опыт 1) температура его возрастает до 196 °С (рис. 6.14), длительность нагрева составляет 15,5 мин, после добавления воды в количестве 45 л и перемешивания в барабане при отключенной подаче газа в течение 1,5 мин температура зерна снижается до 100 °С, а после охлаждения влажность продукта равнялась 7,4 %. В результате обжаривания количество декстринов возрастает до 10,08 %, однако снижается коэффициент переваримости протеина до 54 %.

При добавлении воды в начале обжаривания в количестве 12 л (опыт 2) темп нагрева несколько снижается, длительность нагрева составляет 14 мин,

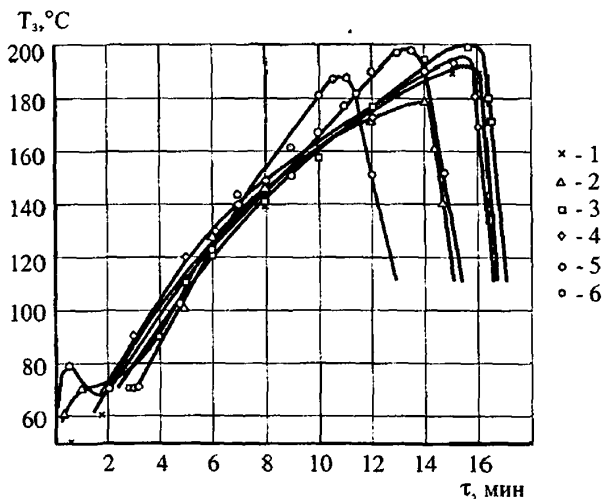


Рис. 6.14. Температурный режим при обжаривании ячменя необрушенного

*Показатели качества необрушенного ячменя,
обработанного на барабанном обжарочном агрегате*

№ опыта	Параметры режима			Влажность, %	Содержание декстринов, %	Коэффициент перевариваемости протеина, %	Содержание клетчатки, %	Содержание крахмала, %
	подготовка	τ , мин	T_2 , °C					
	Ячмень исходный			14,8	2,42	60,2	4,97	55,0
1	Без увлажнения	5	110					
		10	160					
		15,5	196	7,4	10,08	54,0	4,20	49,4
2	Увлажнение 12 л	5	100					
		10	160					
		12	170					
		14	179	6,9	10,19	56,0	2,90	48,1
3	Увлажнение 35 л	5	110		5,13			
		10	154		7,40			
		15	200	7,2	15,60	58,1	3,20	45,2
4	Увлажнение 30 л	5	120					
		10	150					
		12	166					
		15	190	7,1	12,87	59,5	3,30	45,1
5	Увлажнение 36 л	5	120					
		10	166					
		12	190					
		13	198	7,5	15,05	58,6	2,43	48,4
6	Увлажнение 45 л	5	110					
		10	180					
		10	188	7,6	13,84	59,1	2,40	45,9

наибольшая температура – 179 °C, количество декстринов в обжаренном ячмене – 10,19 %, коэффициент перевариваемости протеина также снижается.

При добавлении воды в барабан в количестве 30–36 л (опыты 3, 4, 5) в начальный период обжаривания наблюдается замедленный рост температуры, в первые три минуты температура зерна устанавливается на уровне 70 °C (рис. 6.15), что объясняется затратами тепла на превращение воды в пар, пропаривание зерна и испарение влаги. В дальнейшем темп нагрева примерно одинаков, а максимальная температура нагрева и длительность обработки различная.

Лучшие показатели по степени декстринизации крахмала получены в опытах 3 и 5, однако коэффициенты перевариваемости протеина более высокие в опытах 4 и 6.

Таким образом, для ячменя необрушенного лучший режим обжаривания является следующий: добавление воды в количестве 30 л, нагрев до температуры 190 °C, при общей длительности нагрева до 12 мин, последующее добавление воды в количестве 45–50 л для охлаждения и увеличения влажности

конечного продукта до 8 %. Качество ячменя повышается за счет увеличения содержания декстринов до 16 % при сохранении коэффициента переваримости протеина на уровне исходного.

Обжаренный ячмень представляет собой вспученные растрескавшиеся зерна и характеризуется следующими технологическими свойствами:

влажность	– 7–8 %,
объемная масса	– 300–420 г/л,
угол естественного откоса	– 42 град.

Обжаривание ячменя обрушенного

Обжаривали зерно на другом обжарочном агрегате. В процессе испытаний порядок работы был такой же, как при обработке необрушенного ячменя.

Как показали результаты испытаний на данном агрегате режим нагрева был недостаточно интенсивным (рис. 6.15). Ячмень без увлажнения (опыт 10) нагревается до температуры 180 °С в течение 17 мин и после обработки содержит 5,04 % декстринов, коэффициент переваримости протеина снижается до 46,8 % (табл. 6.4).

Внесение воды в барабан в начале обжаривания способствовало повышению качества зерна. При этом после добавления воды температура зерна была на уровне 70 °С в течение времени до 8 мин в зависимости от ее количества. Это приводило к увеличению длительности процесса обработки. Качество готового продукта улучшалось с увеличением количества вносимой воды до 40 л и при нагреве зерна до температуры 190 °С за период 12–13 мин, содер-



Рис. 6.15. Температурный режим при обжаривании ячменя обрушенного

Показатели качества обрушенного ячменя, обработанного на барабанном обжарочном агрегате

№ опыта	Параметры режима			Влажность, %	Содержание декстринов, %	Коэффициент перевариваемости протеина, %	Содержание клетчатки, %	Содержание крахмала, %
	подготовка	τ, мин	T _з , °C					
1		3	4	5	6	7	8	9
	Исходный ячмень			14,4	2,53	53,1	0,8	55,0
10	Без увлажнения	5	100					
		10	150					
		14	170					
		17	180	6,8	5,04	46,8	0,71	45,6
11	Увлажнение 12 л	5	110					
		9	150					
		11	162					
		14	180	6,5	11,05	58,2	0,72	45,1
12	Увлажненный 24 л	5	67					
		10	112					
		14	155					
		18	180	6,4	7,23	51,0	0,73	47,0
13	Увлажненный 30 л	5	70					
		10	130					
		15	150					
		18	190	6,7	8,06	55,0	0,79	46,8
14	Увлажненный 30 л	5	75					
		10	120					
		15	152					
		18	180	6,8	8,15	57,6	0,71	45,2
15	Увлажненный 40 л	5	70					
		10	100					
		15	140					
		20	190	6,2	10,28	59,2	1,59	45,0
16	Увлажненный 40 л	5	110					
		10	150					
		14	175					
		17	190	6,4	9,52	59,0	1,35	44,3

жание декстринов в нем достигает 10,28 % (опыт 15–16) при сохранении коэффициента перевариваемости протеина на том же уровне, как в исходном зерне и даже при некотором повышении.

Показано, что качество ячменя обрушенного в процессе обжаривания повышается, но содержание декстринов было несколько меньше, чем в необру-

шенном, что объясняется нарушением целостности зерновки в процессе обрушивания, и при обжаривании зерно меньше вспучивается. Режим обработки обрушенного ячменя рекомендуется в тех же пределах, что и для необрушенного: добавление воды в количестве 30–40 л в начале обжаривания, нагрев до температуры 190 °С при общей длительности до 12 мин, последующее добавление воды для увлажнения и охлаждения в количестве 45–50 л.

Полученный продукт характеризуется следующими показателями:

влажность	– 6–8 %,
объемная масса	– 450–560 г/л,
угол естественного откоса	– 42 град.

• * Обжаривание пшеницы

Использовалась пшеница стекловидная высоконаатурная, содержание сырого протеина составляло 16 %, коэффициент переваримости протеина – 50 %, содержание декстринов – 0,6 %. Влажность исходного зерна – 15,4 %, объемная масса 810 г/л, угол естественного откоса 30 град, гранулометрический состав: сход сита 2,5×20 мм – 73,0 %, сход сита 2,0×20 мм – 25,7 %, дно – 1,3 %.

Обрабатывали пшеницу на барабанном обжарочном агрегате как при кондиционной влажности, так и с предварительным увлажнением.

Экспериментально показано (рис. 6.16), что при обжаривании зерна кондиционной влажности длительность нагрева составила 13–15 мин, температура зерна достигает величины 188–190 °С. Содержание декстринов при этом возрастает до 2,31 %, но коэффициент переваримости снижается до 45,9 %.

Внесение воды в начале обжаривания в барабан приводит к тому, что температура зерна со 100–80 °С понижается до 80–70 °С, за счет чего длительность процесса увеличивается на 3–4 минуты. Зерновая масса в течение этого периода увлажняется и пропаривается. Далее процесс нагрева длится в течение 8–10 мин до температуры зерна 180–190 °С.

С увеличением количества вносимой воды до 40 л качественные показатели зерна улучшаются (табл. 6.5), так как содержание декстринов увеличивается до 2,87 %, а коэффициент переваримости протеина несколько повышается и составляет 51,3 % (опыт 9). Следует отметить, что в связи с использованием высокостекловидной пшеницы содержание крахмала в ней составляет 60 %, степень декстринизации поэтому невысокая – до 3 %.

Полученный продукт – обжаренная пшеница – имеет следующие свойства: влажность – 8–9 %, объемная масса – 500–550 г/л, угол естественного откоса – 42 град.

Таким образом, при обжаривании пшеницы лучшим режимом является следующий: добавление воды в начале процесса в количестве 35–40 л, нагрев

Таблица 6.5

Показатели качества пшеницы, обработанной на барабанном
обжарочном агрегате

№ опыта	Параметры режима			Влажность, %	Содержание декстринов, %	Кэф-фициент перев. протеина, %	Содержание клетчатки, %	Содержание крахмала, %
	подготовка	τ, мин	T ₃ , °C					
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Пшеница исходная			15,4	0,67	50,0	2,20	60,9
	Без увлажнения	6	120					
		10	155					
2	Увлажненный 12 л	12	168					
		15	188	8,2	2,31	45,9	2,04	58,4
		5	110					
3	Увлажненный 20 л	10	160					
		12	180					
		14'50"	202	8,5	2,17	44,9	2,08	58,5
4	Увлажненный 36 л	5	100					
		10	154					
		12	172					
5	Увлажненный 36 л	14	180	8,0	3,18	45,7	2,30	58,0
		5	70					
		10	136					
6	Увлажненный 40 л	14	169					
		16	180	8,25	1,41	49,4	2,10	56,7
		5	90					
7	Увлажненный 40 л	10	136					
		12	162					
		15	189	8,4	1,12	49,2	2,30	57,2
8	Увлажненный 40 л	5	90					
		10	140					
		12	172					
9	Увлажненный 40 л	14	189	8,0	1,85	49,0	2,40	58,1
		5	110					
		10	159					
10	Увлажненный 40 л	12	176					
		13'30"	184	8,2	2,07	48,9	2,10	58,0
		5	90					
11	Увлажненный 40 л	10	140					
		13	176					
		14	180	8,8	2,29	49,6	2,30	60,1
12	Увлажненный 30 л	5	120					
		10	177					
		12	189	8,6	2,87	51,3	2,50	60,0
13	Увлажненный 25 л	5	110					
		10	163					
		12	184	9,0	2,44	48,2	2,24	58,4
14	Увлажненный 20 л	5	85					
		8	128					
		13	172					
15		15	180	8,5	2,04	46,0	2,20	55,6

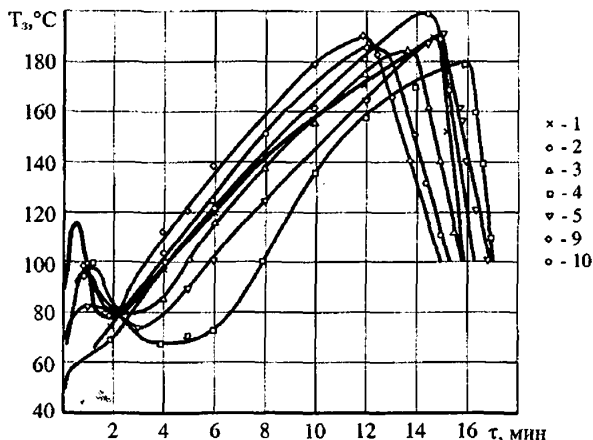


Рис. 6.16. Температурный режим при обжаривании пшеницы

до температуры 185–190 °С при общей длительности до 12 мин, внесение воды для увлажнения и охлаждения в количестве 45–50 л.

Обжаривание кукурузы

Регламент процесса обжаривания кукурузы такой же, как при обработке других культур.

Использовали кукурузу влажностью 13,4 %, объемной массой 710 г/л. Качественные показатели: содержание декстринов – 0,76 %, клетчатки – 2,2 %, коэффициент переваримости протеина – 55,5 %.

Испытания аппарата показывают (рис. 6.17), что температурный режим аналогичен изученному ранее. При обжаривании кукурузы без увлажнения температура зерна монотонно возрастает до 195 °С в течение 15 мин (опыт 1). При внесении воды в зерновую массу в начальный период температура зерна находится на уровне 50–70 °С в течение 1–8 мин, в зависимости от количества добавляемой воды (опыт 2–5).

Качественные показатели обжаренного зерна, представленные в табл. 6.6, доказывают, что преобразование крахмала в декстрины увеличивается при повышении количества добавляемой воды до 36 л. Коэффициент переваримости протеина возрастает от 55,5 в исходном зерне до 58,3 % при внесении 36–40 л воды (опыты 4 и 5).

Анализ (табл. 6.6, опыт 4) показывает, что основное количество декстринов образуется при температуре зерна выше 150 °. Наибольшее количество

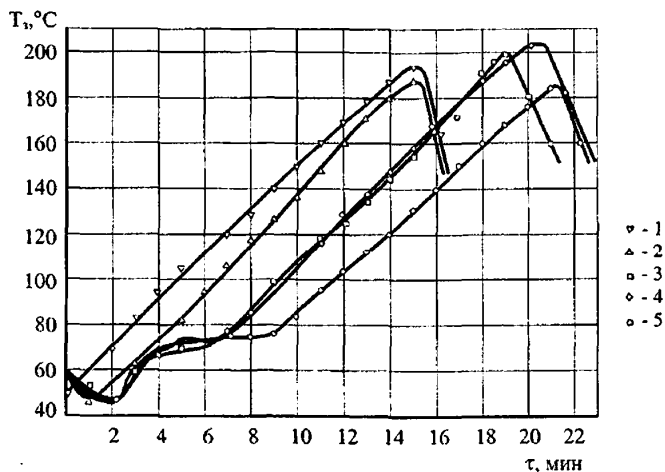


Рис. 6.17. Температурный режим при обжаривании кукурузы

Таблица 6.6

Показатели качества кукурузы, обработанной на барабанном обжарочном агрегате

№ опыта	Параметры режима			Влажность, %	Содержание декстринов, %	Кoeffициент перев. протеина, %	Содержание клетчатки, %	Содержание крахмала, %
	подготовка	τ, мин	T _z , °C					
	Исходная кукуруза			13,4	0,76	55,5	2	68,8
1	Без увлажнения	5	103					
		10	148					
		15	194	8,8	5,31	55,9	1,23	66,2
2	Увлажнение 12 л	5	82					
		10	135					
		12	160					
		15	185	8,9	6,21	46,5	1,54	65,4
3	Увлажнение 24 л	5	68		5,13			
		10	108		7,40			
		15	154		-			
		19	200	8,7	10,32	49,7	1,61	62,8
4	Увлажнение 36 л	5	72		0,71			
		10	107		0,77			
		12	128		1,66			
		15	157		3,09			
		20	206	8,8	11,77	58,3	1,44	61,7
5	Увлажнение 40 л	5	70					
		10	84					
		15	130					
		21	184	8,7	8,91	58,8	1,59	65,4

декстринов в зерне при высоком коэффициенте переваримости протеина получено при внесении 36 л воды и нагреве до 200 °С. Однако период увлажнения зерна в барабане, при котором температура зерна находится в пределах 50–70 °С, составляет 7 мин, а период нагрева до 200 °С ≈ 13 мин.

6.4. Влияние обработки зерна в барабанном обжарочном агрегате на его микробиологические показатели

Исходное сырье как правило (табл. 6.7) имеет значительную грибную и бактериальную загрязненность.

Зерно ячменя необрушенного имело на поверхности 13 480 диаспор грибов, на 78 % было поражено глубинной микрофлорой и содержало 196 700 бактерий в 1 г. По видовому составу грибов установлено, что ячмень в большой степени заспорен грибами *Aspergillus ochraceus*, затем *Mucor* и *Penicillium*, в меньшей степени – *As. flavus*, *As. candidas* и *As. Penicillium*. Среди глубинной микрофлоры преобладают грибы *Penicillium* (41 %) и *As. Ochraceus* – (34 %).

В результате обработки ячменя в барабанном обжарочном агрегате происходит обеззараживание грибной флоры на 90–100 %, бактериальной – на 99,8 %, причем с добавлением воды степень обеззараживания выше, т. е. практически осуществляется стерилизация зерна.

Зерно пшеницы по микробиологическим показателям можно отнести к доброкачественному, так как оно было заспорено поверхностной микрофлорой в количестве 4000 диаспор в 1 г, среди которых преобладали *Penicillium*, на 50 % поражено глубинной микрофлорой и содержало 1300 бактерий в 1 г.

При обработке в обжарочном агрегате произошло обеззараживание микроорганизмов на 85–96% при обжаривании без добавления воды и практически полной стерилизации при обжаривании с увлажнением (опыт 7).

Кукуруза также была доброкачественной и содержала только 100 спор грибов на поверхности и 400 бактерий в 1 г. После обработки в течение 12 мин достигается 100 %-ное обеззараживание, а при обработке по полному циклу обеспечивается полная стерильность.

Таблица 6.7
 Микробиологические показатели зерна, обработанного на барабанном обжарочном агрегате

№ опыта	Поверхностная микрофлора										Глубинная микрофлора						Бактерии в Г	
	Количество диаспор грибов в Г					Обеззаражено, %					Поражено, %			Обеззаражено, %				
	Об- щее	As. flavus	As. ochras	Mucor	Peni- cillum	As. sandi- das	As. fumig	As. raжeно, %	Об- щее	As. flav- us	As. ochr- as	Peni- cil- lum	Mi- cor	As. sandi- das	Обеза- раже- но, %	Общее количество	Обеза- ражено, %	
																		Об- щее
Ячмень необрушенный																		
Исходный	18480	170	7330	3980	3500	2160	1340		78	1	34	41	1	1	196700			
1	250	0	20	0	200	30	0	86,5	4	2	0	0	2	0	1000	99,5		
6	50	0	0	0	50	0	0	99,7	0	0	0	0	0	0	550	99,8		
Пшеница																		
Исходная	4000	680	1000	0	1600	660	0		50	2	48	0	0	0	1300			
1	65	0	0	10	550	0	0	83,8	2	0	0	2	0	0	100	92,5		
7	0	0	0	0	0	0	0	100,0	0	0	0	0	0	0	0	100,0		
Кукуруза																		
Исходная	1660	660	340	0	660	0	0		2	0	0	2	0	0	400			
Оп. 1-5 мин	66	0	0	0	66	0	0	96,0	0	0	0	0	0	0	100	75,0		
Оп. 1- 10 мин	33	0	0	0	33	0	0	98,0	0	0	0	0	0	0	10	92,5		
Оп. 1-12 мин	0	0	0	0	0	0	0	100,0	0	0	0	0	0	0	0	100,0		
Оп. 5	0	0	0	0	0	0	0	100,0	0	0	0	0	0	0	0	100,0		

Глава 7

ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ЗЕРНА МЕТОДОМ МИКРОНИЗАЦИИ

Сущность этого способа состоит в интенсивном нагреве зерна ИК-лучами в течение 35...60 с. В результате нагрева зерна до 150...190 °С связанная вода в зерне переходит в псевдопарообразное состояние, резко возрастает внутреннее давление в зерне, вследствие чего оно вспучивается и пластифицируется. В таком состоянии оно хорошо плющится. При этом существенно изменяются физические и биохимические свойства зерна, а также его питательная ценность [19]. Установлено, что оптимальная температура нагрева зерна разных культур составляет: для ячменя 175 °С, для кукурузы и гороха - 150 °С, для пшеницы и сои - 170 °С, для овса - 185 °С [9, 10, 16, 27, 231]. Фактически микронизация представляет собой сочетание и термической, и гидротермической обработки зерна.

Впервые этот метод применил на практике Тейлор; на основе сконструированного им микронизатора он установил, что подвергнутое такой обработке зерно легче переваривается животными, а привесы животных при таком скармливании возрастают в размере до 10 %. При этом он отметил также сравнительную дешевизну процесса, по сравнению с методом флакирования [262, 233, 227, 232].

Проведенные в Ливерпульском университете опыты с использованием микронизированного зерна показали, что привесы свиней повышаются на 11...12 %, а расход корма снижается более чем на 10 %, по сравнению с комбикормом, включающим необработанное зерно.

В работах других ученых также указывается, что микронизированное зерно заметно отличается от исходного в лучшую сторону, в смысле питательной ценности [9, 11, 34, 35, 49, 51, 62, 97, 105]. Это обусловлено, прежде всего, глубокой модификацией крахмала, его клейстеризацией и появлением низкомолекулярных декстринов. В результате существенно возрастает доступность этих углеводов ферментам животных, и поэтому их ассимиляция повышается. Кроме того, определенное значение имеет также и денатурация белков, атакуемость ферментами которых также увеличивается.

Особенно перспективным является обработка ИК-излучением сои, используемой в производстве комбикормов. В сыром виде бобы сои не могут использоваться на корм свиньям и птице, вследствие наличия в них ингибиторов трипсина, отрицательно влияющего на процесс пищеварения и усвояемость белков. Однако при обработке сои указанным способом в течение 80 с практически полностью инактивируется этот ингибитор. Одновременно инак-

тивируется липоксигеназа и уреаза, причем активность жирорастворимых витаминов почти не претерпевает изменений.

Процесс микронизации зерна включает следующие операции:

увлажнение с последующим отволаживанием, пропаривание, обработка ИКЛ, плющение, охлаждение. Пропаривание ведут при давлении пара в пределах 0,08...0,20 МПа, в зависимости от культуры. Расход пара составляет от 3 до 8 % от массы зерна.

Для микронизации сконструированы и эксплуатируются различные установки. Основой для их разработки являются многочисленные научные исследования, выполненные в последние десятилетия различными учеными, среди которых особенно следует отметить работы Тюрева Е. П. [196, 197, 198], Губиева Ю. К. [7, 48, 49], Ильясова С. Г. [80, 81, 82, 18], Гинзбурга А. С. [43, 44, 45], Рогова И. А. и Горбатова А. П. [173, 174, 175], Красникова В. В. [81, 82, 100], Грибковой Т. Н. [47], Зверева С. В. [78, 198], Никитушкиной М. Ю. [137] и других исследователей. Полученные этими учеными результаты заложили прочные теоретические основы для разработки конкретных аппаратов и режимов процесса микронизации зерна. Много внимания уделено этому процессу коллективом ученых ВНИИ комбикормовой промышленности. Все это позволило обеспечить широкое применение этого интересного способа гидротермической обработки зерна при производстве комбикормов [22, 27, 52, 141, 142, 144, 151].

Для разработки эффективного варианта обработки зерна разных культур методом его микронизации требуется наличие сведений об оптических свойствах зерна, особенностях его взаимодействия с ИК-лучами, характере их поглощения и ответной реакции зерна на приложенное воздействие. В данном случае это взаимодействие имеет повышенную сложность, в связи с особой конструкцией зерна как объекта обработки.

Исследованию сложной структуры зерна и микроструктуры его анатомических частей посвящено много исследований. Особенно важные результаты получены в последние 30 лет, в связи с использованием для этой цели сканирующих электронных микроскопов, позволяющих с большим разрешением получить достоверные снимки тонкой структуры исследуемых тел. В числе таких работ следует особенно отметить труды Егорова Г. А. [16, 65, 66, 67, 68], Даирова Н. М. [65], Посновой Л. П. [166], Поповой Е. П. [29], Беркутовой Н. С. [31], Афанасьева В. А. [9], а из числа иностранных ученых работы Померанца, Макмастерс М. М. и некоторых других [235, 251, 222].

Зерно пшеницы, кукурузы и других культур представляет собой классический пример коллоидного капиллярно-пористого тела [43, 82]. При этом его следует рассматривать как сложносоставное тело, структура и свойства которого значительно отличаются от простых по составу и структуре тел.

Кроме того, зерно является живым организмом, поэтому протекающие в нем процессы, при любых условиях сопряжения его с окружающей средой, подчиняются регулирующему влиянию биологической системы зерна. Все это необходимо учитывать при рассмотрении поведения зерна в различных вариантах проводимых с ним технологических операций, т. к. только при этом условии можно разработать действительно оптимальные режимы того или иного процесса, обеспечить наивысшую его эффективность. В полной мере это положение относится и к процессу микронизации зерна, обработки его направленным потоком лучистой энергии.

Выполненные основополагающие теоретические и экспериментальные исследования позволили установить, что для описания процессов распространения и ослабления излучения в зерне (как и в других подобных объектах) достаточно располагать сведениями по группе экспериментальных показателей: коэффициенту \bar{k}_λ и коэффициенту рассеяния "назад" S_λ . Их сочетание дает так называемый критерий Шустера:

$$\Lambda_{\lambda_0} = -\frac{S_\lambda}{\bar{k}_\lambda + S_\lambda}. \quad (7.1)$$

Эти коэффициенты определяют оптические свойства элементарного слоя материала $d_{\bar{x}}$ в направлении потока лучистой энергии; спектральный усредненный коэффициент поглощения \bar{k}_λ определяет поглощенную средой долю плотности полусферического потока излучения $\bar{k}_\lambda \cdot d_{\bar{x}}$ при прохождении сквозь слой толщиной $d_{\bar{x}}$; спектральный усредненный полусферический коэффициент рассеяния назад S_λ определяет рассеянную слоем $d_{\bar{x}}$ в сторону противоположную направлению падающего на тело потока, т. е. долю $S_\lambda d_{\bar{x}}$ плотности полусферического потока излучения, падающего на слой материала.

Величины этих коэффициентов $\bar{k}_\lambda(x)$ и $S_\lambda(x)$ при постоянных оптических характеристиках обрабатываемого материала $k_\lambda, \sigma_\lambda$ несут в себе суммарную информацию об особенностях конкретного оформления процесса обработки данного объекта в соответствующем варианте:

$$\bar{k}_\lambda(x) = m(x)k_\lambda, \quad (7.2)$$

$$S_\lambda(x) = m(x)\delta_s(x)\sigma_\lambda. \quad (7.3)$$

Для таких материалов как зерно, хлебобулочные изделия, мука, крахмал и т. п. в рабочей области инфракрасного спектра излучения от 0,7 мкм до 2,5 мкм длины волны величина критерия Шустера $\Lambda_s > 0,9$, а $S_\lambda \gg k_\lambda$. При изменении величины рассеяния назад S_λ даже на 20 % отклонение значений критерия Шустера от первоначального не превышает 1 %. Поэтому в практическом решении инженерных задач по облучению перечисленных выше объектов можно использовать усредненную величину этого критерия Λ_s , пренебечь его изменением при изменении оформления конкретного варианта обработки продуктов ИК-лучами.

В связи с этим спектральная отражательная способность объекта, при бесконечной толщине слоя материала, определяется следующим выражением:

$$R_{\lambda\infty} = \frac{1}{\Lambda_s} (1 - \sqrt{1 - \Lambda_s^2}), \quad (7.4)$$

а спектральный коэффициент эффективного ослабления лучистого потока находится из следующей зависимости:

$$L_\lambda = \sqrt{1 - \Lambda_s^2}. \quad (7.5)$$

Для учета различных особенностей конкретного оформления процесса обработки материалов лучистым потоком энергии используется также закон Бугера:

$$B_\lambda(l) = B_\lambda(0) \exp(-k_\lambda l) \quad (7.6)$$

и усложненные законы Бугера-Ламберта и Бугера-Ламберта-Беера. В этих законах используются величины $B_\lambda(l)$ и $B_\lambda(0)$, которые представляют собой интенсивности потока излучения, соответственно прошедшего сквозь слой материала толщиной l и падающего на слой.

Эксперименты свидетельствуют, что в случае нашего объекта при ИК-облучении закон Бугера выполняется в полной мере. Поэтому он используется при решении инженерных задач по микронизации зерна.

При этом пропускательная способность материала определяется соотношением:

$$T_\lambda = \frac{B_\lambda(l)}{B_\lambda(0)} = \exp(-\varepsilon_\lambda l). \quad (7.7)$$

Следует отметить также, что при обработке сильно рассеивающих материалов, таких как мучнистое зерно или мука, могут быть зарегистрированы

некоторые отклонения от закона Бугера. Но эти отклонения определяются, главным образом, интенсивным рассеянием лучистого потока в слое материала толщиной l .

В существующих конструкциях микронизаторов осуществляется одностороннее облучение зерна диффузным лучистым потоком. Для этого случая пропускательная способность материала определяется выражением:

$$T_{\lambda} = \frac{(1 - R_{\lambda\infty}^2) \cdot \exp(-L_{\lambda} \cdot \tau_l)}{1 - R_{\lambda\infty}^2 \cdot \exp(-2L_{\lambda} \cdot \tau_l)}, \quad (7.8)$$

а отражательная способность описывается уравнением:

$$R_{\lambda} = R_{\lambda\infty} \cdot \frac{1 - \exp(-2L_{\lambda} \cdot \tau_l)}{1 - R_{\lambda\infty}^2 \cdot \exp(-2L_{\lambda} \cdot \tau_l)}. \quad (7.9)$$

На основе этого получаем для S_{λ} и \bar{k}_{λ} следующие зависимости:

$$S_{\lambda} = \frac{2 \cdot R_{\lambda\infty}}{1 - R_{\lambda\infty}^2} L_{\lambda}, \quad (7.10)$$

$$\bar{k}_{\lambda} = \frac{1 - R_{\lambda\infty}}{1 + R_{\lambda\infty}^2} L_{\lambda}. \quad (7.11)$$

Эти зависимости позволяют определить спектральные оптические характеристики материала по экспериментально найденным значениям R_{λ} и T_{λ} слоя конечной толщины l , а также R_{∞} оптически бесконечно толстого слоя.

На рис. 7.1 приводим значения спектрального коэффициента поглощения [36, 43, 78, 81] для некоторых материалов.

Для оптически бесконечно толстого слоя спектральные терморadiационные характеристики определяются следующими выражениями:

$$R_{\lambda\infty} = 1 + \frac{\bar{k}_{\lambda}}{S_{\lambda}} - \sqrt{\left(\frac{\bar{k}_{\lambda}}{S_{\lambda}}\right)^2 + 2\frac{\bar{k}_{\lambda}}{S_{\lambda}}} = \frac{\bar{k}_{\lambda} + S_{\lambda} - L_{\lambda}}{S_{\lambda}}, \quad (7.12)$$

$$A_{\lambda\infty} = \sqrt{\left(\frac{\bar{k}_{\lambda}}{S_{\lambda}}\right)^2 + 2\frac{\bar{k}_{\lambda}}{S_{\lambda}}} - \frac{\bar{k}_{\lambda}}{S_{\lambda}}. \quad (7.13)$$

При этих условиях связь терморadiационных характеристик материала с критерием Шустера описывается следующими зависимостями:

$$L_{\lambda} = \varepsilon_{\lambda} \sqrt{1 - \Lambda_{\lambda}^2}, \quad (7.14)$$

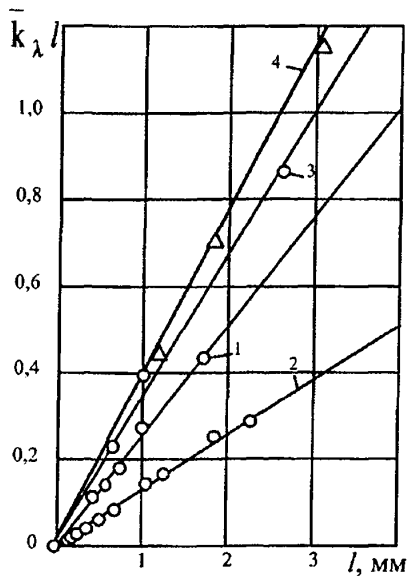
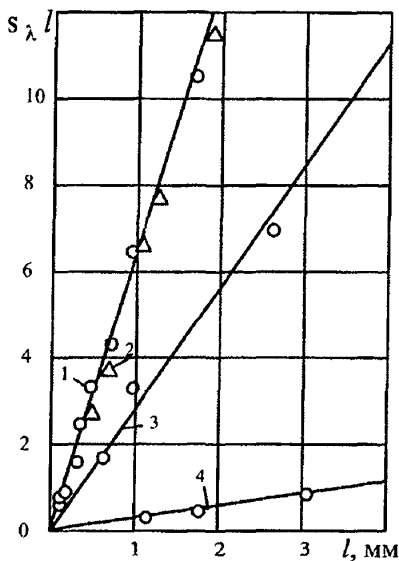


Рис. 7.1. Зависимости коэффициентов рассеивания "назад" $S_{\lambda}l$ и поглощения $k_{\lambda}l$ от толщины слоя для некоторых материалов при $\lambda = 1,2$ мкм: 1 — картофельный крахмал, $W = 11,8$ %; 2 — древесина сосны, $W = 6,2$ %; 3 — пшеничное тесто, $W = 48,0$ %; 4 — картофель, $W = 80,5$ %

$$R_{\lambda\infty} = \frac{1}{\Lambda_s} \cdot (1 - \sqrt{1 - \Lambda_s^2}). \quad (7.15)$$

Эксперименты показывают, что при увеличении толщины слоя материала пропускательная способность его снижается, а отражательная способность повышается, что естественно.

Таким образом, для определения характеристики поля излучения в условиях выполнения процесса микронизации зерна необходимо иметь данные по следующим основным характеристикам:

при диффузном облучении — по усредненным коэффициентам поглощения \bar{k}_{λ} , эффективного ослабления L_{λ} и двуполусферической отражательной способности оптически бесконечно толстого слоя материала.

Для определения коэффициента эффективного ослабления лучистого потока L_{λ} требуется иметь экспериментальные данные по R_{λ} и $R_{\lambda\infty}$ или же по T_{λ} и $R_{\lambda\infty}$.

Значение усредненного коэффициента поглощения \bar{k}_λ вычисляется после определения L_λ . Он находится из следующего простого соотношения:

$$\bar{k}_\lambda = \frac{1 - R_{\lambda\infty}}{1 + R_{\lambda\infty}} L_\lambda. \quad (7.16)$$

На рис. 7.2 и 7.3 приводим значения терморadiационных характеристик зерна пшеницы [43, 47, 78, 80, 82], в зависимости от влажности. Они свидетельствуют, что в определенном диапазоне влажности зерна основные его радиационные характеристики изменяются незначительно, и поэтому в инженерных расчетах их значения могут приниматься постоянными, что существенно упрощает решение задач.

Однако структура зерна влияет заметно [43, 47, 78, 81], поэтому при конкретной организации процесса микронизации это необходимо учитывать. Например, по данным Грибковой Г. Н. [47], в интервале волн 0,9...1,3 мкм величина R_λ для мучнистых зерен равна 0,68...0,73, в то время как для стекловидных зерен ее величина существенно ниже и составляет 0,48...0,54. Максимальная пропускательная способность для мучнистых зерен при длине волны 1,1 мкм равна 0,02...0,03, а для стекловидного зерна $T_\lambda = 0,11...0,12$.

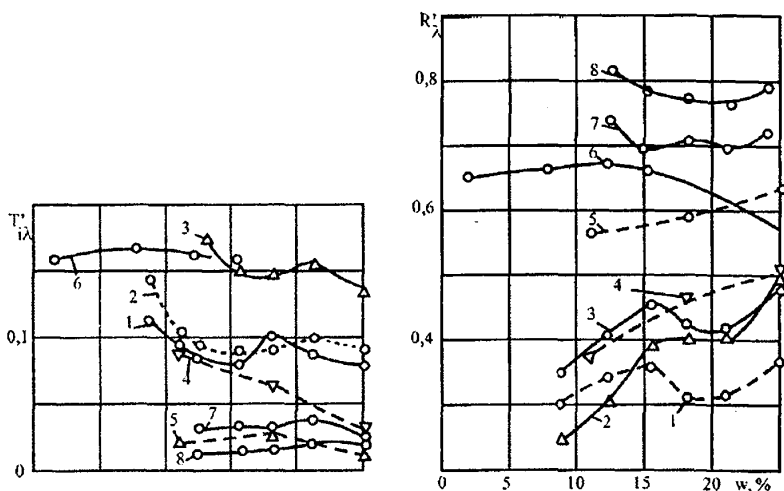


Рис. 7.2. Зависимость спектральных терморadiационных характеристик от влажности при длине волны 1,1 мкм для различных материалов: 1 – роговидная кукуруза; эндосперм стекловидной пшеницы (Гордеиформе), $l = 2,2$ мм; 3 – зерно стекловидной пшеницы (Гордеиформе); 4, 5 – единичное зерно стекловидной 4 (Безостая I) и мучнистой 5 (Весна); 6 – древесина сосны; 7 – эндосперм; 8 – зерно мучнистой пшеницы ППГ-269

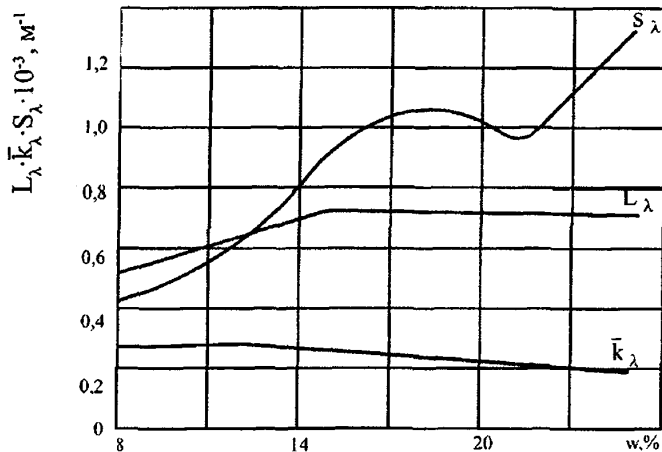


Рис. 7.3. Зависимости оптических характеристик эндосперма зерна пшеницы от влажности при $\lambda = 0,9$ мкм

7.1. Математическая модель нагрева зерна при микронизации

Известно [117], что нагревание вещества в замкнутом пространстве при постоянной температуре окружающей среды описывается уравнением:

$$\frac{mc}{\alpha F} \frac{d(t_i - t_0)}{d\tau} + (t_i - t_0) = \frac{P}{\alpha F}, \quad (7.17)$$

- где
- m — масса вещества,
 - c — удельная теплоемкость вещества,
 - t_i, t_0 — разность между температурой окружающей среды t_i и начальной температурой вещества t_0 ,
 - P — мощность теплового потока, подводимого скачком к веществу от нагревателя в начальный момент времени $\tau = 0$,
 - α — коэффициент теплопередачи от среды к веществу,
 - F — приведенная поверхность теплоотдачи.

В этом случае изменение температуры вещества определяется уравнением:

$$t(\tau) = t_0 + \frac{P}{\alpha F} \left[1 - \exp\left(-\frac{\tau}{K}\right) \right], \quad (7.18)$$

где $K = \frac{mc}{\alpha F}$ — постоянная величина.

Отсюда следует, что чем выше значение K , тем медленнее происходит нагревание продукта (вещества).

Следовательно, темп нагревания продукта, т. е. скорость изменения его температуры во времени, определяется уравнением:

$$\frac{dt}{d\tau} = \frac{P - \alpha F \Delta t}{mc}, \quad (7.19)$$

где $\Delta t = (t_i - t_0)$.

Выражение (7.19) представляет собой математическую модель процесса.

Основываясь на этих уравнениях, проведем расчет для случая обработки зерна микронизацией.

Примем для расчета:

Масса зерна – 1 кг,

Удельная теплоемкость зерна 1,85 кДж/кг·град,

Коэффициент теплопередачи $\alpha = 25$ кДж/м²·с.

Поверхность зерна, воспринимающую энергию излучения, найдем расчетным путем. Для этого примем массу 1000 зерен равной 40 г, площадь внешней поверхности единичного зерна находим на основе среднестатистических размеров (длина 6 мм, толщина 2,5 мм, ширина 3 мм) равной 47 мм².

Тогда суммарная площадь внешней поверхности 1 кг зерна составит:

$$F_{\Sigma} = \frac{47 \cdot 10^{-6} \cdot 1000}{40 \cdot 10^{-3}} = 1,2 \text{ м}^2.$$

Считаем, что воспринимает излучение только половина внешней поверхности зерна, следовательно, в этом процессе теплопоглощения участвует:

$$F_{\text{эф}} = 1,2 \cdot 0,5 = 0,6 \text{ м}^2.$$

На основании этих данных находим значение постоянной величины K :

$$K = 0,106 \text{ с.}$$

По физическому смыслу, постоянная величина K определяет время, за которое температура нагреваемого продукта повысится на 1 градус. Получается таким образом, что за 36 с, т. е. до взрыва зерна, оно повысит свою температуру примерно на 330° (по 7.18).

Этот результат превышает физически измеренную температуру зерна в эксперименте. Очевидно, это связано с тем, что в поглощение теплоты участвует меньше 0,5 внешней поверхности зерна, что реально. Если принять,

что эта величина составляет только 1/3 поверхности зерна, то величина K приобретает значение 0,247, а за 36 с зерно повысит свою температуру на 142 °. Этот результат ближе к данным эксперимента. Следовательно, зерно при облучении ИКЛ воспринимает лучистую энергию лишь одной третьей внешней поверхности.

Вполне понятно, что этот расчет проведен в упрощенном варианте: не учтены пропускательная и отражательная способности зерна, что определенным образом влияет на разогрев зерна. Однако полученный результат, видимо, учитывает эти эффекты неявным образом. Поэтому можно считать полученный результат удовлетворяющим условиям опыта.

7.2. Расчет необходимой длительности ИК-обработки зерна

Одним из параметров процесса микронизации является длительность обработки зерна в микронизаторе: это определяет его производительность, а также предел такого эффекта воздействия на зерно, который обеспечивает его высокие технологические свойства, как компонента комбикормов. Оптимальное значение этой длительности процесса можно найти на основании полученных экспериментальных результатов по оптическим и термодинамическим характеристикам зерна.

Количество поглощенного зерном тепла можно определить по следующему выражению:

$$Q = \alpha \cdot S_s k_\lambda \cdot \Delta t \cdot \tau, \quad (7.20)$$

где α — коэффициент теплопередачи, кДж/м·с·град,
 S_s — эффективная поверхность зерна, которая активно поглощает лучистую энергию в процессе ИК-обработки, м²,
 k_λ — удельная поглощательная способность зерна, 1/м,
 Δt — приращение температуры зерна в процессе микронизации, °С,
 τ — время обработки, с.

Анализ процесса показывает, что в поглощении теплоты участвует около 1/2 поверхности зерновки, в том случае, когда обработка зерна в микронизаторе происходит в один слой. Для единичного зерна наиболее достоверный результат при определении площади внешней поверхности зерна дает формула Г. А. Егорова

$$S = 1,12 a^2 + 3,76 b^2 + 0,88 l^2 - 10, \quad (7.21)$$

где a, b, l — ширина, толщина и длина зерна, м.

При этом удельная внешняя поверхность 1 кг зерна представляет собой произведение площади поверхности единичного зерна на число зерен в 1 кг:

$$S_{\text{вд}} = S \cdot n, \quad (7.22)$$

где n – число зерен в 1 кг – определяется на основе значения массы 1000 зерен, без пересчета на сухую массу, т.е. при равновесной влажности:

$$n = \frac{M}{m_{1000}}. \quad (7.23)$$

Для расчета принимаем следующие значения:

$$\alpha = 25 \text{ кДж/м} \cdot \text{с} \cdot \text{град},$$

$$k_{\lambda} = 0,1 \cdot 10^3 \text{ 1/м},$$

$$\Delta t = 100 \text{ }^{\circ}\text{C}, \text{ что означает нагрев зерна от } 20 \text{ до } 120 \text{ }^{\circ}\text{C},$$

$$m_{1000} = 40 \cdot 10^{-6} \text{ кг},$$

$$n = 1:40 \cdot 10^{-6} = 25 \text{ 000 штук},$$

$$S = 55,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$$

$$S_{\text{з}} = 0,5 \cdot S \cong 28 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

С другой стороны, поглощенное зерном количество теплоты можно найти на основе теплового баланса процесса, по формуле:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta t, \quad (7.24)$$

где m – масса зерна (в данном случае 1 кг),
 c – удельная теплоемкость зерна, кДж/кг·град.

Для наших условий принять $c = 2,60$ кДж/кг·град. Используя это значение для нагрева на $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$, получаем требуемое количество теплоты:

$$Q = 1,0 \cdot 2,60 \cdot 100 = 260 \text{ кДж}.$$

Приравняв выражения (7.20) и (7.24), находим для длительности обработки зерна в микронизаторе следующее выражение:

$$\tau = \frac{m \cdot c}{\alpha \cdot S_{\text{з}} \cdot k_{\lambda}}. \quad (7.25)$$

Подставляя конкретные значения входящих в него величин, получаем, что для повышения температуры зерна от 20 до $190 \text{ }^{\circ}\text{C}$ в условиях экспериментальной его обработки в микронизаторе требуется 37 с.

Эта величина и является оптимальной. Обработку зерна вели именно в таком режиме. При этом была достигнута требуемая глубина воздействия на свойства зерна, повышение его питательности, за счет клейстеризации и декстринизации крахмала, в заданном размере.

В особенности резко проявляется этот процесс при обработке зерна ИК-излучением или же, тем более, в условиях проведения процесса его микронизации. При быстром нагреве зерна до высокой температуры происходит вспучивание или даже полная деформация зерна, его разрыв.

7.3. Механизм деформации зерна при интенсивной тепловой обработке

Это явление обусловлено тремя факторами:

- особой структурой зерна, наличием плотного алейронового слоя, сквозь который невозможна быстрая миграция молекул воды;
- диффузионным характером внутреннего влагопереноса в зерне;
- невысокой энергией связи влаги с биополимерами зерна по типу водородной связи.

Как показано в работе [65, 66], среднестатистический уровень энергии связи влаги в зерне составляет около 20 кДж/моль, что соответствует водородной связи, типичной для биополимеров. Эта физико-химическая связь (по классификации акад. П. А. Ребиндера) очень подвижна и при изменении температуры прочность связи молекул воды с активными центрами изменяется в размере, соответствующем приложенному внешнему воздействию, т. е. изменению параметров внешней среды. Особое значение имеет для рассматриваемого нами случая повышение температуры, причем в процессе микронизации это повышение происходит в течение нескольких секунд до величины свыше 100 °С.

В результате связанная биополимерами вода освобождается, ее молекулы приобретают высокую кинетическую энергию. Внутри зерна вода во всем объеме эндосперма мгновенно переходит в псевдопарообразное состояние и стремится диффундировать с высокой скоростью из зерна в окружающую атмосферу. Однако плотный алейроновый слой зерна активно препятствует этому процессу, вследствие чего образовавшийся псевдопар оказывается заключенным в герметическом сосуде. Это состояние вызывает резкое повышение давления внутри зерна – термодинамический расчет показывает, что давление в течение первых секунд достигает в этом замкнутом объеме величины 100 МПа и даже выше. В результате зерно резко вспучивается или даже взрывается.

Этот эффект наблюдается для зерна всех культур. Примерно то же происходит и при поджаривании зерна, хотя в случае микронизации интенсивность процесса выше и эффект проявляется с большей наглядностью.

7.4. Ориентировочный расчет давления внутри зерновки при взрыве в условиях микронизации и механизм взрыва

Вследствие диффузионного характера внутреннего влагопереноса внутри зерна и особых свойств алейронового слоя высвобождающаяся внутри зерна (в эндосперме) вода не в состоянии быстро десорбироваться, но весь образовавшийся при быстром разогреве зерна псевдопар некоторое время находится внутри зерна, как в герметически закрытой ячейке. Поэтому и создается давление пара, которое и приводит к разрушению конструкции зерновки – к ее "взрыву".

Для расчета примем зерно пшеницы линейными размерами шириной 3 мм, толщиной 2 мм, длиной 6 мм, что является обычными средними величинами.

Объем зерновки: $3,0 \times 2,0 \times 6,0 \times 0,52 = 18,7 \text{ мм}^3$.

Объем эндосперма: $18,7 \times 0,825 = 15,3 \text{ мм}^3$, т.к. среднее содержание крахмалистой части эндосперма в зерне пшеницы составляет 82,5 %.

Принимаем, что эндосперм состоит из 12 % белков и 88 % крахмала. При плотности белка $1,2 \text{ г/см}^3$ и плотности крахмала $1,4 \text{ г/см}^3$ находим, что в объеме $15,7 \text{ мм}^3$ находится 21 мг сухих веществ. Эти вещества содержат в своей структуре различные пустоты и межмолекулярные пространства размером до 300 \AA . Выполненный ранее Г. А. Егоровым расчет показывает, что условный размер микрокапиллярных промежутков в эндосперме зерна составляет от 10 до 100 \AA , с максимумом при 20 \AA . Условный диаметр молекулы воды в свободном состоянии равен $3,2 \text{ \AA}$.

Исходя из этих соображений находим, что внутри эндосперма свободное пространство между плотным веществом (включая межмолекулярные промежутки) составляет $8,5 \text{ мм}^3$, т.к. объем плотных веществ (при их спрессовывании до межмолекулярных размеров не более 6 \AA) составляет $3,7 \text{ мм}^3$. Суммарный объем плотного вещества, при спрессовывании его до плотности $4,1 \text{ г/см}^3$ (т.е. в три раза от исходного) вместе с объемом занимаемым связанной водой (при плотности ее $1,2 \text{ г/см}^3$) занимает $6,8 \text{ мм}^3$ ($3,7+3,1 \text{ мм}^3$). Отсюда находим свободный объем пустот внутри зерна:

$$15,3 - 6,8 = 8,5 \text{ мм}^3.$$

При влажности зерна 20 % масса воды в нем составляет 3,8 мг, а объем ее в связанном состоянии, при плотности $1,2 \text{ г/см}^3$ – $3,1 \text{ мм}^3$.

При нагреве зерна до $200 \text{ }^\circ\text{C}$ в условиях микронизации высвобождается вся связанная вода и образуется псевдопар, полностью заключенный внутри крахмалистой части эндосперма, под алейроновым слоем. В этих условиях

объем воды при переходе в пар возрастает не менее чем в 100 раз и при нормальном давлении должен занять объем в 310 мм³. При наличии всего 8,5 мм³ свободного пространства давление составляет примерно:

$$P = 310 / 8,5 = 36,4 \text{ атм.}$$

Таким образом, при указанных условиях при мгновенном переходе связанной воды в псевдопарообразное состояние давление внутри эндосперма превышает 30 атм, что и приводит к "взрыву" зерна.

Этот эффект имеет положительное значение, так как взорванное зерно отличается повышенными питательными и технологическими свойствами. В связи с этим важное значение для рациональной организации процесса микронизации зерна имеет анализ механизма этого явления, определение тех физических условий, при которых и происходит этот эффект.

Задача формулируется следующим образом.

В зерновке пшеницы линейными размерами 3,0 × 2,5 × 6,0 мм содержится 20 % воды. Исходя из этого находим, что объем зерна равен 18,7 мм³, объем эндосперма 18,7 × 0,825 = 15,3 мм³.

Из общего количества воды 10 % содержится в оболочках, 90 % – в эндосперме. Следовательно, объем воды в эндосперме:

$$15,3 \times 0,20 = 3,06 \text{ мм}^3.$$

Эта вода находится в связанном состоянии, при влажности зерна 20 % плотность связанной воды составляет 1200 кг/м³ [65, 66]. Значит масса воды в эндосперме равна 4,8 · 10⁻⁹ кг, при массе вещества в эндосперме зерна

$$15,3 \times 1,36 = 26 \cdot 10^{-9} \text{ кг.}$$

Анализ изотермы сорбции воды зерном пшеницы показывает, что для связывания каждым активным центром сорбции белков и углеводов зерна по одной молекуле воды, т. е. для формирования монослоя воды на активной поверхности зерна, требуется около 7 % воды. Следовательно, при влажности 20 % возле каждого активного центра сорбции формируется три слоя молекул воды, причем энергия их связи резко убывает: первый слой молекул воды взаимодействует с активным центром с энергией около 37 кДж/моль, дифференциальная теплота сорбции второго слоя составляет около 16 кДж/моль, а для третьего слоя ее значение понижается до 2 кДж/моль. Таким образом, третий слой сорбированных молекул воды связан слабо и при повышении температуры может быстро десорбироваться. Для разрыва связи второго слоя моле-

кул воды с активными центрами зерна требуется более высокий подвод энергии, для десорбции первого слоя – еще выше.

Анализ изменения влажности зерна при микронизации показывает, что остаточная влажность его составляет 5...7 %. Следовательно, в процессе ИКЛ-воздействия на зерно десорбируется только два слоя связанной воды, что составляет около 15 %.

Значит, масса десорбированной воды в единичном зерне пшеницы, в соответствии с принятыми выше условиями, составляет около $4,8 \times 2/3 = 3,6 \text{ мг} = 3,6 \cdot 10^{-9} \text{ кг}$.

В процессе микронизации, при интенсивном облучении зерна, эта масса воды переходит из связанного состояния в псевдопарообразное состояние, вследствие чего давление внутри зерновки возрастает.

Для определения уровня этого давления следует учесть дополнительно следующие особенности зерна:

- вода перемещается внутри зерна только диффузионным путем;
- плотные толстостенные клетки алейронового слоя зерна представляют собой физический барьер, препятствующий диффундированию молекул воды в атмосферу; исходя из этого, зерно в данной задаче следует рассматривать как герметически изолированный сосуд;
- суммарный объем пор и межмолекулярных промежутков в эндосперме зерна составляет около 10 % от общего объема, следовательно, десорбированные молекулы воды, образующие псевдопар, располагают для своего размещения примерно $2 \text{ мм}^3 = 19,3 \times 0,10 = 2 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3$. В то же время расчет показывает, что десорбция третьего слоя воды происходит при температуре нагрева зерна $80 \text{ }^\circ\text{C}$, а второго слоя – при $120...140 \text{ }^\circ\text{C}$.

При беспрепятственном расширении этого пара он займет объем, превышающий объем воды: для третьего слоя в 1600 раз, для второго слоя в 1800 раз (усредненно). Ориентировочно можно считать, что во столько же раз должно будет повыситься и давление этого пара. При таком допущении получаем, что давление внутри зерна при переходе двух сорбированных слоев связанной воды в псевдопарообразном состоянии может составить $160...180 \text{ МПа} = 160...180 \text{ кбар}$.

По данным И. А. Наумова [66] прочность оболочек зерна пшеницы на разрыв составляет около 20 МПа. Учитывая, что в его опытах исследование проведено со снятыми с зерна оболочками, следует, что при их плотной связи с эндоспермом в целом зерне прочность их должна быть выше в 5...8 раз, получаем, что для их разрыва требуется давление примерно в 100...160 МПа. Таким образом, получаем сопоставимые величины, что убеждает в правильности методического подхода к решению этой задачи.

Для расчета возникающего давления внутри зерна можно использовать также, с определенными допущениями, известную формулу для избыточного давления взрыва [104] пыли и т. п.:

$$\Delta P = \frac{m \cdot H_T \cdot P_0}{U \cdot \rho \cdot C \cdot T_0}, \quad (7.26)$$

где m – масса участвующего в процессе взрыва вещества, кг,
 H_T – энергия процесса, Дж/кг,
 P_0 – начальное давление в среде, МПа,
 U – свободный объем, м³,
 ρ – плотность взрывообразующего вещества до взрыва, кг/м³,
 T_0 – начальная температура, К,
 C – удельная теплосмкость вещества, кДж/кг·град.

При использовании принятых в нашей задаче данных получаем, что давление внутри зерна может составить 120 МПа. Таким образом, получаем величину того же порядка, что и ранее.

Следовательно, при проведении процесса микронизации, в условиях интенсивного облучения зерна ИКЛ, возникают особые физические условия, которые приводят к проявлению эффекта "поп-корна" – взрыву зерна. Этот эффект обязан особенностям анатомического строения зерна и термодинамическим особенностям поведения связанной воды в условиях подвода мощного потока теплоты.

Установлено, что взрыв зерна происходит при температуре 120...160 °С, в зависимости от индивидуальных характеристик зерна. При использовании ИК-генератора мощностью излучения 30 кВт/м², эти условия достигаются через 25...40 с, при 26,5 кВт/м² для этого требуется 25...45 с. Именно в это время и наблюдается в эксперименте интенсивное образование взорванных зерен.

Подобный результат получен и в исследовании М. Ю. Никитушкиной [37]. По ее данным, взрыв зерна сорго при использовании ИК-генератора мощностью 30,8 кВт/м² происходит через 40...45 с, при нагреве зерна до 165–170 °С.

На рис. 7.4 приводим схему изменения влажности зерна пшеницы и ячменя в процессе микронизации. Начальная стадия продолжается около 5 с, в течение которых происходит интенсивное испарение влаги из оболочек зерна. Затем в течение периода от 5 до 35...45 с происходит переход связанной зерном воды в псевдопарообразное состояние, резкое возрастание давления внутри зерна, в результате чего и происходит его взрыв.

Вполне понятно, проведенное рассмотрение этого сложного процесса является приближенным. Несомненно, это явление протекает намного сложнее, для его подробного анализа требуется организация специального слож-

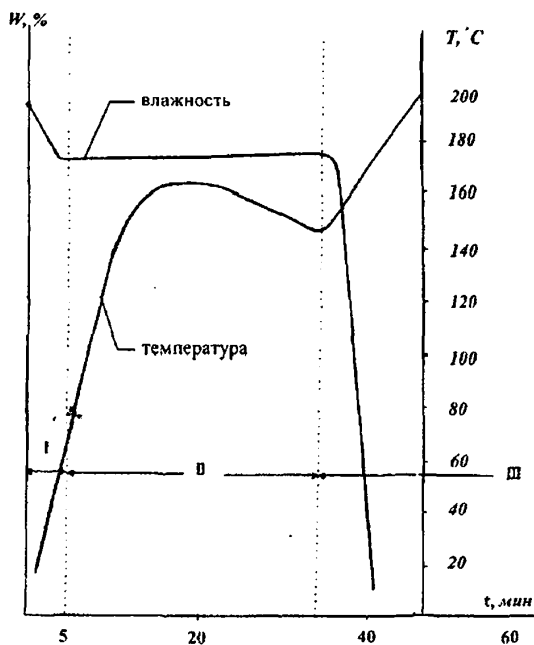


Рис. 7.4. Схема изменения влажности зерна в процессе микропизации: I — испарения влаги из оболочек; II — переход связанной в эндосперме зерна воды в псевдопарообразное состояние; III — взрыв

ного эксперимента. Но проведенная оценка возникающего давления представляет собой величину, достаточно приближенную к действительности. Во всяком случае, имеются основания считать, что процесс перехода воды в псевдопар внутри зерна происходит практически мгновенно, что и порождает анализируемый эффект.

7.5. Терморадационные и оптические характеристики зерна ячменя

Рациональное решение проблемы использования ИК-лучей в технологических процессах термической обработки зерна может быть достигнуто только на основе комплексных теоретических и экспериментальных исследований. При исследовании процесса взаимодействия ИК-лучей с обрабатываемым материалом необходимо учитывать специфические физико-химические и биологические свойства объекта облучения, которые являются основными показателями его качества и накладывают ограничения на выбор генератора ИК-энергии и параметров режима обработки. Поэтому выбор генератора тер-

моизлучения и рациональных режимов ИК-облучения в технологических процессах должен производиться на основе детального изучения всех свойств облучаемого материала, и в первую очередь их оптических и терморadiационных характеристик.

В связи с этим в спектрофотометрической лаборатории кафедры физики МТИПП автором, совместно с И. С. Агеенко, исследованы спектральные отражательная R_λ , пропускательная T_λ и поглощательная A_λ способности при различных условиях облучения зерна ячменя исходной влажности ($W = 12,7\%$), ИК-обработанного ($W = 4\%$) и увлажненного ($W = 28\%$), а также оптические характеристики – коэффициент поглощения K_λ , рассеяния "назад" S_λ и ослабления L_λ .

В производственной терморadiационной установке облучение происходит диффузным или смешанным (диффузным и направленным) потоком излучения. Поэтому данные терморadiационных характеристик зерна ячменя исследованы при различных условиях облучения в пределах длины волны $\lambda = 0,4-5,0$ мкм, соответствующей границам спектров излучения кварцевых генераторов.

Для измерения спектральных терморadiационных характеристик ячменя в области спектра $0,4-1,4$ мкм приняли метод одновременного измерения, в области длины волны излучения $1,0-5,0$ мкм – двухлучевой метод с использованием спектрофотометров СФ-4А и ИКС-12 со специально разработанными на кафедре физики МТИПП приставками, позволяющими учитывать рассеянный при отражении и пропускании поток излучения [81, 82].

Оптические характеристики K_λ , S_λ , L_λ определяли экспериментально аналитическими и графическими методами [82].

Зависимость спектральных полусферических отражательной $R_\lambda(\theta, 2\pi)$, пропускательной $T_\lambda(\theta, 2\pi)$ и поглощательной $A_\lambda(\theta, 2\pi)$ способностей исходного и ИК-обработанного ячменя толщиной слоя в одно зерно, а также цветковых пленок ячменя от длины волны излучения представлены на рис. 7.5.

Из графика видно, что наибольшая отражательная способность зерна с исходной влажностью $12,7\%$ соответствует области спектра $0,7-1,0$ мкм. Своего максимального значения $60,9\%$ она достигает при $\lambda = 0,95$ мкм. Для ИК-обработанного зерна максимальное значение R_λ соответствует области спектра $0,95-1,3$ мкм и составляет $62,4-62,8\%$.

При дальнейшем увеличении длины волны свыше 1 мкм, для зерна с исходной влажностью, и свыше $1,3$ мкм, для ИК-обработанного зерна, отражательная способность снижается при $\lambda = 2,8-3,1$ мкм достигает максимального значения $8,2-10\%$ как в первом, так и во втором случае. В диапазоне длины волн $3,1-5,0$ мкм величина R_λ несколько увеличивается и при $\lambda = 5$ мкм составляет 16% для образца ячменя исходной влажности и $18,6\%$ ИК-обра-

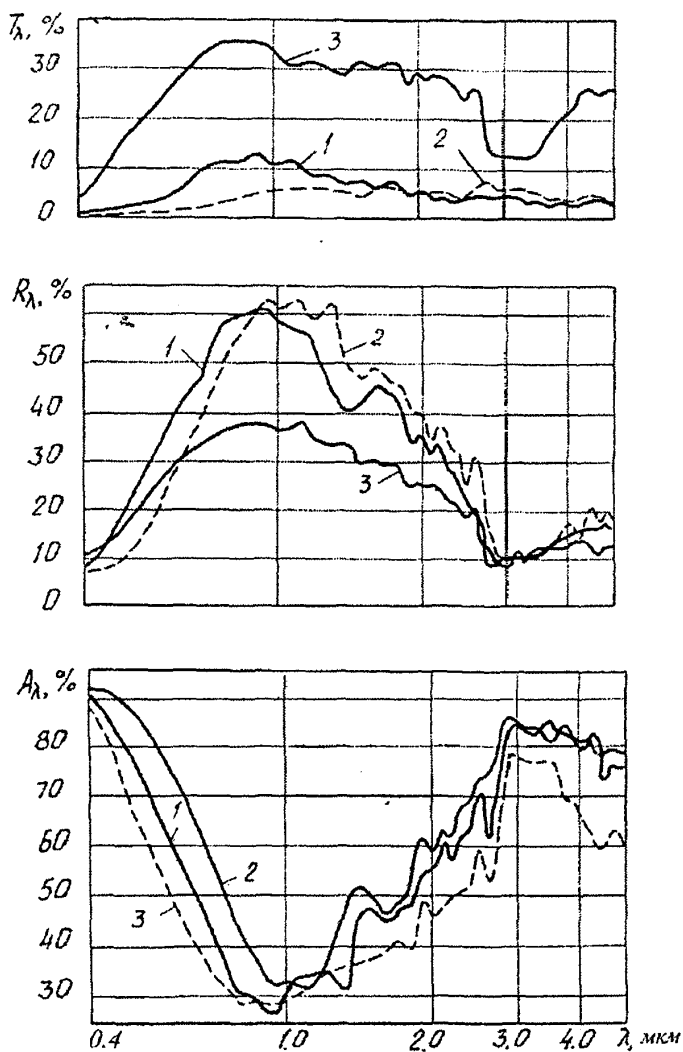


Рис. 7.5. Зависимости спектральных полусферических характеристик зерна ячменя в слое толщиной в одно зерно от длины волны:

а – отражательная способность; б – пропускательная способность; в – поглощательная способность;

1 – исходный образец; 2 – ИК-обработанный ячмень; 3 – цветковые пленки

ботанного образца ячменя. При этом характер изменения отражательной способности исходного зерна ячменя и поджаренного примерно аналогичен.

Исследование R_λ цветковых пленок зерна ячменя показало, что максимальное значение ее составляет 35–37 % в области спектра 0,7–1,1 мкм, что почти в 2 раза меньше, чем для целой зерновки ячменя. Минимальное значение отражательной способности цветковых пленок, так же как и целого зерна, приходится на область спектра 2,8–3,1 мкм и составляет 8,8–10,1 %.

Характер зависимости пропускательной способности от длины волны в коротковолновом диапазоне спектра 0,4–5,0 мкм для исходного зерна ячменя и ИК-обработанного примерно одинаков. Наибольшая пропускательная способность у ячменя с исходной влажностью наблюдается в области спектра 0,7–1,1 мкм. Однако значение ее не превышает 12,6 %. Для ИК-обработанного зерна оно еще ниже и составляет 4,7–5,8 %.

Различие величин соответствующих терморadiационных характеристик ячменя в зависимости от его исходного состояния обусловлено изменением анатомической структуры зерна при поджаривании (появление микротрещин, разрыв крахмальных гранул, изменение цвета и т. п.) [82].

В отличие от целого зерна ячменя, для цветковых пленок T_λ составляет 32–35 %, причем это значение наблюдается в области спектра 0,7–1,0 мкм.

Значение максимальной зоны пропускания цветковых пленок ячменя позволяет обоснованно выбрать необходимый для терморadiационной обработки ячменя тип ИК-излучателя. Такими излучателями являются кварцевые ИК-генераторы типа КГ-220-1000, имеющие максимальную излучательную способность при $\lambda = 1,1$ мкм.

Энергия проникающих сквозь цветковые пленки ИК-лучей поглощается эндоспермом зерна и затрачивается на его нагрев и на биохимические процессы, протекающие в эндосперме.

Исследование поглощательной способности исходного и ИК-обработанного зерна показало, что в коротковолновой области спектра 0,7–1,3 мкм поглощение минимальное и не превышает 28 %.

Область максимального поглощения ИК-лучей зерном наблюдается в диапазонах длин волн 0,4–0,55 и 3–5 мкм, где A_λ , в зависимости от состояния зерна, достигает значений 78–91 %.

Характер изменения поглощательной способности цветковых пленок ячменя такой же, как и целого зерна. Однако значение A_λ цветковых пленок на 6–11 % меньше, чем зерна.

Исследовано изменение отражательной способности R_λ исходного, ИК-обработанного и увлажненного ячменя в зависимости от длины волны для слоя толщиной в 5 зерен ($\lambda \cong 15$ мм), являющегося оптически бесконечно толстым ($T_\lambda \ll 0,01$).

Показано, что при толщине слоя зерна $l \approx 15$ мм отражательная способность поджаренного ячменя в коротковолновой области излучения 0,4–0,9 мкм на 3–5 % меньше, чем исходного (рис. 7.6). Однако в области спектра 1,2–5,0 мкм наблюдается повышение R_λ на 10–20 %, по сравнению с исходным зерном. Объясняется это, по-видимому, структурными и биохимическими изменениями ядра зерна. Увеличение начальной влажности ячменя приводит к некоторому изменению отражательной способности, значение которой становится равным 4–6 %.

Для расчета распространения и поглощения излучения в слое зерна ячменя необходимо иметь данные по таким оптическим характеристикам, как коэффициент эффективного ослабления L_λ , коэффициент поглощения K_λ и рассеяние "назад" S_λ , являющимся внутренним параметром вещества. Внутренние параметры зерна и различных капиллярно-пористых коллоидных тел непосредственным измерениям не поддаются. Они характеризуют оптические свойства вещества и структуру слоя материала в комплексе.

Для расчета оптических коэффициентов воспользуемся уравнениями, которые определяют взаимосвязь между спектральными терморрадиационными характеристиками и спектральными оптическими коэффициентами данного материала [82]:

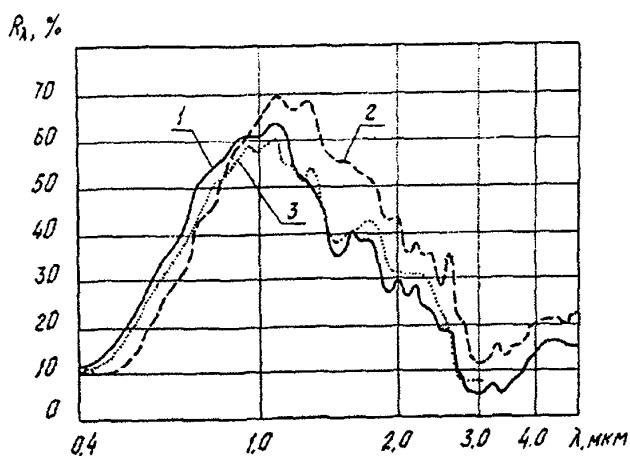


Рис. 7.6. Зависимость спектральной полусферической отражательной способности зерна ячменя слоем в 5 зерен ($l=15$ мм) от длины волны: 1 – исходный ячмень ($W = 12,7$ %); 2 – ИК-обработанный ячмень ($W = 4$ %); 3 – увлажненный ячмень ($W = 28$ %)

$$L_{\lambda} = \frac{1}{l} \ln \frac{1 - R_{\lambda_{\infty}}}{T_{\lambda}}, \quad (7.27)$$

$$S_{\lambda} = \frac{2R_{\lambda_{\infty}}}{1 - R_{\lambda_{\infty}}^2} \cdot L_{\lambda}, \quad (7.28)$$

$$K_{\lambda} = \frac{1 - R_{\lambda_{\infty}}}{1 + R_{\lambda_{\infty}}}, \quad (7.29)$$

где $R_{\lambda_{\infty}}$ — отражательная способность оптически бесконечно толстого слоя материала.

Коэффициент эффективного ослабления L_{λ} численно равен обратной величине глубины слоя, при прохождении которого суммарный поток излучения уменьшается в n раз. Спектральный коэффициент поглощения K_{λ} определяет долю плотности полусферического потока излучения $K_{\lambda} \cdot l$, падающего на слой толщиной l и поглощенного материалом при прохождении через данный слой. Спектральный коэффициент рассеяния "назад" S_{λ} определяет долю плотности полусферического потока излучения $S_{\lambda} \cdot l$, падающего на слой толщиной l и рассеянного в этом слое в сторону противоположную направлению падающего потока.

Оптические характеристики исходного и ИК-обработанного ячменя, а также цветковых пленок представлены на рис. 7.7–7.9. Как видно из графиков, исходное зерно ячменя, ИК-обработанного и цветковые пленки, обладают наибольшими коэффициентами L_{λ} и K_{λ} и наименьшим коэффициентом S_{λ} в видимой области спектра (0,4–0,7 мкм). В этом диапазоне спектра излучение сильно поглощается и ослабляется, но сравнительно слабо рассеивается в слое зерна ячменя. В области спектра $\lambda > 0,7$ мкм коэффициенты K_{λ} и L_{λ} быстро уменьшаются до 130 и 554 м⁻¹ соответственно для зерна исходной влажности, до 117 и 656 м⁻¹ для ИК-обработанного зерна и до 3000 и 5944 м⁻¹ для цветковых пленок, а S_{λ} возрастает от 1265 м⁻¹ (исходное зерно) до 1653 м⁻¹ (ИК-обработанное зерно). Коэффициент S_{λ} цветковых пленок слабо зависит от длины волны.

Таким образом, зерно ячменя обладает селективностью, взаимодействуя с ИК-лучами. Поэтому для оптимизации условий его тепловой обработки необходимо знать терморadiационные характеристики зерна по отношению к выбранному генератору излучения и распределение по толщине слоя суммарного потока энергии полного излучения.

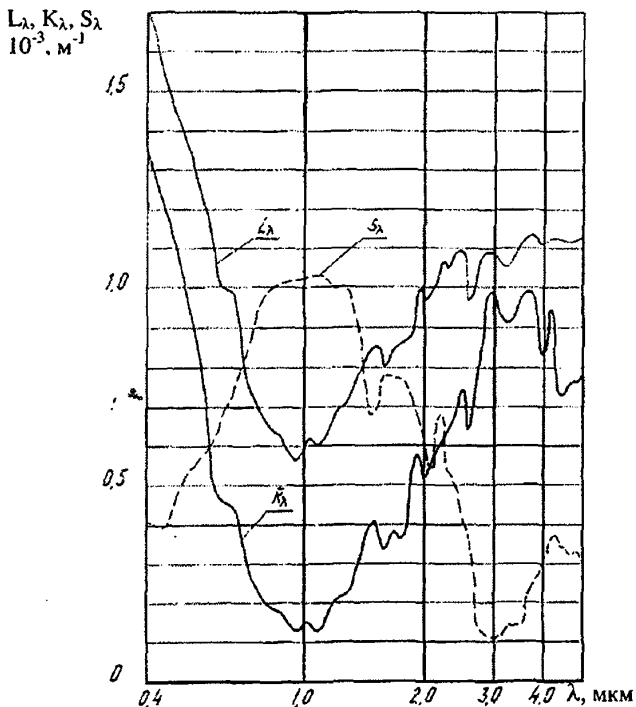


Рис. 7.7. Зависимость спектральных оптических характеристик зерна ячменя исходной влажности от длины волны

Вследствие селективности спектральных терморadiационных характеристик материалов и эмиссионных характеристик генераторов излучения интегральные терморadiационные характеристики одного и того же материала по отношению к различным излучателям будут различны и могут быть рассчитаны по следующей приближенной формуле [80, 81]:

$$A = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{\lambda\Gamma} A_{\lambda} d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{\lambda\Gamma} d\lambda} \cong \frac{\sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{\lambda\Gamma} A_{\lambda} \Delta\lambda}{\sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{\lambda\Gamma} \Delta\lambda}, \quad (7.29)$$

где A – спектральная полушарическая характеристика (A_{λ} , R_{λ} , T_{λ}), определяемая по спектральному составу падающего излучения от выбранного излучателя; $E_{\lambda\Gamma}$ – спектральная интенсивность падающего потока излучения, зависящая от характеристик выбранного ИК-генератора и условий облучения материала

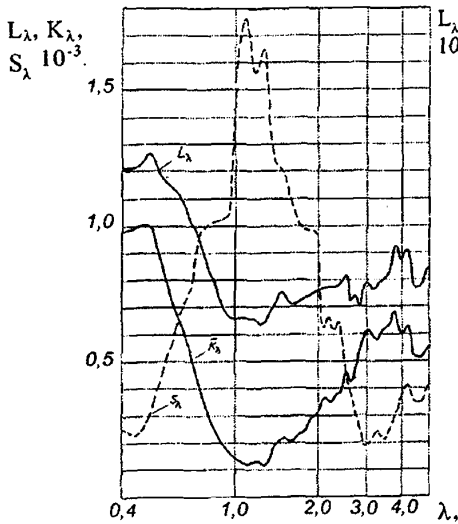


Рис. 7.8. Зависимость спектральных оптических характеристик ИК-обработанного зерна ячменя от длины волны

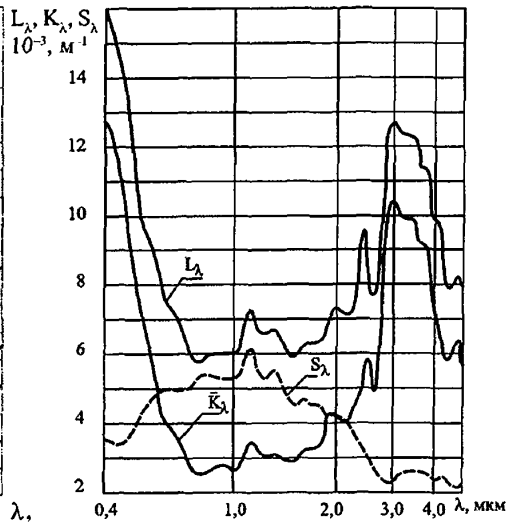


Рис. 7.9. Зависимость спектральных оптических характеристик оболочки исходного зерна ячменя от длины волны

Спектральный интервал $\Delta\lambda = 0,1$ мкм обеспечивает хорошую точность расчета. Пределы по длине волны приняты $\lambda_1 = 0,4$ мкм и $\lambda_2 = 5,0$ мкм, что охватывает 95 % доли спектра излучения реальных генераторов ИК-излучения.

Нами было выбрано два типа ИК-генераторов: кварцевый КГ-220-1000 и газовые ГИИП-150РП, спектральные характеристики которых удачно сочетаются со спектральными оптическими характеристиками обрабатываемого зерна.

Результаты расчета интегральных терморрадиационных характеристик зерна ячменя слоем толщиной в одно зерно ($l = 2,9$ мм) по спектрам излучения выбранных генераторов излучения приведены в таблице 7.1.

Расчет оптических усредненных интегральных характеристик L , \bar{K} , S для слоя толщиной $l = 2,9$ мм проводили по формулам (3.57), (3.58) и (3.59) с помощью определенных по формуле (3.60) характеристик R , T и R_∞ .

При помощи вычисленных интегральных характеристик R , T и R_∞ зерна для расчета распространения и поглощения излучения в слое воспользуемся закономерностями распространения и поглощения излучения в коллоидных

Значения интегральных оптических и терморadiационных характеристик исходного зерна ячменя при облучении ИК-генераторами

Излучатель	Интегральные характеристики ячменя					
	\bar{R}	\bar{T}	\bar{R}_∞	$L, \text{м}^{-1}$	$S, \text{м}^{-1}$	$\bar{K}, \text{м}^{-1}$
КГ-220-1000	0,457	0,0839	0,438	7990	8673	3492
ГИИП-150РП	0,340	0,0553	0,294	10610	6369	4924

капиллярно-пористых телах, установленных С. Г. Ильясовым и В. В. Красниковым [81]. Отправными положениями расчета являются уравнения, которые при одностороннем облучении определяют на глубине слоя x спектральную плотность пространственной облученности $E_\theta(x)$ материала, равную

$$E_\theta(x) = E_\Pi (1 + R_\infty) \exp(-Lx), \quad (7.30)$$

поглощенной энергии $W(x)$

$$W(x) = \bar{K} E_\Pi (1 + R_\infty) \exp(-Lx) = \bar{K} E_\theta(x) \quad (7.31)$$

и результирующего потока излучения $q(x)$

$$q(x) = E_\Pi (1 - R_\infty) \exp(-Lx), \quad (7.32)$$

где E_Π – плотность падающего интегрального потока излучения;
 x – координата слоя в направлении проникающего излучения.

Величина плотности падающего интегрального потока излучения E_Π зависит от спектральных терморadiационных характеристик облучаемого материала и паровоздушной среды, генераторов ИК-излучения и ограждений, а также от формы, размеров и взаимного расположения материала, генератора и отражателя. Вследствие многократных отражений от поверхностей материала, ограждений и излучателя E_Π может значительно превышать плотность потока $E_{\Pi p}$ испускаемого ИК-генератором. При учете многократных отражений для случаев одностороннего облучения плотность монохроматического потока излучения, падающего на поверхность слоя материала, если пренебречь поглощением и рассеянием излучения паровоздушной среды, можно определить по следующей формуле [81] интегрирования по спектру:

$$E_n = \frac{0,5E_u(1 + \bar{R}_p)}{1 + R_M \bar{R}_p}, \quad (7.33)$$

где \bar{R}_p – спектральная отражательная способность рефлекторов полированного алюминия;
 \bar{R}_M – спектральная отражательная способность материала.

Результаты расчетов $E_0(x)$, $W(x)$ и $q(x)$ по формулам (7.30), (7.31) и (7.32) в пределах спектра ИК-излучения $\lambda = 0,4-5,0$ мкм приведены в таблице 7.2 и на рис. 7.10.

Сравнивая величины поглощенной энергии излучения и ее распределение по толщине слоя зерна для рассматриваемых генераторов излучения, выбираем ИК-излучатель КГ-220-1000, для которого величина энергии распределения по толщине слоя $W(x)$ существенно выше, чем наилучшим образом

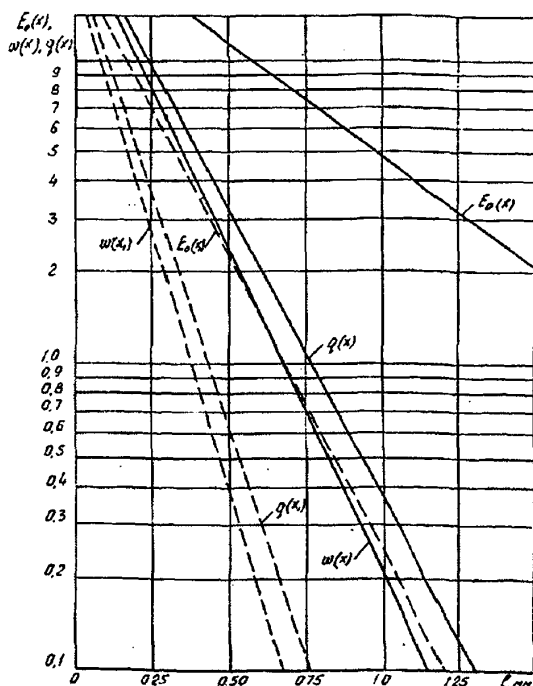


Рис. 7.10. Распределение $E_0(x)$, $W(x)$ и $q(x)$ в слое зерна ячменя при использовании ИК-генераторов

Таблица 7.2

Значение интегральных плотностей падающего потока излучения и характеристики поля излучения при облучении исходного зерна ячменя ИК-генераторами

Излучатель	$E_{\text{п}}$, кВт/м ²	$E_0(x)$, кВт/м ²	$W(x)$, кВт/м ³	$q(x)$, кВт/м ²
КГ-220-1000	23,12	3,27	1,14	1,29
ГИИП-150РП	20,15	1,20	0,59	0,66

соответствует целям данного технологического процесса термообработки ячменя.

7.6. Процесс ИК-нагрева зерна ячменя

Процесс термообработки определяется совокупностью влияния на него различных режимных параметров, которые можно подразделить на три группы: I – параметры, определяющие режим термообработки; II – параметры, определяющие состояние и свойства нагреваемого материала, т. е. технологические параметры; III – конструктивные параметры, определяющие влияние конструктивных размеров и особенностей терморadiационной установки на процесс ИК-нагрева.

Было изучено два способа обработки зерна ячменя ИК-лучами: ИК-обработка и микронизация. ИК-обработку зерна осуществляли на лабораторной установке для нагрева зерна ИК-лучами до такого состояния, при котором не происходит ухудшения товарного вида зерна.

Сущность способа микронизации заключается в быстром нагреве зерна ИК-лучами до 170–180 °С в течение 35–60 с в зависимости от вида зерна и его состояния. В результате за счет скоростного образования паровоздушной смеси из внутренней влаги зерна происходит его вспучивание. Зерно становится мягким и пластичным. В таком состоянии оно легко плющится.

7.6.1. Влияние плотности падающего потока излучения на процесс ИК-нагрева зерна ячменя

Одним из основных параметров, определяющих режим термообработки при ИК-нагреве зерна, является плотность падающего потока излучения.

Увеличение интенсивности терморadiационного нагрева характеризуется увеличением температуры обрабатываемого продукта и сокращением длительности облучения. Поэтому плотность падающего потока излучения должна выбираться с учетом предельно допустимой температуры нагрева зерна и

равномерности поля облучения, так как они оказывают существенное влияние на изменение качественных показателей зерна.

Недостаточная плотность падающего потока излучения при микронизации зерна приводит к увеличению длительности его нагрева и испарению влаги из зерна. Оно становится сухим и при плющении крошится, что снижает эффект данного способа обработки. Высокая плотность падающего потока излучения также не дает желаемого эффекта.

Критерием оценки плотности падающего потока излучения при поджаривании ячменя служили степень декстринизации крахмала и коэффициент переваримости белка (*in vitro*), характеризующий отношение переваримости белка к исходному содержанию его в зерне; при микронизации – степень декстринизации крахмала и показатель количества взорванных зерен, составляющий 5–7 % от общего количества обрабатываемого зерна. При увеличении этого коэффициента свыше 7 % наблюдается крошимость зерна при плющении, а при снижении его ниже 5 % зерно недостаточно пластично.

7.6.2. Выбор оптимальной плотности падающего потока излучения при ИК-обработке зерна ячменя

При изучении влияния режимов ИК-нагрева ячменя при поджаривании на его качество плотность падающего потока излучения изменяли от 8 до 20,5 кВт/м², длительность обработки от 0,5 до 6 мин.

На рис. 7.11 приведены температурные кривые зерна ячменя влажностью 12,7 % при различных значениях плотности падающего потока излучения E в процессе его ИК-обработки. Представленные на графике зависимости получены методом последовательного наложения ряда опытов, проведенных при одних и тех же значениях исследуемых параметров.

Анализ кривых показывает, что при ИК-обработке ячменя наиболее интенсивный нагрев зерновой массы происходит при плотности падающего потока излучения 20,5 кВт/м². В этом случае уже через 3 мин нагрева температура зерна достигала 200 °С. Однако за этот промежуток времени при данном значении плотности падающего потока излучения происходит обгорание цветковых пленок зерна, что ухудшает его товарный вид.

В таблице 7.3 показано изменение содержания декстринов в зерне ячменя и коэффициента переваримости белка (*in vitro*) в зависимости от плотности падающего потока излучения. Результаты полученных данных показывают, что при плотности потока излучения 16,3 кВт/м², температуре нагрева зерна 170–180 °С и длительности обработки 4 мин в зерне образуется максимальное количество декстринов (до 9,4 %). При этом коэффициент переваримости

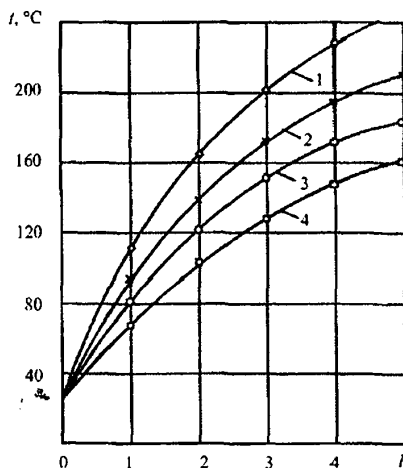


Рис. 7.11. Температурные кривые зерна ячменя, полученные при различных значениях плотности падающего потока излучения в процессе ИК-обработки: 1 – $E = 20,5 \text{ кВт/м}^2$; 2 – $E = 16,3 \text{ Вт/м}^2$; 3 – $E = 12 \text{ кВт/м}^2$; 4 – $E = 8 \text{ кВт/м}^2$

белка практически не снижается по сравнению с его значением в исходном зерне.

Снижение плотности падающего потока излучения до 12 кВт/м^2 и увеличении длительности обработки до 5 мин вызывает ухудшение качества ИК-обработанного ячменя. Хотя содержание декстринов в зерне практически не изменяется по сравнению с их количеством в зерне, обработанном при $E = 16,3 \text{ кВт/м}^2$ коэффициент переваримости белка несколько ниже, что объясняется увеличением времени воздействия ИК-лучей, и чем меньше значение плотности падающего потока (8 кВт/м^2) и дольше длительность обработки, тем ниже коэффициент переваримости белка.

Увеличение плотности падающего потока излучения до $20,5 \text{ кВт/м}^2$, хотя и сокращает длительность обработки зерна до 3,5 мин, но приводит к некоторому уменьшению содержания декстринов в зерне. При этом режиме обработки их количество в зерне снижается на 17,1 % по сравнению с зерном, ИК-обработанным при $E = 16,3 \text{ кВт/м}^2$.

Из изложенного можно сделать вывод, что оптимальное значение плотности падающего потока излучения при поджаривании зерна соответствует $16,3 \text{ кВт/м}^2$. При этом режиме обработки ИК-обработанный ячмень приобретает наилучшие качества.

Изменение содержания декстринов в зерне ячменя при ИК-обработке и коэффициента переваримости белка (in vitro) в зависимости от плотности падающего потока излучения

Режимы обработки ячменя		Содержание декстринов в зерне, %	Коэффициент переваримости белка, %
Плотность падающего потока ИК-излучения, кВт/м ²	Длительность облучения, мин		
Зерно исходное	-	1,1	77,8
8,0	6,0	8,7	70,8
12,0	5,0	9,2	72,4
16,3	4,0	9,4	76,4
20,5	3,5	7,8	77,2

7.6.3. Выбор оптимальной плотности падающего потока излучения при микронизации зерна ячменя

При изучении влияния интенсивности ИК-нагрева ячменя при микронизации на его качество плотность падающего потока излучения изменяли от 25,5 до 30 кВт/м², длительность обработки от 10 до 60 с. На рис. 7.12 приведены температурные кривые зерна ячменя при различных значениях плотности падающего потока излучения. Анализ кривых показывает, что при микронизации нагрев зерна протекает значительно интенсивнее, чем при поджаривании. Температура нагрева зерна при плотности падающего потока 28 кВт/м² в течение 50 с достигает 170–180 °С. При увеличении E до 30 кВт/м² скорость нагрева зерна увеличивается, но внешний вид ухудшается. С уменьшением плотности падающего потока ниже 28 кВт/м² пластические свойства зерна при облучении ухудшаются, что отрицательно сказывается на качестве хлопьев. Поэтому при изучении влияния плотности падающего потока излучения при облучении зерна в процессе микронизации на степень декстринизации крахмала и количество взорванных зерен температура нагрева зерна и длительность его облучения ИК-лучами были приняты 170–180 °С и 50 с соответственно.

В таблице 7.4 показана зависимость содержания декстринов и количества взорванных зерен ячменя от плотности падающего потока излучения при микронизации. Анализ данных таблицы показывает, что при плотности падающего потока излучения 25,5 кВт/м² содержание декстринов в зерне увели-

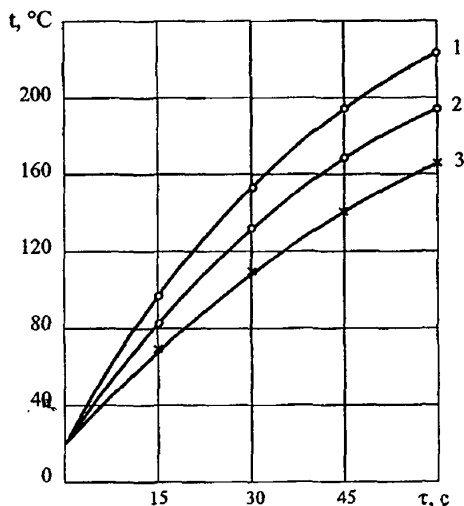


Рис. 7.12. Температурные кривые зерна ячменя, полученные при различных значениях плотности падающего потока излучения в процессе микронизации:

1 – $E=30 \text{ кВт/м}^2$; 2 – $E=28 \text{ кВт/м}^2$; 3 – $E=25,5 \text{ кВт/м}^2$

чивается в 4,3 раза по сравнению с их содержанием в исходном зерне. При этой плотности потока взрывания зерен не наблюдается.

Увеличение плотности падающего потока излучения до 28 кВт/м^2 приводит к увеличению содержания декстринов в облученном зерне в 5 раз по сравнению с их количеством в исходном ячмене. Количество взорванных зерен при этом составляло 5,8 %. Дальнейшее увеличение плотности потока излучения до 30 кВт/м^2 вызывает незначительное повышение содержания декстринов в зерне и резкое увеличение количества взорванных зерен (до 16,6 %).

Следовательно, на основании исследований оптимальной плотностью ИК-излучения при микронизации зерна ячменя является плотность 28 кВт/м^2 .

Таблица 7.4

Зависимость содержания декстринов и количества взорванных зерен ячменя от плотности падающего потока излучения при микронизации

Плотность падающего потока излучения, кВт/м^2	Содержание декстринов в зерне, %	Количество взорванных зерен, %
Зерно исходное	1,1	-
25,5	4,8	-
28,0	5,6	5,8
30,0	5,8	16,6

7.7. Влияние толщины и состояния слоя зерна ячменя на процесс ИК-нагрева

Толщина слоя зерна является одним из важных технологических параметров, значительно влияющих на процесс ИК-нагрева.

Для выявления условий терморadiационного нагрева зерна ячменя влажностью 12,7 % в неподвижном слое толщиной в 6 зерен ($l \cong 19$ мм) было измерено температурное поле (рис. 7.13 и 7.14) и изменение влажности зерна (рис. 3.53) при одностороннем облучении с плотностью падающего потока 16,3 кВт/м².

Установлено, что зерно прогревается от поверхности внутрь с параболическим распределением температуры, причем температурный градиент слоя толщиной приблизительно 9 мм (слой в 3 зерна) достигается через 0,5 мин прогрева 2,2 °/мм, а через 4 мин – 8,8 °/мм (рис. 7.13).

Начиная с глубины в 4 зерна ($l \cong 12$ мм) величина температурного градиента падает и с течением времени изменяется незначительно (в пределах 1,5–1,6 °/мм).

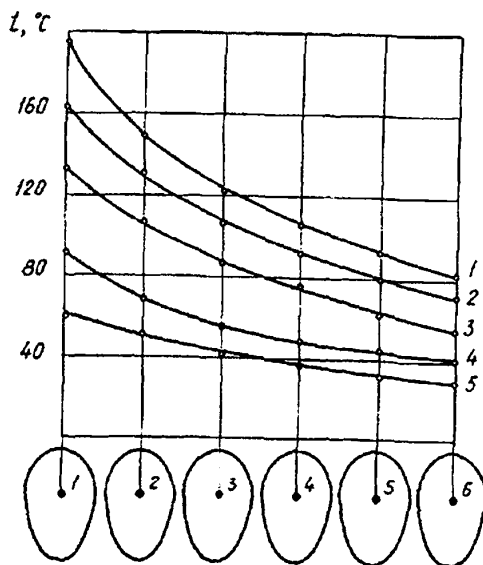


Рис. 7.13. Температурное поле слоя зерна ячменя толщиной в 6 зерен ($l \cong 19$ мм):

1 — $\tau = 4$ мин; 2 — $\tau = 3$ мин;
3 — $\tau = 2$ мин; 4 — $\tau = 1$ мин; 5 — $\tau = 0,5$ мин

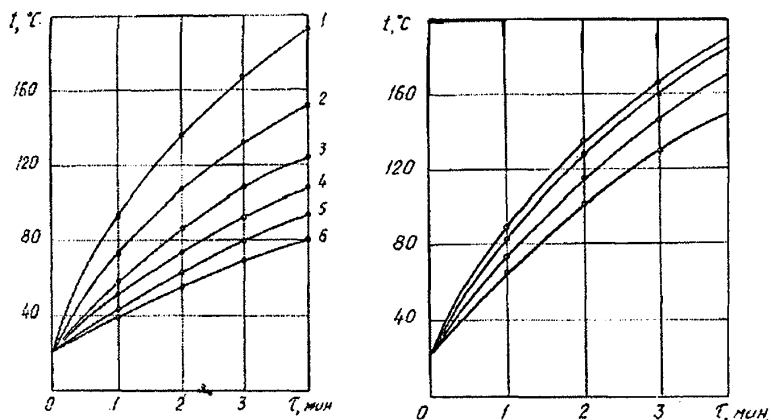


Рис. 7.14. Изменение температуры неподвижного (а) и виброперемешивающегося (б) слоев зерна в зависимости от их толщины: 1 — одно зерно; 2 — два зерна; 3 — четыре зерна; 4 — пять зерен; 5 — шесть зерен

Наличие значительного температурного градиента, направленного к поверхности слоя, вызывает перемещение влаги в глубину слоя. В результате нижние слои зерна имеют более высокую влажность, чем верхние (рис. 7.15).

Таким образом, при термообработке зерна в толстом неподвижном слое верхние слои зерна будут быстро нагреваться до предельно допустимого значения температуры, в то время как нижние слои сохраняют низкую температуру и высокую влажность. Поэтому удовлетворительные результаты терморadiационного нагрева зерна в неподвижном слое можно получить только при толщине слоя в одно зерно.

Для улучшения равномерности обогрева зерна, повышения удельной производительности и уменьшения энергозатрат на процесс ИК-нагрева необходимо применять разрыхление и интенсивное перемешивание зерна. Интенсивное перемешивание зерновой массы создает условия постоянного обновления частиц, находящихся в зоне действия излучателей, при этом терморadiационному нагреву подвергаются не только зерновки, находящиеся на поверхности, но и в глубине слоя. Это позволяет улучшить качество обработки зерна, не снижая интенсивности процесса ИК-нагрева.

Изучение нагрева зерна в виброперемешивающемся слое проводили при постоянных амплитуде и частоте колебаний, равных 1,0–1,5 мм и 25–30 Гц соответственно. Измерение температуры при этом осуществляли при помощи специально изготовленных термопар с приставками.

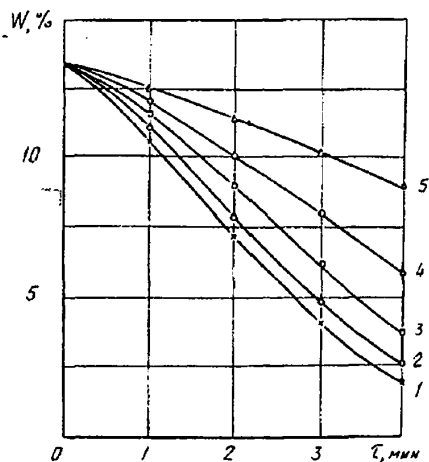


Рис. 7.15. Кривые изменения влажности зерна при его обработке ИК-лучами в неподвижном слое толщиной:

1 — одно зерно; 2 — два зерна;

3 — четыре зерна; 4 — пять зерен; 5 — шесть зерен

Показано, что применение виброперемешивания создает условия почти полной изотермичности слоя толщиной в 5 зерен ($l \cong 15$ мм). При этой толщине слоя температура зерновой массы в любой его точке (рис. 7.14б) всегда ниже, чем температура в верхней зоне неподвижного слоя (слой в одно зерно). Однако увеличение толщины слоя более 5 зерен значительно снижает среднюю температуру прогрева зерна. Она становится ниже 170–180 °С.

Таким образом, при амплитуде 1,0–1,5 мм и частоте колебаний 25–30 Гц наиболее приемлемой является толщина виброперемешивающегося слоя в 5 зерен ($l \cong 15$ мм).

7.8. Кинетика обезвоживания зерна в процессе ИК-нагрева

Чтобы получить более полную картину о влиянии ИК-нагрева на зерно, необходимо было проследить за кинетикой обезвоживания зерна в процессе ИК-нагрева. На рис. 7.16 и 7.17 показано изменение влажности зерна ячменя от продолжительности облучения в неподвижном слое при различном значении плотности падающего потока ИК-излучения.

Таким образом, чем больше градиент температуры при прогреве зерна, тем значительно больше изменяется исходная структура крахмала.

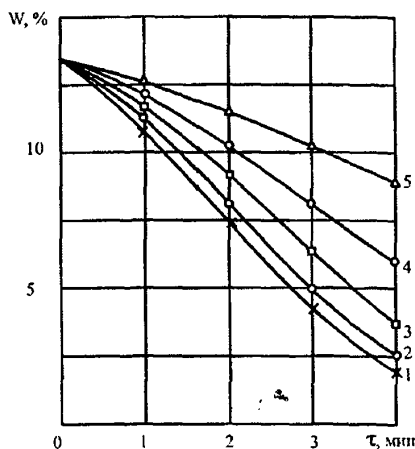


Рис. 7.16. Кривые влажности зерна ячменя в процессе ИК-обработки при различной плотности падающего

потока излучения:

1 — $E=20,5 \text{ кВт/м}^2$;

2 — $E=16,3 \text{ кВт/м}^2$;

3 — $E=12 \text{ кВт/м}^2$;

4 — $E=8 \text{ кВт/м}^2$

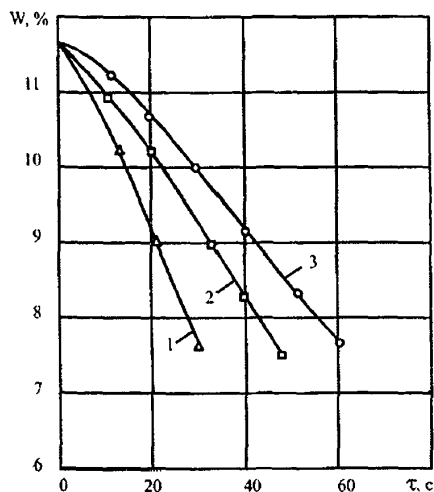


Рис. 7.17. Кривые влажности зерна ячменя в процессе микроиризации при различной плотности падающего

потока излучения:

1 — $E=30 \text{ кВт/м}^2$;

2 — $E=28 \text{ кВт/м}^2$;

3 — $E=25,5 \text{ кВт/м}^2$

После прогрева наблюдается линейная зависимость между W и длительностью термообработки τ , т. е. наступает период постоянной скорости испарения влаги.

7.9. Изменение углеводного комплекса зерна ячменя при ИК-нагреве

7.9.1. Влияние ИК-нагрева на степень декстринизации крахмала зерна ячменя

Ранее [45, 46, 64, 108, 116] установлено, что термическая и гидротермическая обработка оказывают значительное влияние на углеводный комплекс зерна. Нагревание его при высоких температурах вызывает декстринизацию крахмала, сопровождающуюся образованием легкорастворимых углеводов, и в первую очередь декстринов.

По данным W. A. Krehl [240] и A. E. Harper [236] декстринизация крахмала оказывает положительное влияние на усвояемость корма, а следовательно

на рост и развитие животных. В связи с этим показатель декстринизации крахмала выбран как один из основных при оценке режимов ИК-нагрева зерна.

При исследовании влияния ИК-нагрева зерна ячменя на степень декстринизации крахмала плотность падающего потока излучения E и толщина облучаемого слоя l ячменя при поджаривании и микронизации соответствовали при ИК-обработке ячменя $E = 16,3 \text{ кВт/м}^2$ при микронизации $E = 28 \text{ кВт/м}^2$. Толщина виброперемешивающегося слоя при этом соответствовала 15 мм.

В процесса ИК-обработки ячменя исходной влажностью 12,7 % определено, что общее содержание декстринов в зерне возрастает с увеличением длительности термообработки и температуры нагрева зерна (таблица 7.5). При повышении температуры нагрева зерна до 112 °С и длительности обработки до 1,5 мин количество декстринов увеличивается на 1,8 % по сравнению с исходным образцом зерна. Такое незначительное повышение степени декстринизации крахмала, очевидно, объясняется сравнительно невысокой температурой нагрева зерна.

Таблица 7.5

*Изменение содержания декстринов в зерне ячменя
исходной влажности при поджаривании*

Образец ячменя	Длительность облучения, мин	Температура нагрева зерна, °С	Влажность зерна, %	Содержание декстринов в зерне, %
Исходный	-	-	12,7	1,1
ИК-обработанный	0,5	48	12,1	1,4
	1,0	87	11,1	1,8
	1,5	112	9,2	2,9
	2,0	130	7,8	4,3
	2,5	140	6,5	6,0
	3,0	160	4,9	7,7
	3,5	173	3,8	8,5
	4,0	181	3,1	9,3
	4,5	191	2,8	9,6
	5,0	198	2,9	9,8

Увеличение температуры нагрева ячменя свыше 112 °С значительно ускоряет процесс декстринизации крахмала. Так, поджаривание зерна при температуре 130 °С в течение 2 мин повышает содержание декстринов в нем в 3,9 раза по сравнению с исходным образцом. Это объясняется, по-видимому, протеканием термического и кислотного гидролиза. Ферментный гидролиз в этих условиях невозможен, так как при нагреве зерна свыше 80 °С происходит инактивация ферментов [113].

При температуре нагрева зерна 100 °С и выше зерновка размягчается, вспучивается и растрескивается.

По данным Л. И. Нагайченко [132], разрыв и вспучивание зерновки сопровождается декструкцией и значительным увеличением в объеме крахмальных гранул.

При температуре нагрева зерна 173–181 °С и длительности облучения 3,5–4 мин содержание декстринов в зерне увеличивается в 8,4 раза по сравнению с их содержанием в исходном образце. Дальнейшее повышение длительности воздействия ИК-лучей на зерно вызывает незначительное увеличение степени декстринизации крахмала. К тому же при температуре нагрева ячменя выше 181 °С происходит подгорание цветковых пленок зерна, что ухудшает его товарный вид. *

Изучение влияния процесса микронизации на декстринизацию крахмала ячменя исходной влажности 12,7 % показало, что общее содержание декстринов в микронизированном зерне, так же как и в ИК-обработанном, с увеличением длительности облучения и температуры нагрева зерна возрастает (таблица 7.6). В первые 15 с воздействия ИК-лучей количество декстринов увеличилось в 1,2 раза по сравнению с исходным зерном. Через 30 с температура нагрева зерна и количество декстринов в нем возрастают соответственно до 134 °С и в 3,3 раза.

При длительности облучения 50 с температура нагрева зерна увеличивается до 178 °С, а содержание декстринов в нем – в 5 раз. За данный проме-

Таблица 7.6

Изменение содержания декстринов в зерне ячменя исходной влажности при микронизации

Образец ячменя	Длительность облучения, мин	Температура нагрева зерна, °С	Влажность зерна, %	Содержание декстринов в зерне, %
Исходный	-	-	12,7	1,1
Микронизированный	10	52	12,5	1,1
	15	89	12,1	1,3
	20	109	11,6	1,9
	25	125	11,1	2,5
	30	134	10,7	3,7
	35	145	10,3	4,1
	40	156	9,8	4,8
	45	170	9,4	5,2
	50	178	8,5	5,3
	55	183	8,2	5,5
	60	189	7,6	5,6

жуток облучения зерно вспучивается и размягчается, становясь пластичным. В таком состоянии оно подается на вальцовый станок.

Дальнейшее облучение ячменя приводит к его растрескиванию и интенсивному испарению влаги. Зерно приобретает более хрупкую структуру и при плющении крошится.

При уменьшении величины зазора между вальцами от 0,5 до 0,1 мм в процессе микронизации степень декстринизации крахмала хлопьев несколько увеличивается (таблица 7.7). Однако хлопья, полученные при зазоре 0,15–0,1 мм, в результате сильного механического воздействия приобретают хрупкую структуру и при транспортировке крошатся. Кроме того, при этом зазоре резко возрастает расход энергии на плющение и уменьшается производительность плющильного станка. Поэтому наиболее оптимальной величиной зазора между вальцами является величина, равная 0,2–0,3 мм.

Таким образом установлено, что максимальное количество декстринов при ИК-обработке и микронизации зерна исходной влажностью 12,7 % образуется при температуре его нагрева 170–180 °С. Оптимальная длительность облучения при этом составляет 4 мин (ИК-обработка) и 50 с (микронизация). Плющение облученного в процессе микронизации зерна при зазоре между вальцами 0,2–0,3 мм увеличивает содержание декстринов в хлопьях до 1 % по сравнению с их содержанием в облученном зерне.

Как известно, на декстринизацию крахмала значительное влияние оказывает влажность зерна. На это указывают в своих работах Р. Керр [232], Н. Н. Трегубов [194] и Н. В. Лисицына [43].

Нами исследовано влияние влажности зерна на содержание в нем декстринов в процессе ИК-обработки и микронизации. В опытах влажность зерна изменяли от 10 до 40 %. Увлажненное зерно ИК-обработывали или микронизировали.

С увеличением влажности зерна от 10 до 40 %, содержание декстринов в ИК-обработанном ячмене увеличивается, достигая максимального значения

Таблица 7.7

Изменение содержания декстринов в хлопьях в зависимости от величины зазора между вальцами

Показатели	Зерно после облучения	Хлопья					
		Величина зазора между вальцами, мм					
		0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5
Содержание декстринов, %	5,3	6,8	6,5	6,2	6,0	5,7	5,5

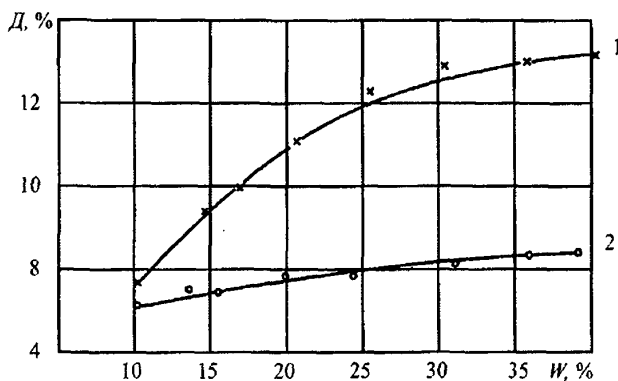


Рис. 7.18. Влияние влажности зерна на содержание декстринов:
 1 – ИК-обработанный ячмень;
 2 – микронизированный ячмень (хлопья)

12,4–12,8 % при влажности 30–35 % (рис. 7.18). Дальнейшее повышение влажности зерна не приводит к увеличению степени декстринизации крахмала.

При одном и том же значении влажности с увеличением температуры нагрева зерна количество декстринов в нем увеличивается (рис. 7.19). Так, если при нагреве зерна влажностью 30,4 % до температуры 130 °С образуется 6,2 % декстринов, то при температуре 180 °С – 12,8 %, что в 2,1 раза больше. Такая зависимость наблюдается при всех исследуемых значениях влажности.

ИК-обработанное зерно увеличивается в объеме, вспучивается и разрывается. Однако изменения в увлажненном зерне выражены в большей степени, чем в зерне исходной влажности. Очевидно, это объясняется тем, что при увлажнении зерна снижается энергия связи влаги, в связи с чем резко возрастает давление паровоздушной смеси, образующейся внутри зерновки при повышении температуры.

Влияние влажности зерна на процесс микронизации показывает, что в хлопьях, полученных из увлажненного и микронизированного зерна, наблюдается некоторое увеличение количества декстринов (рис. 7.19). Так, в хлопьях, полученных из ячменя, увлажненного до 24,8 %, содержание декстринов увеличилось на 1,6 % по сравнению с хлопьями, полученными из микронизированного зерна исходной влажности и составило 7,6 %, а в хлопьях из ячменя, увлажненного до 30,2 % – на 1,9 % и равнялось 8,1 %, увеличение влажности зерна свыше 30 % не приводит к значительному повышению степени декстринизации крахмала в хлопьях.

Как и при ИК-обработке увлажненного зерна, в процессе микронизации с увеличением температуры нагрева степень декстринизации крахмала увели-

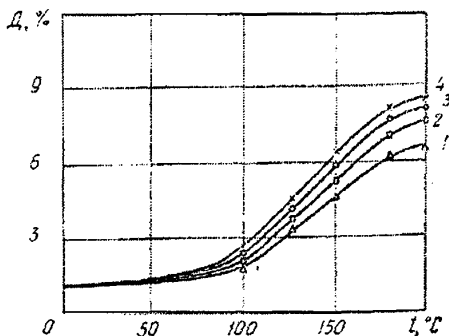
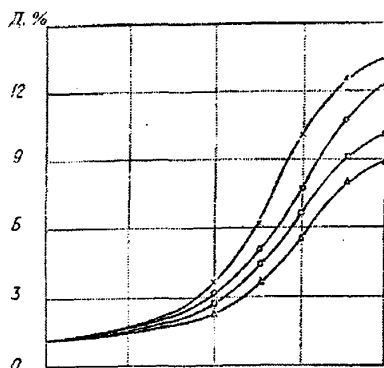


Рис. 7.19. Влияние температуры нагрева предварительно увлажненного зерна в процессе ИК-обработки (а) и микронизации (б) на содержание декстринов при влажности:

1 - $W = 12,7\%$; 2 - $W = 19,7\%$; 3 - $W = 24,8\%$; 4 - $W = 30,2\%$

чивается. Однако накопление декстринов в этом случае идет гораздо медленнее (рис. 7.19).

Исследование влияния влажности зерна на длительность термообработки показало, что с увеличением влажности длительность процесса ИК-нагрева зерна удлиняется (рис. 7.20). Так, если при нагреве зерна влажностью 12,7 % до температуры 170–180 °С оптимальная длительность облучения при ИК-обработке составляла 4 мин, а при микронизации 50 с, то для зерна влажностью 30,2 % время воздействия терморadiации увеличилось до 5 мин при ИК-обработке и до 60 с при микронизации.

Следовательно, на степень декстринизации крахмала при ИК-обработке зерна существенное влияние оказывает его влажность. Максимальный эффект декстринизации крахмала достигается при увлажнении зерна ячменя до влажности 30–35 % и длительности облучения 5 мин. В этом случае содержание декстринов в зерне составляет 12,8 %. При микронизации влияние увлажнения зерна на содержание декстринов в нем незначительно (1,5–2 %).

Ранее проведенными исследованиями установлено, что обработка зерна паром является наиболее интенсивным способом его увлажнения [65, 188].

Влияние пропаривания ячменя при ИК-нагреве на степень декстринизации крахмала проведено при давлении пара близком к атмосферному, так как обработка зерна паром при избыточном давлении не позволяет повысить его влажность до установленного нами оптимального ее значения 30–35% (при увлажнении зерна) без предварительного замачивания в воде [119].

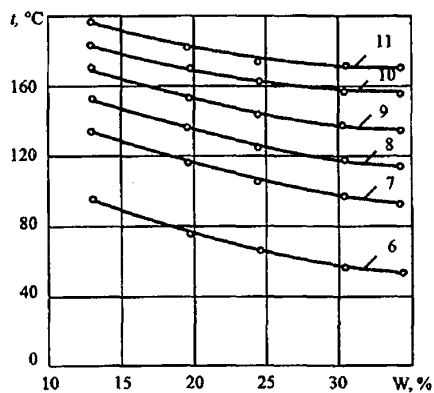
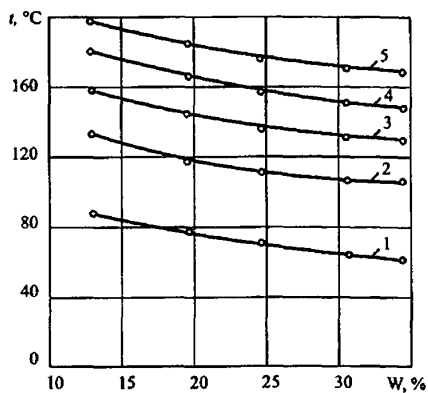


Рис. 7.20. Зависимость температуры нагрева зерна ячменя от его начальной влажности при различной длительности облучения:

а — ИК-обработка; б — микронизация.

1 — $\tau = 1$ мин; 2 — $\tau = 2$ мин; 3 — $\tau = 3$ мин; 4 — $\tau = 4$ мин;

5 — $\tau = 5$ мин; 6 — $\tau = 15$ с; 7 — $\tau = 30$ с; 8 — $\tau = 40$ с;

9 — $\tau = 45$ с; 10 — $\tau = 50$ с; 11 — $\tau = 1$ мин

Экспериментально установлено, что предварительная обработка ячменя паром незначительно влияет на степень декстринизации крахмала (таблица 7.8). Так, при пропаривании зерна в течение 10 мин количество декстринов в нем увеличилось на 0,9 %, а в течение 20 мин — на 1,2 % по сравнению с их содержанием в исходном зерне.

Однако ИК-обработка ИК-лучами пропаренного ячменя значительно интенсифицирует процесс декстринизации крахмала. Так, если в пропаренном в течение 10–15 мин ячмене влажностью 24,8–29,4 % количество декстринов составляло в среднем 2,7–2,8 %, то в пропаренном и ИК-обработанном ячмене их количество увеличилось до 17,3–17,7 %, т.е. в 6,3 раза.

Увеличение влажности пропаренного зерна свыше 24,8 % нецелесообразно, так как степень декстринизации крахмала ИК-обработанного ячменя возрастает в дальнейшем незначительно. К тому же увеличивается расход пара и эффект данного способа обработки зерна снижается.

При микронизации пропаренного зерна, так же как и при ИК-обработке, с повышением влажности зерна интенсифицируется накопление в нем декстринов. В микронизированных хлопьях содержится 7,4 % декстринов при влажности пропаренного зерна 16,4 %, а при влажности 24,8 % количество декстринов в хлопьях увеличивается только до 10,2 %.

При дальнейшем увеличении влажности зерна процесс декстринизации крахмала замедляется.

Изменение содержания декстринов в пропаренном зерне с последующей его обработкой ИК-лучами

Длительность пропаривания, мин	Влажность зерна, %	Способ обработки зерна			
		пропаривание	пропаривание и ИК-обработка	пропаривание и микронизация	
		содержание декстринов в зерне, %		содержание декстринов в пропаренном и облученном зерне, %	содержание декстринов в хлопьях, %
3	16,4	1,8	12,8	6,2	7,4
5	19,6	2,4	14,4	7,2	8,6
7	20,6	2,4	15,8	8,5	9,8
10	24,8	2,7	17,3	9,8	10,2
15	29,4	2,8	17,7	10,2	10,4
20	35,1	3,0	18,1	10,4	10,6

Исследуя процесс плющения облученного зерна, можно отметить, что эффективность плющения возрастает при уменьшении влажности ячменя, обработанного паром. Очевидно, при длительности пропаривания до 10 мин и последующем быстром облучении в зерне еще сохраняются внутренние напряжения, вызванные пропариванием и быстрым нагревом зерна ИК-лучами, которые при плющении приводят к разрыву оболочек крахмальных гранул, деструкции макромолекул крахмала, а следовательно, и к повышению степени его декстринизации. Более длительное пропаривание с последующим облучением приводит к снятию внутренних напряжений, что характеризуется незначительным увеличением количества декстринов в хлопьях по сравнению с облученным зерном.

Следовательно, для достижения максимальной степени декстринизации крахмала перед ИК-обработкой следует пропаривать зерно до влажности 25 %, а перед микронизацией – до 21 %. При избранных нами условиях указанная влажность достигается при длительности обработки зерна паром в течение 10 и 7 мин соответственно.

Длительность облучения зерна влажностью 25 % в процессе ИК-обработки составляет 5 мин, а зерна влажностью 21 % в процессе микронизации – 60 с.

Влияние режимов ИК-нагрева зерна ячменя на содержание в нем декстринов

Образец ячменя	Режимы ИК-нагрева		Влажность зерна до ИК-нагрева, %	Содержание декстринов в зерне, %
	плотность падающего потока, кВт/м ²	длительность облучения, мин		
Исходный	-	-	12,7	1,1
ИК-обработанный с исходной влажностью	16,3	4,0	12,7	9,3
Увлажненный и ИК-обработанный	16,3	5,0	30,2	12,8
Пропаренный и ИК-обработанный	16,3	5,0	25,0	17,3
Микронизированный (хлопья)	28,0	0,8	12,7	6,2
Увлажненный и микронизированный (хлопья)	28,0	1,0	30,2	8,1
Пропаренный и микронизированный	28,0	1,0	21,0	10,2

7.10. Влияние ИК-нагрева зерна ячменя на переваримость крахмала (in vitro)

Одним из показателей, определяющих биологическую ценность зернового сырья, является доступность основных питательных веществ воздействию пищеварительных ферментов.

ИК-нагрев вызывает глубокие изменения углеводного комплекса ячменя и, в первую очередь, крахмала, что, безусловно, отражается на его переваримости. Поэтому для полной характеристики питательной ценности обрабатываемого зерна ячменя определена атакуемость крахмала амилолитическими ферментами (in vitro), так как количество образовавшейся при ферментативном гидролизе глюкозы косвенно характеризует эффективность использования корма.

ИК-нагрев зерна приводит к увеличению атакуемости крахмала глюкоамилазой (рис. 7.21). Количество образовавшейся при ферментативном гидролизе глюкозы возрастает во всех исследуемых образцах ячменя. Так, через 5 ч инкубирования в исходном образце зерна образовалось 8 % глюкозы, а в образце поджаренном – 22 %.

Наилучшие результаты по переваримости крахмала получены при поджаривании пропаренного ячменя. В этом случае количество образовавшейся

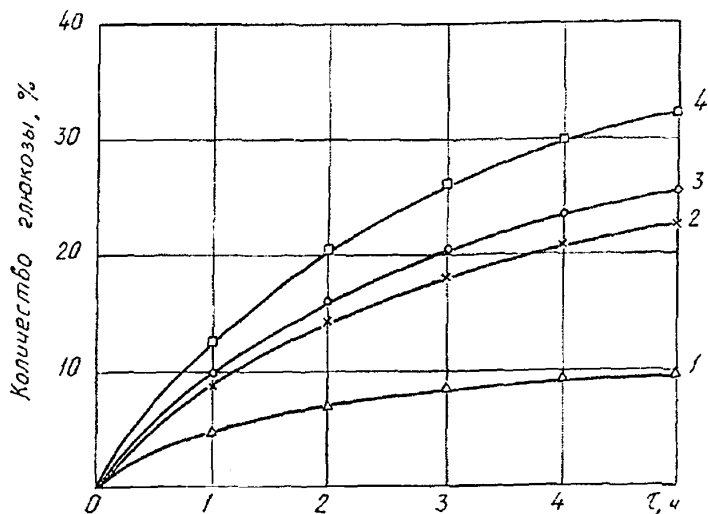


Рис. 7.21. Кинетика переваримости крахмала зерна ячменя при различной обработке:

1 – исходный образец; 2 – ИК-обработанный; 3 – увлажненный и ИК-обработанный; 4 – пропаренный и ИК-обработанный

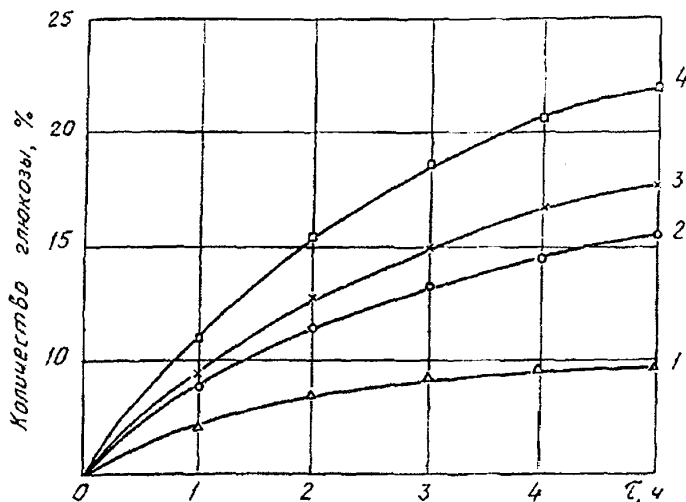


Рис. 7.22. Кинетика переваримости крахмала зерна ячменя при различной обработке.

1 – исходный образец; 2 – микронизированный; 3 – увлажненный и микронизированный; 4 – пропаренный и микронизированный

глюкозы через 5 ч инкубирования составило 31%, что в 3,8 раза больше, чем для исходного зерна.

В хлопьях, полученных в процессе микронизации, атакуемость крахмала амилолитическими ферментами несколько меньше, чем в поджаренном зерне (рис. 7.22). Переваримость хлопьев, полученных из микронизированного зерна исходной влажностью 12,7 %, возросла в 1,9 раза по сравнению с исходным зерном. Предварительное увлажнение зерна перед микронизацией способствует незначительному увеличению переваримости крахмала.

Наибольшее количество глюкозы образуется в хлопьях из пропаренного и микронизированного ячменя. В этом случае атакуемость крахмала возросла в 2,7 раза по сравнению с исходным зерном. Улучшение переваримости крахмала обработанного зерна можно объяснить его декстринизацией.

7.11. Влияние ИК-нагрева на изменение содержания восстанавливающих сахаров в зерне ячменя

В литературе данные об изменении восстанавливающих сахаров в зерне касаются лишь изучения изменения восстанавливающих сахаров в зерне при гидротермической обработке [90, 112, 200]. Однако единое мнение по этому вопросу отсутствует. В одних работах гидротермическая обработка зерна приводит к уменьшению в нем содержания восстанавливающих сахаров, в других – к увеличению. Поэтому необходимо было исследовать изменение восстанавливающих сахаров при ИК-нагреве ячменя.

В таблице 7.10 показано изменение содержания восстанавливающих сахаров в зерне ячменя при различных способах его обработки.

Таблица 7.10

Изменение содержания восстанавливающих сахаров в зерне ячменя при различных способах его обработки

Образец ячменя	Содержание восстанавливающих сахаров, %
Исходный	0,37
Увлажненный	0,36
Пропаренный	0,33
ИК-обработанный	0,31
Увлажненный и ИК-обработанный	0,30
Пропаренный и ИК-обработанный	0,26
Микронизированный (хлопья)	0,36
Увлажненный и микронизированный (хлопья)	0,36
Пропаренный и микронизированный (хлопья)	0,32

Анализ данных таблицы показывает, что содержание восстанавливающих сахаров в увлажненном ячмене практически не изменяется, в отличие от пропаренного зерна, где их количество снижается на 11 % по сравнению с содержанием сахаров в исходном зерне. При ИК-обработке ячменя происходит дальнейшее уменьшение количества восстанавливающих сахаров на 16,3 %.

Наиболее значительно количество восстанавливающих сахаров снижается при ИК-обработке пропаренного ячменя. При этом способе обработки количество восстанавливающих сахаров на 30 % ниже, чем в исходном зерне. Это, по-видимому, связано с протеканием реакции Майяра, при которой восстанавливающие сахара под воздействием высокой температуры и обезвоживания взаимодействуют с аминокислотами. Потемнение цвета продукта также подтверждает прохождение этой реакции [101, 102].

Микронизация зерна исходной влажности и увлажненного не оказывает заметного влияния на количество восстанавливающих сахаров, и лишь в хлопьях из пропаренного и микронизированного зерна наблюдается небольшое их снижение.

7.12. Изменение белкового комплекса зерна ячменя при ИК-нагреве

Белки являются важнейшим питательным веществом для человека и животных. В процессе тепловой обработки белка растительного происхождения претерпевают существенные изменения. Глубина изменений определяется природными свойствами белковых веществ, характером внешних воздействий, концентрацией белков и другими факторами.

Изменение белковых веществ зерновых культур в процессе тепловой обработки вызывает изменение структурно-механических свойств зерна, его органолептических показателей и питательной ценности.

В таблице 7.11 показано влияние ИК-нагрева на фракционный состав белков ячменя.

Анализ полученных результатов показывает, что различные способы обработки ячменя практически не изменяют содержания общего азота в зерне. Незначительное снижение общего азота происходит лишь под воздействием самого жесткого режима обработки – пропаривания с последующей ИК-обработкой.

Мало изменяя общую сумму азотистых веществ, ИК-излучение значительно влияет на их состав, приводя к существенным изменениям в соотношении белковых фракций.

Наиболее чувствительными к ИК-нагреву являются водо- и солерастворимые фракции белка. Так, в ИК-обработанном ячмене их содержание уменьшилось соответственно на 55,3 и 37,5 % по сравнению с их содержанием в

Таблица 7.11

Влияние ИК-нагрева на фракционный состав белков ячменя

Образец ячменя	Содержание общего азота, %	Фракционный состав белка, % к общему азоту				Белки не- раствори- мого остат- ка, %
		альбу- миды	глобу- лины	прола- мины	глюте- лины	
Исходный	2,27	8,49	7,26	23,74	45,32	15,19
Увлажненный	2,27	8,54	7,13	23,20	45,27	15,16
Пропаренный	2,20	2,76	4,21	20,56	43,76	25,10
ИК-обработанный	2,25	3,80	4,54	12,63	48,88	30,15
Увлажненный и ИК-об- работанный	2,24	2,87	4,26	9,43	47,43	36,01
Пропаренный и ИК-об- работанный	2,12	1,37	2,16	6,00	48,30	38,57
Микронизированный (хлопья)	2,26	5,15	5,62	19,34	45,90	23,99
Увлажненный и микро- низированный (хлопья)	2,26	5,37	5,48	18,80	44,10	25,14
Пропаренный и микро- низированный (хлопья)	2,24	2,42	4,23	17,12	46,76	28,47

исходном зерне. Подобная картина наблюдается и при микронизации зерна, но в этом случае содержание альбуминов и глобулинов в зерне уменьшается в меньшей мере (на 39,4 и 22,6 % соответственно).

Высокую лабильность проявляют проламины, количество которых в поджаренном ячмене уменьшается на 46,8 %, а в микронизированном – на 18,6 % по сравнению с их содержанием в исходном зерне. Однако в облученном зерне содержание щелочерастворимой фракции белка увеличивается, и чем длительнее воздействие тепла, тем значительнее увеличение глютелинов. Увеличение количества щелочерастворимой фракции белка можно объяснить за счет частичного растворения в щелочи слабо денатурированных и не полностью выделенных водо- и солерастворимых белков.

Предварительное увлажнение ячменя перед ИК-нагревом, как и следовало ожидать, не влияет на общую направленность изменения фракционного состава белков, наблюдающуюся при ИК-нагреве зерна исходной влажности.

Терморadiационный нагрев пропаренного зерна приводит к более резкому снижению количества водо-, соле- и спирторастворимых фракций белка. Уменьшение содержания альбуминов, глобулинов и проламинов в пропаренном с последующей ИК-обработкой ячмене по отношению к исходному составу составило соответственно 6,2; 3,4 и 3,9 раза, а в пропаренном и микронизированном – 3,5; 1,7 и 1,4 раза.

Потеря белком растворимости говорит о его денатурационных изменениях, степень которых возрастает с повышением жесткости режима обработки.

При оценке качества белков растительного происхождения обычно учитывают количество входящих в их состав аминокислот, а также их биологическую ценность, обусловленную содержанием в белке незаменимых аминокислот.

В таблицах 7.12 и 7.13 показано изменение аминокислотного состава белков микронизированного и ИК-обработанного ячменя.

Таблица 7.12

Изменение аминокислотного состава белков микронизированного ячменя

В % на сухое вещество

Аминокислоты	Образец ячменя				
	исходный	микронизированный		пропаренный и микронизированный	
		Содержание	Содержание	Изменение к исходному	Содержание
Лизин	3,85	3,24	- 8,4	3,02	- 21,6
Гистидин	1,99	1,27	- 6,4	1,70	- 14,8
Аргинин	4,27	3,76	- 8,8	3,64	- 14,8
Аспарагиновая кислота	12,05	9,76	- 8,1	8,49	- 29,6
Треонин	6,09	5,91	- 9,7	4,44	- 27,1
Серин	6,51	6,07	- 9,3	5,49	- 15,7
Глютаминовая кислота	39,55	39,69	+ 1,0	34,74	- 12,2
Пролин	23,43	20,24	- 8,7	23,34	- 4,5
Глицин	7,88	7,87	- 0,1	7,04	- 10,7
Аланин	7,32	7,23	- 7,3	6,50	- 11,3
Цистин	7,02	7,19	- 2,4	5,81	- 17,3
Валин	6,92	6,86	- 9,1	6,72	- 3,9
Метионин	2,62	2,36	- 9,0	2,21	- 15,7
Изолейцин	4,83	4,72	- 9,8	3,86	- 20,1
Лейцин	12,49	10,13	- 8,1	10,59	- 15,3
Тирозин	3,29	3,09	- 9,4	3,16	- 1,4
Фенилаланин	6,00	6,05	+ 1,0	5,46	- 1,0
Триптофан	1,30	1,17	- 9,0	0,95	- 27,0

Таблица 7.13

Изменение азотинокислотного состава белков ИК-обработанного ячменя

В % на сухое вещество

Аминокислоты	Образцы ячменя						
	исходный	пропаренный		ИК-обработанный		пропаренный и ИК-обработанный	
		Содержание	Содержание	Изменение к исходному	Содержание	Изменение к исходному	Содержание
Лизин	3,85	3,18	- 11,5	2,99	- 22,4	3,15	- 15,6
Гистидин	1,99	1,79	- 10,2	1,12	- 43,7	1,77	- 16,1
Аргинин	4,27	4,74	+ 10,0	3,49	- 18,3	3,55	- 12,2
Аспарагиновая кислота	12,05	10,03	- 16,8	8,10	- 32,8	10,95	- 9,1
Треонин	6,09	5,06	- 16,9	4,07	- 33,2	5,82	- 4,4
Серин	6,51	6,04	- 7,4	4,71	- 27,7	4,93	- 24,3
Глютаминовая кислота	39,55	37,51	- 5,2	36,07	- 8,8	31,97	- 19,2
Пролин	24,43	26,81	+ 8,9	20,33	- 6,8	19,67	- 8,1
Глицин	7,88	7,48	- 5,1	6,81	- 13,6	6,61	- 16,2
Аланин	7,32	7,99	+ 8,4	6,24	- 14,8	4,96	- 33,3
Цистин	7,02	6,15	- 12,4	7,03	+ 0,2	6,42	- 8,5
Валин	6,92	6,58	- 5,0	7,06	+ 2,0	6,86	- 1,0
Метионин	2,62	2,63	+ 0,4	2,24	- 14,6	2,42	- 1,6
Изолейцин	4,83	4,78	- 1,1	4,20	- 13,1	2,94	- 39,2
Лейцин	12,49	12,24	- 2,1	11,51	- 7,9	8,95	- 28,4
Фенилаланин	6,00	5,47	- 8,9	6,00	0,0	5,45	- 3,2
Тирозин	3,29	3,70	+ 11,1	2,81	- 14,6	2,62	- 20,4
Триптофан	1,30	1,01	- 22,4	0,92	- 29,3	0,90	- 30,8

Исследования показали, что микронизация исходного зерна существенно не влияет на изменение содержания аминокислот белка. При пропаривании ячменя с последующей его микронизацией количественное изменение аминокислот более значительно, чем при микронизации исходного зерна. Содержание большинства аминокислот при этом способе обработки снижается от 1,6 до 17,3 %.

Существенное изменение наблюдается только в содержании лизина, гистидина, треонина, аспарагиновой кислоты и триптофана. Их содержание уменьшается на 21,6; 44,8; 27,1; 29,6 и 27 % соответственно.

Приведенные в таблице 7.13 данные показывают, что изменение аминокислотного состава при ИК-обработке ячменя происходит в значительно большей степени, чем при микронизации зерна исходной влажности или предва-

рительно пропаренного. Особенно влияет поджаривание ячменя на такие незаменимые аминокислоты, как лизин, триптофан, треонин, содержание которых уменьшается на 22,4; 29,3 и 33,2 % соответственно по сравнению с их содержанием в исходном зерне.

Из других аминокислот наиболее лабильными при этом способе обработки являются серин, гистидин, аргинин и аспарагиновая кислота, количество которых изменяется на 27,7; 43,7; 18,3 и 32,8 % соответственно по сравнению с исходным образцом зерна.

В пропаренном и ИК-обработанном ячмене содержание аминокислот снижается еще более значительно, чем в поджаренном. При этом способе обработки содержание большинства аминокислот снизилось на 16,2–46,2 % и только количество пролина, валина и фенилаланина уменьшилось незначительно – на 8,1; 1,0 и 9,2 % соответственно.

Таким образом, можно сделать вывод, что процесс микронизации ячменя существенно не влияет на изменение содержания свободных аминокислот. Поджаривание зерна и пропаривание с последующим поджариванием приводят к значительному снижению их количества.

Такое изменение аминокислотного состава белка ячменя под воздействием терморadiационной обработки, вероятно, объясняется реакцией взаимодействия аминокислот с восстанавливающими сахарами, что подтверждается нашим изучением изменения восстанавливающих сахаров при исследуемых способах обработки зерна. По данным Е. Л. Кретовича [102], в результате данных реакций происходит разложение аминокислоты с образованием соответствующего альдегида, аммиака и углекислого газа.

Часть потерь аминокислот можно объяснить их тепловой декструкцией в условиях высокой температуры, а также специфическими особенностями ИК-излучения. Возможны потери аминокислот и за счет образования сложных комплексов белков с углеводами и легкоокисляющимися липидами.

Результаты, полученные при изучении аминокислотного состава увлажненного зерна и зерна увлажненного с последующим ИК-нагревом, аналогичны результатам, полученным для зерна исходной влажности. Расхождения находятся в пределах ошибки опыта.

Следовательно, ИК-нагрев вызывает глубокие изменения белкового комплекса ячменя. Однако изучение изменения растворимости белков и содержания в них аминокислот позволяет сделать лишь косвенный вывод об изменении питательной ценности обработанного зерна. Поэтому определена атакуемость белков пищеварительным ферментом-пепсином. За основу оценки был взят коэффициент переваримости белка, который представляет собой отношение переваримого белка к исходному количеству его в ячмене.

*Изменение коэффициента переваримости белка
в результате ИК-обработки ячменя*

Образец ячменя	Влаж- ность, %	Длитель- ность об- лучения, мин	Содержание белка, %		Кoeffици- ент пере- варимости белка, %
			общее (N ₀₆ x 5,7)	перевари- мого	
Исходный	12,7	-	12,95	10,15	78,3
Увлажненный	30,2	-	12,97	10,21	78,7
Пропаренный	24,8	-	12,90	10,00	77,5
ИК-обработанный	3,2	1	12,88	10,06	78,1
		2	12,91	9,98	77,3
		3	12,79	9,72	75,9
		4	12,82	9,66	74,4
		5	12,92	10,11	78,2
Увлажненный и ИК-об- работанный	4,6	1	12,92	10,11	78,2
		2	12,89	9,86	76,7
		3	12,86	9,81	76,2
		4	12,78	9,89	75,8
		5	12,80	9,57	74,7
Пропаренный и ИК-об- работанный	4,1	1	12,87	9,90	76,9
		2	12,80	9,74	76,0
		3	12,73	9,51	74,7
		4	12,75	9,23	73,4
		5	12,69	8,93	71,3

Определено (табл. 7.14), что при увлажнении, пропаривании и ИК-обработке зерна коэффициент переваримости белка практически не снижается.

В пропаренном образце зерна с последующей его ИК-обработкой в течение 5 мин коэффициент переваримости белка снижается на 9 % по сравнению с его значением в исходном образце зерна. По мнению ряда авторов [214, 215], это может быть следствием образования продуктов сахароаминных реакций, устойчивых и к ферментативному гидролизу. Не исключена и модификация пептидных цепей различными веществами, в результате чего белковый комплекс не атакуется протеазами.

Исследование ферментативной атакуемости белка образцов микронизированного ячменя показало, что коэффициент переваримости белка не снижается как в пропаренном и микронизированном, так и в микронизированном зерне исходной влажности или же предварительно.

Изменение коэффициента переваримости белка при микронизации ячменя

Образец ячменя	Влаж- ность, %	Длитель- ность об- лучения, мин	Содержание белка, %		Кoeffици- ент перева- римости белка, %
			общее (N _{об} x 5,7)	перевари- мого	
Исходный	12,7	-	12,85	10,19	79,92
Увлажненный	30,8	-	12,88	10,23	79,42
Пропаренный	24,8	-	12,76	10,08	78,90
Микронизированный (хлопья)	7,4	50	12,92	10,21	79,02
Увлажненный и микро- низированный (хлопья)	8,9	60	12,81	10,07	78,61
Пропаренный и микро- низированный (хлопья)	8,5	60	12,82	10,02	78,10

7.13. Влияние ИК-нагрева на изменение физико-химических свойств зерна ячменя

В процессе ИК-нагрева зерна его физико-механические свойства существенно изменяются. Конечная влажность поджаренного зерна уменьшается до 3,2 %, а микронизированного (хлопья) – до 7,3 % (таблица 7.16). В увлажненном и пропаренном ячмене с последующей его ИК-обработкой или микронизацией конечная влажность обработанного зерна выше, чем ИК-обработанного или микронизированного зерна исходной влажности, за счет более высокой начальной влажности зерна, и составляет 4,0–4,4 и 8,3–8,8 % соответственно.

При терморadiационной обработке зерно вспучивается и растрескивается, что, безусловно, приводит к изменению объемной массы готового продукта. При ИК-обработке зерна значения ее снижаются до 320–380 г/л, а микронизированных хлопьев даже до 230–235 г/л, что характеризует их как легковесный продукт.

При ИК-обработке ячменя как исходной влажности, так и увлажненного и пропаренного сыпучесть зерна снижается в 1,4–1,5 раза по сравнению с исходным образцом. При определении сыпучести хлопьев продукт не истек из отверстия прибора ВНИИ КП, при этом угол естественного откоса составлял 52–53°, что характеризует продукт как трудносыпучий.

В результате ИК-нагрева зерна сорбционная способность его изменяется. Гигроскопичность ИК-обработанного ячменя увеличивается в 1,6 раза, а хлопьев в 1,3 раза по сравнению с исходным зерном. Гигроскопичность пропаренного и ИК-обработанного зерна ячменя увеличивается еще более и со-

*Изменение физико-механических свойств ячменя
при различных способах ИК-обработки*

Образец ячменя	Начальная влажность, %	Конечная влажность, %	Объемная масса, г/л	Скорость сорбции водяных паров, г/см ²	Прочность, кг	Сыпучесть, г/см ² .с	Угол естественного откоса, град.
Исходный	12,7	-	673	1,45	14,8	32,7	33
Увлажненный	12,7	29,4	665	-	-	30,0	34
Пропаренный	12,7	25,8	630	-	-	29,3	36
ИК-обработанный	12,7	3,2	380	2,37	4,9	23,2	37
Увлажненный и ИК-обработанный	29,4	4,4	347	2,36	4,5	23,0	37
Пропаренный и ИК-обработанный	25,8	4,0	320	2,50	3,2	21,0	39
Микронизированный (хлопья)	12,7	7,3	230	1,85	-	-	52
Увлажненный и микронизированный (хлопья)	29,4	8,8	235	1,88	-	-	52
Пропаренный и микронизированный (хлопья)	22,8	8,3	232	1,88	-	-	53

ставляет 2,5 г/см². Увеличение сорбционной способности зерна приводит к повышению смачиваемости его слюной и набухаемости в желудке животного, что положительно сказывается на усвояемости корма.

В результате ИК-обработки прочность ячменя снижается в 3–4,6 раза по сравнению с исходным образцом. Это является положительным фактором, вызывающим снижение энергозатрат при измельчении.

Таким образом, в результате ИК-нагрева влажность, объемная масса, прочностные свойства и сыпучесть зерна резко снижаются, а влагосорбционная способность его увеличивается. Хлопья, полученные в результате микронизации зерна, являются трудносыпучим продуктом.

7.14. Влияние ИК-нагрева на микроструктуру зерна ячменя

В процессе ИК-нагрева микроструктура эндосперма ячменя претерпевает значительные изменения. При ИК-обработке зерна в течение 1 мин крахмальные гранулы увеличиваются в объеме, на их поверхности образуются углубления – ямки, первоначальная форма гранул значительно изменяется. Белок при-



Рис. 7.23. Эндосперм зерна после микронизации

обретает тягучую консистенцию. На микрофотографии (рис. 7.23) отчетливо видны резиноподобные тяжи, что объясняется денатурацией белка.

При увеличении продолжительности нагрева зерна ИК-лучами крахмальные гранулы постепенно и значительно увеличиваются в размере. При этом на отдельных гранулах отчетливо видны трещины (рис. 7.24), причем наибольшему разрушению подвергаются крахмальные гранулы сильно вспученных зерен ячменя.

Более интенсивный нагрев зерна ячменя (микронизация) приводит к быстрому вспучиванию и разрыву крахмальных гранул, вследствие чего они приобретают бутонообразный вид, при этом значительно увеличиваясь в размерах (рис. 7.23). Такое изменение крахмальных гранул можно объяснить воздействием значительных градиентов температуры и влагосодержания. Определенная роль при взрывании крахмальной гранулы принадлежит к информационным изменениям полисахаридных цепей амилозы. Их быстрое "развертывание" приводит к резкому увеличению объема крахмальных гранул. Этим, по-видимому, можно объяснить процесс деструкции полимера и увеличению степени декстринизации крахмала.

В процессе ИК-нагрева зерна заметное изменение алейроновых зерен происходит уже через 50 с облучения (микронизация). При этой длительности воздействия ИК-лучей на зерно ячменя алейроновые зерна в результате денатурации белков "ошлавляются" (рис. 7.24), а при обработке в течение 4 мин они превращаются в губчатую массу (рис. 7.25). Наблюдается наруше-



Рис. 7.24. Изменение микроструктуры эндосперма зерна ячменя при микролизации – периферийная часть

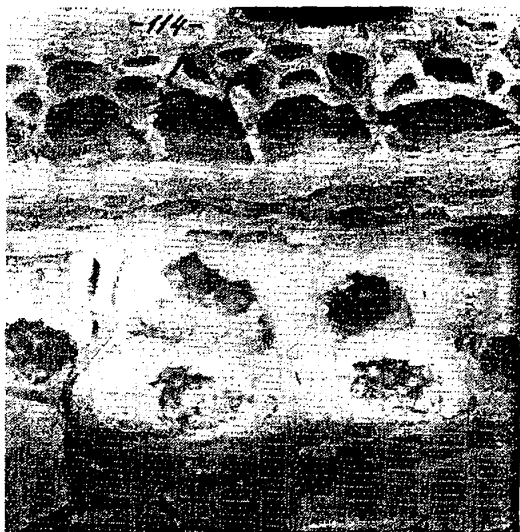


Рис. 7.25. Алейроновый слой микролизованного зерна ячменя. ($\times 1000$)

ние связи содержимого клеток алейронового слоя с их стенками. Толщина стенок увеличивается, и они разрываются.

Таким образом, установлено существенное отличие между исходным и обработанным ИК-лучами зерном как в микроструктуре крахмалистой части эндосперма, так и в микроструктуре алейронового слоя. Этим могут быть обусловлены наблюдаемые различия физико-химических свойств зерна.

7.15. Влияние ИК-нагрева на санитарное состояние зерна ячменя

Зерновое сырье, используемое для производства комбикормов, как правило, обсеменено различными микроскопическими грибами. Обсеменение зерна грибами происходит уже при уборке, а их развитие при хранении зерна.

Виды грибов *Fasarium*, *Aspergillus*, *Penicillium* и др. не только снижают питательную ценность зерна, используя его как субстрат для своего роста и развития, но и способны накапливать продукты метаболизма, весьма токсичные для организма животных. Особенно токсичными являются вещества, выделяемые *Aspergillus flavus*, так называемые афлатоксины. Афлатоксин В₁ устойчив к действию температуры, применяемой при приготовлении пищи или тепловой обработке при домашнем или промышленном консервировании.

Одним из путей инактивации жизнедеятельности грибов и продуктов их метаболизма является тепловая обработка, к одному из способов которой относится и ИК-нагрев зерна.

Результаты, представленные в таблице 7.17, показывают, что при поджаривании зерна в неподвижном слое поверхностная микрофлора ячменя практически уничтожается через 30 с, а глубинная – через 60 с облучения. При поджаривании и виброперемешиваемом слое поверхностная грибная флора зерна почти полностью погибает уже через 60 с. Глубинная микрофлора при обработке в течение 90 с оказалась уничтоженной на 75 %, а через 120 с – полностью.

При микронизации зерна поверхностная микрофлора ячменя погибает практически полностью. Обеззараживание зерна от глубинной микрофлоры составляет 90,5 % (таблица 7.18).

Таким образом, ИК-нагрев губительно действует на грибную микрофлору зерна ячменя. При поджаривании поверхностная микрофлора погибает через 6 с облучения, а глубинная – через 120 с.

Поверхность микронизированных хлопьев за 50 с облучения стерилизуется полностью и на 90,5 % обеззараживается от глубинной микрофлоры.

Таблица 7.17

Влияние ИК-нагрева на микрофлору зерна в процессе ИК-обработки

Образец ячменя	Продолжи- тельность облучения, с	Неподвижный слой				Микрофлора				Виброперемешивающийся слой	
		поверхностная		глубинная		поверхностная		глубинная		поражен- ное зерно, %	обеззара- жено, %
		кол-во грибов в 1 г, шт.	обеззара- жено, %	поражен- ное зерно, %	обеззара- жено, %	кол-во. грибов в 1 г, шт.	обеззара- жено, %	глубинная			
Исходный	-	11200	-	96	-	11200	-	96	-	нет	-
ИК-обработанный	15	650	94,2	15	84,4	1675	85,0	82	14,6	нет	100,0
	30	30	99,7	2	98,0	310	97,3	67	30,2	нет	100,0
	60	20	99,8	1	99,0	15	99,9	24	75,0	нет	100,0
	90	нет	100,0	нет	100,0	10	100,0	4	95,9	нет	100,0
	120	нет	100,0	нет	100,0	нет	100,0	нет	100,0	нет	100,0

Влияние ИК-нагрева на микрофлору зерна в процессе микроизации

Образец ячменя	Микофлора			
	поверхностная		глубинная	
	Количество грибов в 1 г, шт.	Обеззараже- но, %	Количество грибов в 1 г, шт.	Обеззараже- но, %
Исходный	10200	-	42	-
Микронизированный (хлопья)	нет	100	4	90,5

7.15.1. Влияние ИК-нагрева на токсичность зерна ячменя

Нагрев при ИК-обработке ячменя довольно эффективно снижает токсичность зерна, образовавшуюся в результате жизнедеятельности грибов. Так, если токсичность исходного зерна соответствует IV степени, то воздействие ИК-лучей в течение 30 с снизило токсичность до III степени, а за 120 с – до I степени (таблица 7.19).

Таблица 7.19

Изменение токсичности зерна при ИК-обработке

Продолжитель- ность обработки, с	Токсичность, степень	Содержание афлатоксина В ₁ , мкг/кг	Токсичность образца по афлатоксину В ₁
Ячмень исходный	Резко токсичная, IV	>1000	Очень высокая
30	Токсичная, III	50-250	Средняя
60	Слабо токсичная	<50	Слабая
90	Слабо токсичная, II	Нет	Нет
120	Очень слабо токсичная, I	Нет	Нет

Аналогичные изменения происходят с содержанием афлатоксина В₁. Так, если в искусственно зараженном зерне ячменя содержание афлатоксина В₁ превышало 1000 мкг/кг, то воздействие ИК-лучей в течение 30 с снизило его содержание до 50–250 мкг/кг, а длительность облучения свыше 90 с привела к полной инактивации афлатоксина В₁.

Следовательно, ИК-нагрев является эффективным способом обеззараживания зерна.

7.16. Испытания цеха микронизации на Новобелицком КХП Беларуси

По данным фирмы "Микронайзинг" зерновое сырье перед ИК-нагревом подвергается увлажнению водой до 17–18 % с последующей отлежкой в бункерах в течение 6–8 часов. После чего данное зерно обрабатывается в микронизаторе до температуры 90–96 °С и плющится на вальцевом станке с зазором между валками 0,3–0,5 мм. При этом производительность микронизатора в процессе обработки ячменя и пшеницы составляет 2 т/ч, кукурузы – 1,5 т/ч.

Как показали результаты испытаний оборудования, увлажнитель А1-БШУ-2 с частотой вращения ротора 800 об/мин и расходом воды 350–360 л/ч позволяет доводить за один проход исходную влажность ячменя и пшеницы, с последующей его отлежкой в течение 6 часов, до величины 17–18 % (рис. 7.26).

Влажность кукурузы за один проход увлажнителя не повышается до требуемого значения. Для увеличения влагосодержания этой культуры необходимо повторное увлажнение и отлежка.

Гидротермическая обработка зерна с исходной влажностью 12–13 % на модернизированном пропаривателе при расходе пара 150–180 кг/ч, давлении 0,2–0,35 МПа и максимальной продолжительности воздействия пара 3 мин позволяет повысить влажность ячменя и пшеницы на 3 %, кукурузы – на 2 % (рис. 7.27). Добиться оптимальной влажности зерна в пределах 17–18 % из-за конструктивных особенностей пропаривателя не представлялось возможным.

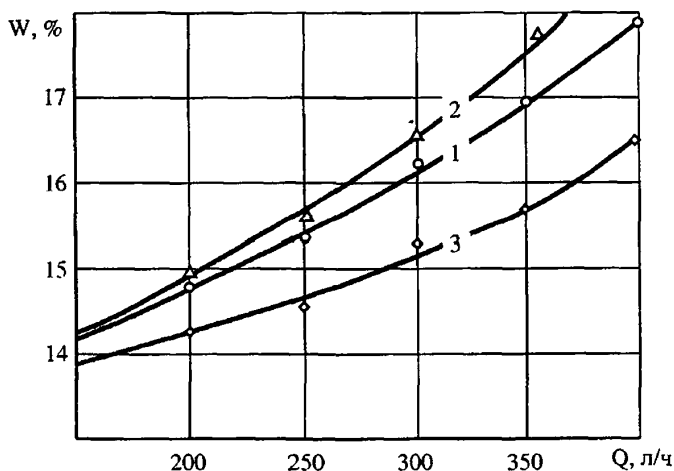


Рис 7.26. Изменение влажности ячменя от расхода воды при увлажнении на А1-БШУ-2. (Продолжительность отлежки 6 часов).
1 — ячмень; 2 — пшеница; 3 — кукуруза

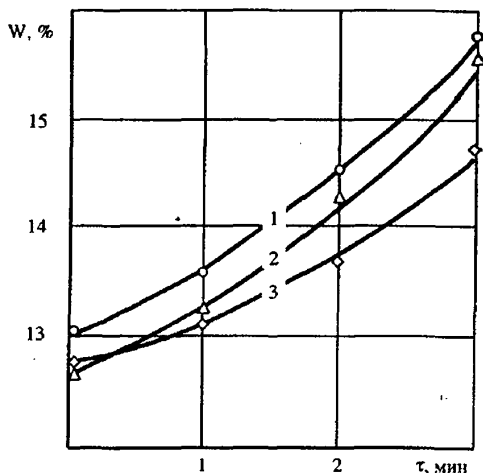


Рис 7.27. Изменение влажности ячменя от длительности пропаривания.
1 – ячмень; 2 – пшеница; 3 – кукуруза

Максимальная производительность микронизатора на рекомендуемых режимах получена при обработке сухого ячменя и составляла 1580 кг/ч. При обработке увлажненного зерна в пределах 1440–1460 кг/ч. Определены и другие технические показатели микронизатора, которые сведены в таблицу 7.20.

Степень декстринизации крахмала микронизированного зерна исходной влажности изменялась в пределах 5,6–7,5 %. В процессе обработки увлажненного зерна степень декстринизации повышается и составляет 12,3–14,9 %.

В процессе микронизации наблюдается снижение влажности исходного зерна по отношению к готовой продукции на 3,0–3,7 %. При этом в исходном зерне после обработки влаги меньше, чем в увлажненном. Однако во всех анализируемых образцах убыль влаги не превышала установленного фирмой ограничения – 4 %.

7.16.1. Процесс ИК-нагрева зерна на микронизаторе MikroRed

Процесс термообработки при микронизации зерна определяются совокупностью влияния на него различных режимных параметров, которые можно подразделить на три группы: I – параметры, определяющие режим термообработки; II – параметры, определяющие состояние и качество нагреваемого продукта; III – конструктивные параметры, определяющие влияние конструктивных размеров и особенностей микронизатора на процесс ИК-нагрева.

Критерием оценки процесса ИК-нагрева служили влажность и степень декстринизации крахмала обрабатываемого зерна.

*Технические и качественные показатели, полученные при испытаниях
микронизатора MikroRed*

Наименование показателей	Шелушенный ячмень		Пшеница	
	Исходной влажности	Увлажненный	Исходной влажности	Увлажненный
Производительность, кг/ч	1580±54	1460±43	1520±29	1443±30
Расход газа, м ³ /ч	26,4	26,4	26,4	26,4
Расход воздуха на горелке, м ³ /ч	220	220	220	220
Температура излучающей поверхности керамических насадок газовых горелок, °С	920±15	920±15	920±15	920±15
Средняя температура в зоне ИК-нагрева, °С	313±3	305±2	312±1	309±2
Температура воздуха в помещении, °С	25	28	26	26
Температура отходящих газов, °С	75±2	78±2	75±1	77±1
Длительность ИК-нагрева, с	86±2	90±2	84±3	91±1
Температура зерна, °С				
исходной влажности	24	-	24	-
увлажненного	-	20	-	21
Температура зерна после ИК-нагрева, °С				
исходной влажности	91±1	-	94±2	-
увлажненного	-	96,1	-	93,2
Температура зерна после плющения, °С				
исходной влажности	78±2	-	80±3	-
увлажненного	-	79,2	-	74,3
Температура зерна после охладителя, °С				
исходной влажности	30±1	-	30±1	-
увлажненного	-	32±1	-	28±2
Влажность зерна, %				
исходной влажности	13,0±0,3	-	12,5±0,5	-
увлажненного	-	17,1±0,8	-	17,7±0,7
Влажность хлопьев после микронизации, %				
исходной влажности	9,1±0,5	-	8,8±0,6	-
увлажненного	-	9,6±0,3	-	9,3±0,4
Степень декстринизации крахмала хлопьев из зерна, %				
исходной влажности	7,5±2,4	-	5,6±3,8	-
увлажненного	-	12,3±5,2	-	14,9±3,0

Конструктивные параметры микронизатора и плотность падающего потока излучения во всех опытах не изменились и отвечали паспортным данным.

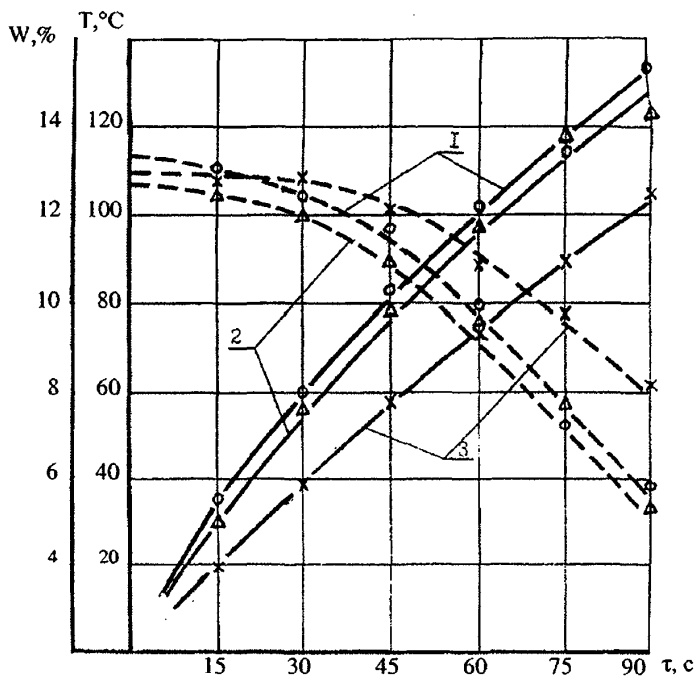


Рис. 7.28. Изменение температуры и влажности зерна от длительности обработки:

1 - шелушенный ячмень ($W = 13,2 \%$); 2 - пшеница ($W = 12,7 \%$);
3 - кукуруза ($W = 12,4 \%$);

----- кривые влажности; ————— кривые температуры

На рис. 7.28 и 7.29 показано изменение влагосодержания зерна исходной влажности от длительности обработки, производительности микронизатора и, соответственно, от температуры нагрева.

Определено, что процесс термообработки зерна ИК-лучами протекает в соответствии с закономерностями обезвоживания коллоидных капиллярно-пористых тел в два периода.

Первый период характеризуется небольшим снижением влажности и увеличением скорости влагоотдачи. При значительной интенсивности излучения и, как правило, малой толщине слоя зерна на вибрирующей платформе микронизатора начальная стадия прогрева продукта непродолжительна и протекает в течение 10–15 с. В дальнейшем, когда температура зерна повышается до 60 °C и выше, наблюдается интенсивное испарение влаги, что в силу небольшой термовлагопроводности зерна приводит к образованию внутри зерновки значительных градиентов влажности и температуры. Это вызывает об-

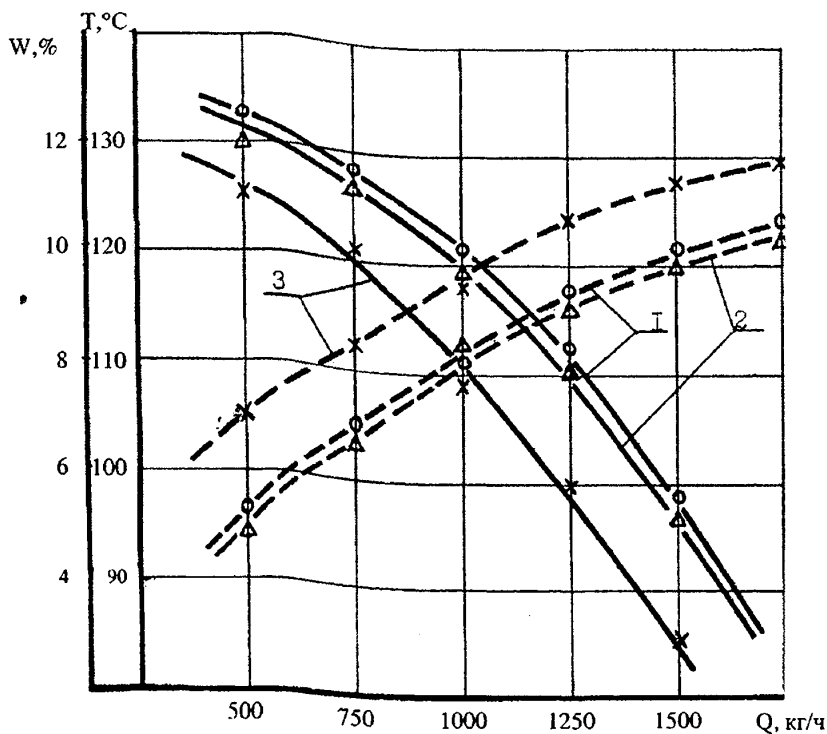


Рис. 7.29. Изменение температуры и влажности обработанного зерна от производительности микронизатора:

1 — шелушенный ячмень ($W = 13,2\%$); 2 — пшеница ($W = 12,7\%$);

3 — кукуруза ($W = 13,4\%$);

----- кривые влажности; ————— кривые температуры

разование микротрещин, что нарушает микроструктуру нагреваемого продукта, в частности, крахмальных гранул.

В этот период наблюдается линейная зависимость между влажностью и длительностью термообработки, т. е. наступает период постоянной скорости испарения влаги.

При нагреве зерна свыше $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ оно вспучивается, становится пластичным. В таком состоянии оно наиболее эффективно плющится.

Однако для различных зерновых культур длительность нагрева до $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ различна. Если для ячменя и пшеницы она составляет 55–60 с, то для кукурузы время нагрева возрастает до 80 с. Вызвано это большими размерами зерновок кукурузы. В то же время влажность кукурузы при данном значении температуры практически соответствует влажности ячменя и пшеницы.

Дальнейший нагрев зерна приводит к его растрескиванию и интенсивному испарению влаги. При уменьшении влажности ниже 8 %, когда температура зерна достигает 115–120 °С, продукт приобретает хрупкую структуру и при плющении крошится, что сказывается как на самом эффекте плющения, так и на товарном виде продукции. Кроме этого снижение влагосодержания приводит к убыли массы зерна и, соответственно, к удорожанию данного способа обработки.

Поэтому в дальнейших исследованиях влажность обрабатываемого зерна ограничивали до 8 %.

График показывает (рис. 7.30), что с увеличением влажности зерна, увлажненного водой, длительность процесса ИК-нагрева удлиняется. Так, если при нагреве ячменя с исходной влажностью 13,2 % до температуры 115–120 °С,

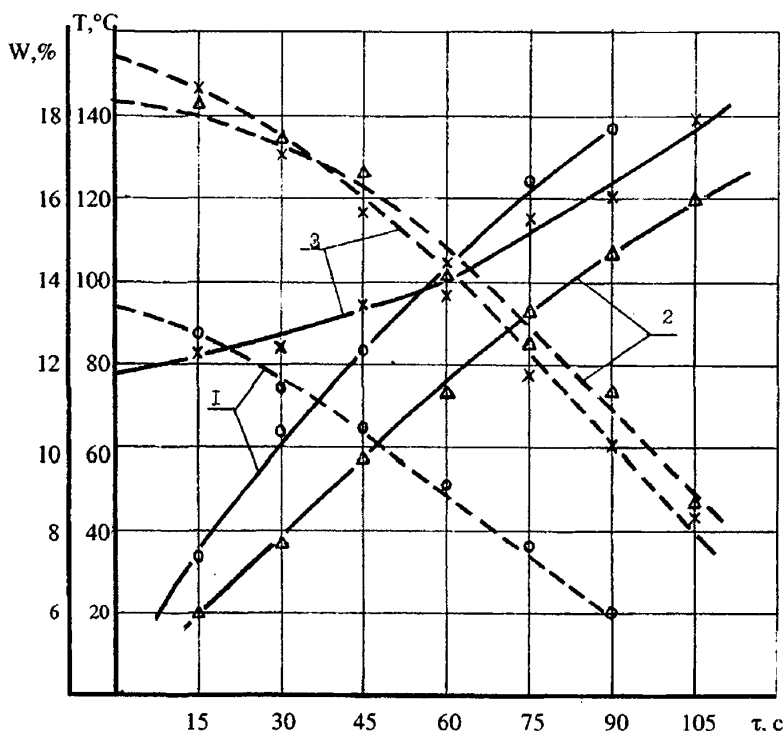


Рис. 7.30. Изменение температуры и влажности ячменя от длительности термообработки:

1 — шелушенный ячмень и сходной влажности ($W = 13,2 \%$);

2 — увлажненный ячмень ($W = 18,2 \%$); 3 — кукуруза ($W = 14,4 \%$);

----- кривые влажности; ————— кривые температуры

длительность облучения составляла 75 с, то для увлажненного ячменя влажностью 18–19 % до такой температуры воздействия терморрадиации увеличилось до 100 с.

Предварительное пропаривание зерна незначительно увеличивает длительность термообработки по отношению к зерну с исходной влажностью. Объясняется это тем, что температура пропаренного зерна перед микронизатором составляет уже 70–90 °С и поэтому на прогрев зерна требуется меньшее количество тепловой энергии.

7.16.2. Влияние влаго- и влаготепловой обработки зерна на процесс микронизации

На процесс микронизации оказывают влияние три технологических приема обработки зерна: увлажнение водой с последующим отволаживанием; пропаривание; совместное увлажнение и пропаривание зерна. Влажность зерна в опытах изменялась от 12 до 25 %. Увлажнение зерна без отволаживания не приводит к желаемым результатам. Для повышения эффективности микронизации увлажненного зерна необходимо какое-то время для перераспределения влаги по объему зерновки.

Определено, что наиболее оптимальная минимальная длительность отлежки ячменя, аналогично и для пшеницы, 6 часов. За это время, как показал визуальный осмотр поперечного разреза зерновок, влага достаточно равномерно распределяется по всему их объему. Кроме того, до данной продолжительности отволаживания наблюдается довольно интенсивный рост показателя степени декстринизации крахмала. Дальнейшее продолжение отволаживания не оказывает значительного влияния на деструкцию крахмала (рис. 7.31).

Анализируя полученные данные (рис. 7.32) и сопоставляя их с предельно допустимым значением влажности, можно заключить, что наиболее оптимальная производительность микронизатора при обработке зерна исходной влажностью 900–1000 т/ч. При этом степень декстринизации крахмала ячменя и пшеницы 9–10 %, кукурузы – 12–13 %.

Повышение содержания влаги в зерне оказывает влияние на деструкцию крахмала зерна в процессе микронизации. Установлено, что степень декстринизации зерна с увеличением влажности до 19 % растет интенсивно и достигает для ячменя и пшеницы 24–27 % (рис. 7.33, 7.34). При этом производительность микронизатора и температура нагрева зерна составили 800–900 кг/ч и 115–120 °С соответственно. Увлажнение зерна выше 19 % не оказывает заметного воздействия на деструкцию крахмала.

Показано, что увлажнитель А1-БШУ-2 не позволяет за один проход увлажнить кукурузу до 19 % и выше. Зерно исходной влажности максимально

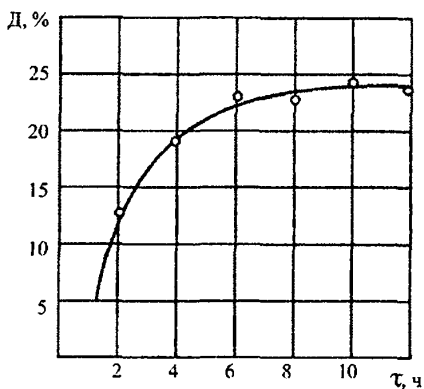


Рис. 7.31. Изменение степени декстринизации крахмала увлажненного ячменя при микронизации от продолжительности отлежки

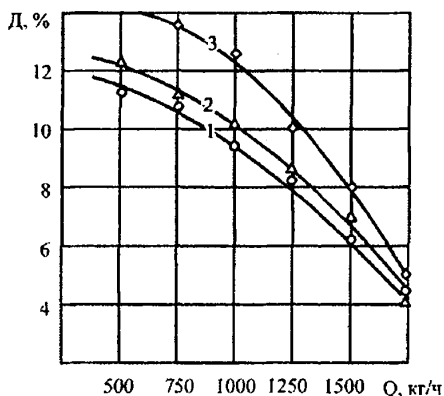


Рис. 7.32. Изменение степени декстринизации крахмала зерна от производительности микроизатора. 1 — овсяный ячмень ($W = 13,2\%$); 2 — тимофеевка ($W = 12,7\%$); 3 — кукуруза ($W = 13,4\%$)

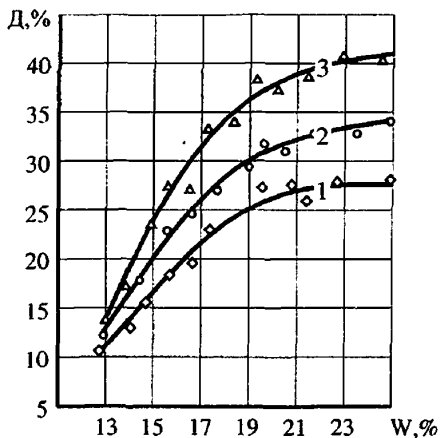


Рис. 7.33. Влияние влажности зерна на изменение степени декстринизации крахмала. 1 — увлажненное зерно; 2 — увлажненное и пропаренное зерно; 3 — пропаренное зерно

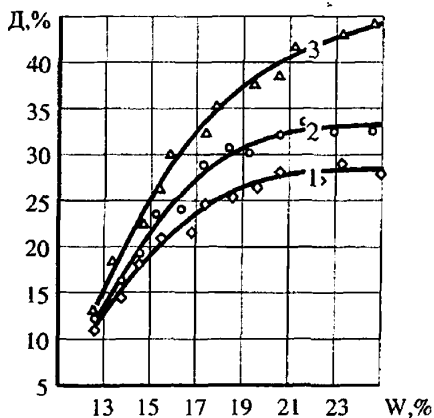


Рис. 7.34. Влияние влажности зерна на изменение степени декстринизации крахмала. 1 — увлажненное зерно; 2 — увлажненное и пропаренное зерно; 3 — пропаренное зерно

увлажняется до 16 %, что недостаточно для получения требуемой степени декстринизации крахмала. Поэтому увлажнение кукурузы проводили в два этапа. Сначала кукурузу увлажняли до 15–16 % и отволаживали в течение 4 часов, затем повторно увлажняли до влажности 17–25 % с последующей отлежкой до 2 ч.

Определено (рис. 7.34), что увлажнение кукурузы до 19 % является наиболее оптимальным режимом. Степень декстринизации крахмала микронизированной кукурузы с этой влажностью достигает более 30 %, что на 8–10 % выше, чем в ячмене и пшенице. Однако при термообработке кукурузы производительность микронизатора на 150–200 кг/ч ниже по отношению к производительности, полученной в процессе микронизации ячменя и пшеницы.

Предварительное пропаривание зерна при микронизации проводилось на модернизированном пропаривателе. Установлено, что при работе его в непрерывном режиме максимально увлажнить зерно с исходной влажностью 12–13 % можно на 3 %, предварительно увлажненное зерно до влажности 17–22 % – на 1,5 %. Достичь оптимальной влажности зерна с исходной влажностью в пределах 18–19 % при помощи пропаривателя не представлялось возможным. Поэтому проводили две серии опытов. В первой – зерно увлажняли водой до 16–17 %, отволаживали в течение 6 ч, а затем пропаривали. В этом случае достигали конечной влажности зерна – 18–19 %. Во второй серии пропаривание осуществляли в дискретном режиме работы пропаривателя. В этом случае после заполнения объема шнека пропаривателя продуктом отключали его привод от 3 до 15 мин и в течение этого времени проводили обработку продукта паром. Это позволяло доводить влажность пропаренного зерна до 25 %.

Показано (рис. 7.33–7.35), что пропаривание зерна значительно интенсифицирует процесс деструкции крахмала микронизированного зерна. Так, если в микронизированном ячмене и пшенице с исходной влажностью 12–13 % степень декстринизации составляла 8–10 %, то в этом зерне, прошедшем предварительное пропаривание до влажности 19–20% и микронизацию, данный показатель увеличился до 35–40 %, т.е. в 2,5 раза. В обработанной кукурузе степень декстринизации повышается до 50 % или в 3,4 раза.

Достигается данный показатель качества ячменя и пшеницы при температуре нагрева зерна – 115–120 °С, продолжительности обработки – 85–90 с, производительности микронизатора – 900–1000 кг/ч.

Для кукурузы эти показатели соответственно равны: 115–120 °С; 100–105 с, 700–800 кг/ч. Наряду с этим следует отметить, что пропаривается ячмень и пшеница до влажности 19 % в течение 10–12 мин, кукуруза – 15–16 мин.

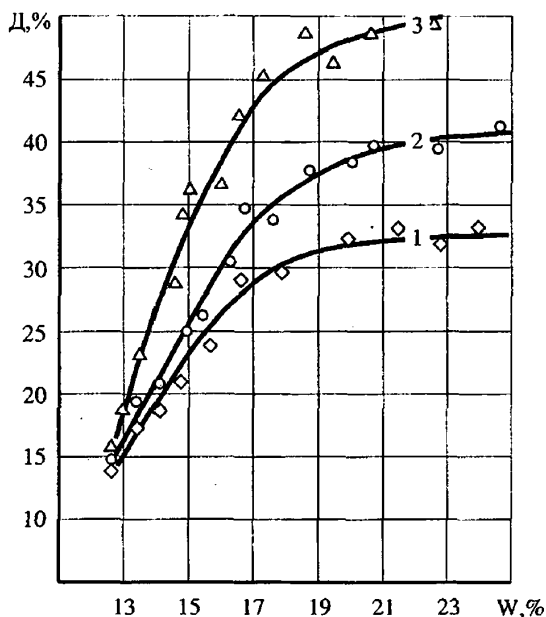


Рис. 7.35. Влияние влажности кукурузы на изменение степени декстринизации крахмала.

1 — увлажненное зерно; 2 — увлажненное и пропаренное зерно; 3 — пропаренное зерно

В зерне, прошедшем предварительное увлажнение и пропаривание, степень декстринизации крахмала была ниже, чем в пропаренном зерне и всего на 2–3 % была выше, чем в увлажненном.

Таким образом, на основании изучения ИК-нагрева и предварительной влаго- и влаготепловой обработке можно отметить, что наиболее эффективно проходит процесс микронизации пропаренного зерна до влажности 19 % с последующей термообработкой в течение 90–95 с до температуры 115–120 °С.

Исследуя влияние производительности микронизатора на качество зерна, прошедшего предварительную влагообработку, следует отметить, что с уменьшением производительности степень декстринизации крахмала повышается (рис. 7.36). Однако одновременно происходит интенсивное снижение влажности микронизированного зерна, а это приводит к убыли массы зерна. Наряду с этим, при влажности ниже 8 % микронизированное зерно теряет пластические свойства и в процессе плющения измельчается.

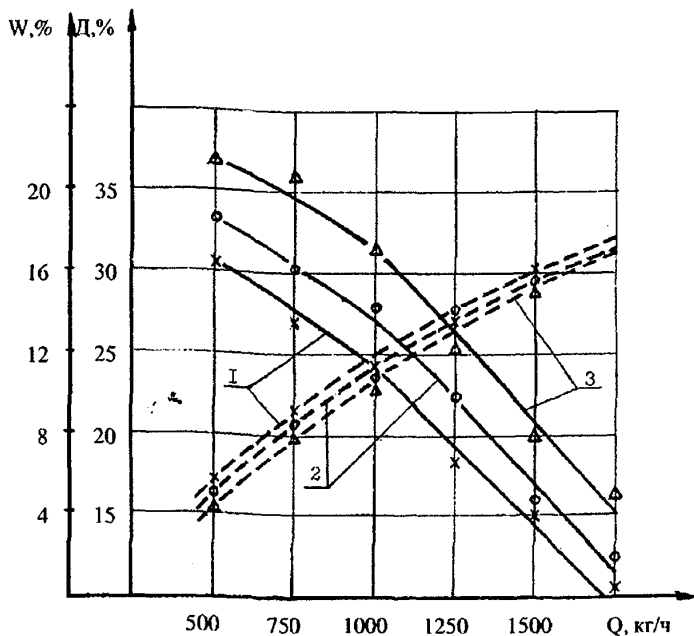


Рис. 7.36. Изменение влажности и степени декстринизации крахмала ячменя от производительности микроизатора:
 1 – увлажненный шелушенный ячмень ($W = 18,2\%$);
 2 – увлажненный и пропаренный ячмень ($W = 18,7\%$);
 1 – увлажненный шелушенный ячмень ($W = 19,4\%$)

Поэтому, анализируя полученные результаты исследований, пришли к выводу, что наиболее оптимальная производительность микроизатора при обработке пропаренного зерна 900–1000 кг/ч, увлажненного – 800–900 кг/ч.

Глава 8

ГИДРОТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ЗЕРНА МЕТОДОМ ПРОПАРИВАНИЯ

8.1. Основы теплообмена в слое зерна при пропаривании

При обработке зерна паром производится его нагрев и увлажнение. При этом происходит процесс конденсации пара и его охлаждение до некоторой температуры смеси. Конденсат используется как увлажнитель. Важной задачей при этом является определение температурных полей в увлажнительной камере, времени увлажнения дисперсных частиц. Это будет способствовать определению оптимальных размеров камеры, т. е. оптимальной скорости перемещения частиц, геометрических размеров камеры и его производительности.

Для получения математической модели процесса теплообмена в увлажнительной камере выбирается элементарная ячейка с абсолютно проницаемыми для компонентов стенками dx , dy , dz . Предполагается, что в элементарной ячейке объемом $dv = dx \times dy \times dz$ содержится одна частица, касающаяся поверхностями входных граней ячейки. При этом принимается, что объемная доля усредненной частицы в элементарной ячейке dv составляет β , доля пара $(1 - \beta)$, а доля конденсата, проникающая во внутреннюю структуру частицы, равна μ .

Изменение энергии в выделенной элементарной ячейке происходит в связи с притоком теплоты в процессе конденсации. Считая, что внутренние источники, стоки энергии и массы отсутствуют, перемешивание компонентов идеальное, скорости компонент постоянны, получим одномерную модель теплообмена в элементарной ячейке. Задача сводится к рассмотрению процесса конденсации пара на диспергированной струе одинаковых твердых частиц, перемещающихся по направлению OX . В плоскости YOZ температуры компоненты не изменяются ввиду идеальности перемешивания.

Процесс конденсации на диспергированной частице в элементарной частице ΔU можно представить в виде двух стадий [115]. Вначале происходит нагрев поверхности частицы от начальной температуры T_1 до температуры насыщения T_s . На второй стадии производится отвод теплоты от поверхности частицы внутрь. Скорость конденсации во второй стадии определяется термическим сопротивлением частицы. Первая неравновесная стадия процесса конденсации происходит почти мгновенно, т. е. происходит мгновенный нагрев поверхности холодной твердой частицы от T_1 до T_s . Процесс прогрева и

увлажнения диспергированной частицы определяются второй стадией конденсации.

С учетом упрощающих предположений уравнение энергии для жидкой и твердой компонент имеют вид [115]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial T_K}{\partial \tau} + V_K \frac{\partial T_K}{\partial x} = \frac{\lambda_K}{(1-\beta)\mu_K \rho_K C_{PK}} \frac{\partial^2 T_K}{\partial x^2}, \\ \frac{\partial T_T}{\partial \tau} + V_T \frac{\partial T_T}{\partial x} = \frac{\lambda_T}{\beta \rho_T C_{PT} + \mu_K (1-\beta) \rho_K C_{PK}} \frac{\partial^2 T_T}{\partial x^2}, \end{array} \right. \quad (8.1)$$

где T – температура,*
 λ – коэффициент теплопроводности;
 V – скорость компонента;
 τ – время;
 ρ – плотность;
 C – теплоемкость;
 β – объемная концентрация твердого компонента;
 μ_K – расходная концентрация жидкой фазы при увлажнении.
 Индексы K – конденсат, n – пар, T – твердая частица.

Краевые условия представим в форме:

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau = 0; T_T = T_{T0}; T_K = T_s, \\ x = 0; T_T = T_s; T_K = T_s, \\ \left(-\frac{\partial T_K}{\partial x} \right)_{нов} = \frac{r V_n \rho_n (1-\beta) \mu_K}{\lambda_K}, \end{array} \right. \quad (8.2)$$

где r – скрытая теплота парообразования,
 индексы: 0 – начальные условия,
 $нов$ – условия конденсации на поверхности частиц.

Система (8.1) и краевые условия (8.2) приводятся к безразмерному виду:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \theta_K}{\partial \tau} + V_K \frac{\partial \theta_K}{\partial \zeta} = b_K \frac{\partial^2 \theta_K}{\partial \zeta^2}, \\ \frac{\partial \theta_T}{\partial \tau} + V_T \frac{\partial \theta_T}{\partial \zeta} = b_T \frac{\partial^2 \theta_T}{\partial \zeta^2}. \end{array} \right. \quad (8.3)$$

Краевые условия:

$$\tau = 0; \theta_T = \theta_{T0}; \theta_K = 1;$$

$$\zeta = 0; \theta_K = \theta_T = \theta_{II} = 1;$$

$$\left(-\frac{d\theta_K}{d\zeta} \right)_{\text{nos}} = b_0. \quad (8.4)$$

где $\theta = T/T_s$ – безразмерная температура;
 $V = V t_0 / L$ – безразмерная скорость;
 Здесь: t_0 – время прогрева частицы до заданной температуры;
 L – длина увлажнительной камеры;
 $\zeta = x/l_0$ – безразмерная координата.

$$b_0 = \frac{r V_n \rho_n (1 - \beta) \mu_K t_0}{\lambda_K T_s}; \quad b_K = \frac{\lambda_K t_0}{(1 - \beta) \mu_K \rho_K C_{pK} t_0^2};$$

$$b_T = \frac{\lambda_T t_0}{[\beta \rho_T + \mu_K (1 - \beta) \rho_K] C_{pT} t_0^2},$$

здесь b_0, b_K, b_T – безразмерные комплексы;
 l_0 – размер частицы (радиус).

Систему (8.3) при краевых условиях (8.4) решали методом преобразования Лапласа. Решая систему линейных уравнений с правой частью для изображений, применяя теорему о свертке с учетом стандартных таблиц, переводящих изображения в оригиналы, получим

$$\theta_K = 1 - \frac{2b_0 \sqrt{b_K}}{V_K} \exp \left[\frac{V_K}{2b_K} \zeta \left(1 - \frac{V_K}{2} \tau \right) \right] \operatorname{erfc} \left(\frac{\zeta}{2\sqrt{b_K \tau}} \right) - \operatorname{erfc} \left(\frac{\zeta}{2\sqrt{b_K \tau}} - \frac{V_K}{2\sqrt{b_K}} \zeta \sqrt{\tau} \right), \quad (8.5)$$

$$\theta_T = \theta_{T0} + (1 - \theta_{T0}) \exp \left[\frac{V_T}{2b_T} \zeta \left(1 - \frac{V_T}{2} \tau \right) \right] \operatorname{erfc} \left(\frac{\zeta}{2\sqrt{b_T \tau}} \right),$$

где $\operatorname{erfc} [\varphi(\zeta \tau)] = 1 - \operatorname{erf} [\varphi_{\zeta \tau}]$

Здесь $\operatorname{erf} [\varphi_{\zeta \tau}]$ – функция ошибок (затабулирована).

Опытную проверку решения (8.5) проводили в увлажнительной камере (п. 8.2). В качестве диспергированного материала испытывался ячмень. В процессе эксперимента проводились замеры расходов пара, ячменя, оценивалась концентрация твердых частиц β_T , весовая концентрация влаги μ_n (влажность), скорость перемещения частиц, температура смеси.

Эксперименты и расчеты показали, что при перепаде температур $T_s - T_T = 100^\circ\text{C}$ время прогрева и увлажнения на $\mu_k = 25\%$ составило до 10 с, однако время увлажнения может быть сокращено до 3 с при вводе пара по всей длине камеры. Трансцендентно уравнение (8.5) неразрешимо в явном виде, поэтому точное решение возможно с применением ПЭВМ.

8.1.1. Нагрев и увлажнение зерна при пропаривании

При обработке зерна паром происходит его нагрев и увлажнение. Нагрев зерна осуществляется за счет конденсации пара, а также конвективной теплоотдачи парового потока. Пар конденсируется на поверхности зерен, поскольку температура их ниже температуры насыщения пара. Различают пленочную и капельную конденсацию. Коэффициент теплоотдачи при пленочной (на гидрофильной поверхности) конденсации водяного пара атмосферного давления достигает величин порядка $\alpha = 7 \cdot 10^3 - 12 \cdot 10^3 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$. При капельной конденсации (на гидрофобной поверхности) на поверхности нагрева образуются капельки жидкости, которые со временем растут и скатываются, при этом создаются благоприятные условия для теплоотдачи. Капли увеличивают поверхность теплообмена и интенсифицируют перенос тепла. В результате коэффициент теплоотдачи при капельной конденсации водяного пара атмосферного давления может достигнуть величин порядка $40 \cdot 10^3 - 100 \cdot 10^3 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$. Отметим, для сравнения, что коэффициент теплоотдачи воздуха зерну в 15–20 раз меньше.

Такие условия теплообмена обуславливают интенсивный нагрев зерна при пропаривании. Температура зерна по нашим данным в зависимости от условий процесса пропаривания повышается до $95-97^\circ\text{C}$ в течение 2–3 минут. При этом на интенсивность тепло- и влагообмена оказывает существенное влияние скорость потока пара, т. е. его расход в единицу времени.

Пропаривание зерна сопровождается увеличением его влажности, причем приращение влажности будет определяться условиями процесса: состоянием слоя обрабатываемого зерна, условиями и характером обтекания зерен потоком пара, параметрами и его количеством, длительностью воздействия.

При разработке режимов процесса необходимо стремиться к тому, чтобы вся влага, внесенная паром, была поглощена зерном. Статический расчет

процесса увлажнения (табл. 8.1) показывает, что для увеличения влажности зерна на требуемую величину необходимо добавить следующее количество воды:

Таблица 8.1

Количество воды, необходимое для увлажнения зерна влажностью 10% до заданных пределов

Влажность зерна, %	10	15	20	25	30	35
Требуемое количество воды, г/кг.	0	59	125	200	286	384

Имеющиеся в литературе данные показывают, что для плющения зерна гладкими валками влажность его должна быть не менее 24–26 % [106].

Производство требует интенсивного ведения процессов, поэтому, учитывая условия пропаривания: перемешиваемый лопатками слой зерна с начальной температурой 10–20 °С, подвод пара в нескольких точках аппарата, "коэффициент полезного действия" процесса и др., принимаем для исследования расход пара в пределах от 110 г/кг мин до 550 г/кг мин.

Механизм увлажнения зерна паром определяется сорбцией влаги поверхностью зерен и последующим ее внутренним переносом. Вопросы проникновения влаги в зерно изучались многими исследователями, которыми установлено, что при увлажнении паром влага в зерновку практически равномерно проникает по всей ее поверхности. В начальные моменты обработки, когда температура зерна низкая, происходит конденсация пара на его поверхности и дальнейшее диффузионное проникновение влаги внутрь зерна.

В неподвижной паровой среде увлажнение зерна незначительно. Для достижения необходимой интенсивности увлажнения и приращения влажности следует увеличить скорость потока пара или количество его на единицу веса материала.

Шнековый пропариватель является не герметичным аппаратом, и поэтому давление в камере пропаривания лишь незначительно превышает атмосферное. При подаче сухого пара (давление в котле 0,4–0,6 МПа) увлажнение зерна проходит менее интенсивно, чем при поступлении влажного пара давлением 0,2 – 0,3 МПа. Так, например, влажность зерна при обработке в шнековом пропаривателе, если из котельной поступает пар под давлением 0,5 МПа, при различном расходе его следующая (табл. 8.2):

Таблица 8.2

Влажность зерна при увлажнении его в шнековом пропаривателе при давлении пара в трубопроводе 0,5 МПа

Расход пара, г/кг·мин	Длительность пропаривания, мин				
	3	5	7	10	30
	влажность зерна, %				
110	23,5	25,5	26,7	28,8	30,5
220	24,8	26,9	28,2	31,2	31,7
330	28,8	34,1	35,0	35,4	37,1

Эксперименты (табл. 8.3) по обработке зерна ячменя влажным паром при давлении его в паропроводе 1,5–2,0 атм ($1,5 \cdot 10^5 - 2,0 \cdot 10^5$ Па) показывают, что процесс увлажнения проходит более интенсивно и при расходе 0,11 кг пара/кг зерна в мин, влажность зерна в течение 3–5 мин достигает величины 30–33 %.

Таблица 8.3

Влажность зерна при увлажнении паром при давлении в трубопроводе 0,15–0,2 МПа

Расход пара, г/кг·мин	Длительность пропаривания, мин							
	1	2	3	5	7	10	20	30
	влажность зерна, %							
110	19,3	26,1	30,5	32,6	33,6	34,1	39,3	41,6
110	20,4	25,7	30,8	33,0	34,3	35,7	41,0	42,3

Анализируя теоретически требуемое количество влаги и действительный расход пара, видим, что эффективность процесса увлажнения зерна ячменя влажным паром очень высокая, особенно в начальный период до полного насыщения водой. Сравнение расчетных и фактических данных увлажнения зерна показывает, что в первые три минуты около 90 % пара поглощается зерном. В дальнейшем по достижении влажности 27–30 % темп увлажнения зерна замедляется, однако, по нашему мнению, длительная обработка паром должна увеличить степень клейстеризации крахмала зерна.

Увеличение расхода пара незначительно интенсифицирует процесс увлажнения зерна, но приводит к дополнительным затратам и, следовательно, экономически нецелесообразно.

8.2. Влияние пропаривания на углеводный комплекс зерна

8.2.1. Влияние пропаривания на степень клейстеризации крахмала зерна

Так как крахмал является основным компонентом злаковых культур, процесс клейстеризации его является наилучшим показателем качественных изменений при пропаривании.

Клейстеризация определяется совместным действием двух факторов: с одной стороны набуханием крахмального зерна при определенных температурных границах, с другой – силой (давлением), которая необходима для разрушения внутренней кристаллической структуры этого зерна.

В естественном состоянии крахмал нерастворим в холодной воде и может находиться длительное время в ней без заметного набухания. Набухание наступает скачком по мере повышения температуры. При 60 °С, например, кукурузный крахмал набирает до 300 % воды, при 70 °С – около 1000 % к своему исходному весу. При максимальном набухании зерно крахмала вбирает до 2500 % воды, так что остается не более 4 % сухого вещества.

Процесс набухания объясняется тем, что отдельные зерна крахмала, при достижении определенной температуры, разрываются по своей внешней оболочке, так что вода может проникнуть внутрь зерна непосредственно. Следствием этого является то, что растворимые в воде составные части зерна (молекулы амилозы и амилопектина с низкой степенью полимеризации) переходят в раствор и диффундируют из него.

Клейстеризация крахмала наиболее интенсивно проходит при нагревании в присутствии определенного количества воды.

Экспериментальные данные по клейстеризации крахмала ячменя при пропаривании приведены в табл. 8.4.

Полученные результаты позволяют отметить, что степень клейстеризации крахмала возрастает с увеличением длительности пропаривания и в исследованных пределах практически не зависит от часового расхода пара.

При длительности пропаривания от 3 до 7 мин степень клейстеризации увеличивается незначительно и составляет всего 3–8 %. Это говорит о том, что только в этом количестве крахмальных зерен от общей массы внутреннее давление достигает величины, способной разорвать оболочку. После 10-минутной обработки степень клейстеризации достигает 12–13 %, через 30 мин – 36–40 % и стопроцентная клейстеризация наблюдается у образцов, пропаренных в течение 70 мин.

Как показывают данные экспериментов, такие важные для процесса клейстеризации факторы, как температура и влажность зерна при пропаривании

Влияние расхода пара и экспозиции пропаривания на степень клейстеризации крахмала ячменя

Длительность пропаривания, мин.	Расход пара, кг/кг.мин. (кг/час)				
	0,110 (10)	0,220 (20)	0,330 (30)	0,440 (40)	0,550 (50)
степень клейстеризации, %					
3	3	3	3	3	3
5	5	7	6	5	5
7	8	8	6	8	7
10	13	12	12	12	13
20	23	25	25	23	24
30	38	38	36	40	40
60	83	80	85	82	86
70	100	100	100	100	100

влажным паром с давлением, равным атмосферному, возрастают достаточно быстро. Уже через одну минуту обеспечиваются условия, достаточные для процесса клейстеризации: температура зерна достигает 60 °С, а влажность – 20 %. После трех минут обработки температура зерна составляет 95–97 °С, влажность – 24–30 %, при этом имеет место частичная клейстеризация – около 3–4 %, т. е. произошло набухание крахмальных зерен и разрыв их оболочек. На протяжении дальнейшего процесса пропаривания средняя влажность зерна медленно повышается до 40 %, а температура его поддерживается в пределах 97–98 °С. Однако и в этих условиях процесс клейстеризации крахмала проходит сравнительно медленно и полностью заканчивается только за 65–70 мин.

Увеличение расхода пара при одной и той же экспозиции не приводит к интенсификации процесса клейстеризации, очевидно, по той причине, что основные параметры, как-то: температура зерна – остается практически на одном уровне (порядка 100 °С), влажность – находится в пределах полного насыщения (от 30 до 40 %), и изменение их в процессе обработки не оказывает значительного влияния на скорость клейстеризации крахмала.

Таким образом, при обработке ячменя паром при атмосферном давлении степень клейстеризации крахмала определяется, в основном, экспозицией пропаривания, и в меньшей степени – параметрами пара.

8.2.2. Влияние пропаривания на степень декстринизации крахмала зерна

Известно, что под действием тепла в определенном интервале влажности в зерне происходит преобразование крахмала в декстрины – более про-

стые углеводы. Установлено положительное влияние декстринов на обмен белка в организме и рост животных [113]. Эти данные были подтверждены нами в опытах по скормливанию пороссятам-отъемышам кормов, содержащих декстринированное зерно ячменя [145]. В процессе пропаривания зерна под действием высокой температуры и влажности создаются условия для превращения крахмала в декстрины.

Определено, что общее содержание декстринов возрастает с увеличением длительности обработки (рис. 8.1). В первые 10 мин пропаривания количество декстринов увеличивается примерно на 0,5–1,0 %, по сравнению с исходным образцом, через 30 мин – возрастает на 1,5–2,0 % и по истечении 60 мин – на 4,0–4,5 %. По данным анализов видно, что степень декстринизации крахмала незначительна.

Очевидно, сравнительно высокая температура нагрева, которая при пропаривании достигает 100 °С, не обеспечивает достаточных условий для протекания термического гидролиза, а кислотный гидролиз в данных условиях очень незначителен. При плющении пропаренного зерна для превращения его в хлопья количество декстринов возрастало еще на 0,5 %, по-видимому, в связи с деструкцией крахмала.

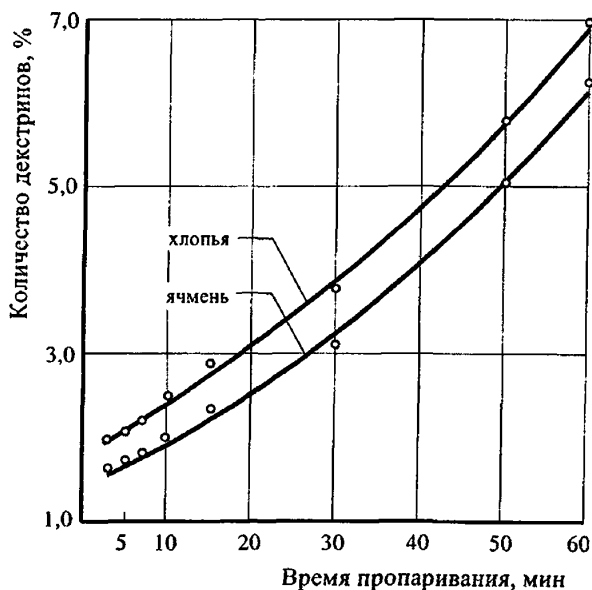


Рис. 8.1. Изменение количества декстринов в процессе пропаривания при атмосферном давлении пара и последующего плющения

8.2.3. Производство хлопьев из пропаренного зерна (флакирование)

Известно, что приготовление хлопьев из зерна приводит к улучшению некоторых качественных показателей.

Процесс клейстеризации определяется разрывом оболочек крахмальных гранул под действием тепла, влаги, давления и в некоторых случаях – механического воздействия. При плющении, очевидно, имеет место механическое разрушение структуры набухших крахмальных зерен – деструкция.

Изучена степень клейстеризации крахмала ячменя в зависимости от величины зазора между вальцами. С этой целью образцы ячменя, обработанного паром при атмосферном давлении в течение 10 мин, пропускали через плющильный станок, изменяя величину зазора между вальцами. Клейстеризация зерна после пропаривания составляет 12 %.

Установлено (табл. 8.5), что степень клейстеризации растет с уменьшением величины зазора между вальцами. В полученных хлопьях степень клейстеризации равнялась 29 % при зазоре 0,5 мм и возрастала до 68 % при уменьшении зазора до 0,1 мм. Хлопья, выработанные при величине зазора 0,1–0,15 мм имели хрупкую структуру вследствие того, что зерно подвергалось очень сильному механическому раздавливанию. Кроме того, уменьшение зазора приводит к значительному возрастанию мощности установки, поэтому последующие исследования и выработка опытной партии проводили при зазоре между вальцами 0,2–0,25 мм.

В производственных условиях подтверждено (табл. 8.6), что после плющения клейстеризация крахмала возрастает. Так, плющение ячменя, пропаренного в течение 1 мин, позволяет повысить степень клейстеризации до 33–40 %. Далее отмечается общая закономерность: в процессе пропаривания ячменя в течение до 30 мин степень клейстеризации повысилась до 36–40 %, а после плющения – возросла до 54–60 %.

Только после пропаривания в течение 60 мин и последующего плющения степень клейстеризации достигла сначала 83–89 %, затем – 100 %.

Таблица 8.5

*Изменение степени клейстеризации крахмала
в зависимости от величины зазора между вальцами*

Показатели	Зерно после пропаривания	Величина зазора между вальцами, мм						
		0,5	0,4	0,3	0,25	0,2	0,15	0,1
Степень клейстеризации, %	12	29	34	40	45	50	65	68

Изменение степени клейстеризации крахмала
ячменя при производстве паровых хлопьев

Показатели	Длительность пропаривания, мин							
	1	3	5	7	10	20	30	60
	Расход пара 10 кг/час							
Расход пара на 1 кг продукта, кг	0,11	0,33	0,56	0,77	1,1	2,2	3,3	6,6
Степень клейстеризации крахмала, %								
а) после пропаривания	-	3	5	8	13	23	38	85
б) после плющения	35	42	45	45	58	51	55	100
	Расход пара 20 кг/час							
Расход пара на 1 кг продукта, кг	0,22	0,66	1,1	1,54	2,2	4,4	6,6	13,2
Степень клейстеризации крахмала, %								
а) после пропаривания	-	3	5	8	13	25	38	83
б) после плющения	33	50	47	44	50	57	60	100

Анализ данных позволяет отметить, что больший эффект плющения дает при малых экспозициях пропаривания. Очевидно, при этих условиях в зерне еще имеются внутренние напряжения, вызванные быстрым нагревом и набуханием структуры зерна, которое при последующем плющении обуславливают разрыв оболочек крахмальных гранул и, следовательно, повышение степени клейстеризации. В пропаренном более длительное время зерне уже прошли релаксационные явления, структурные связи имеют меньшие напряжения, зерно более пластично. Такое зерно после плющения стремится восстановить свою форму, хлопья имеют менее нарушенную структуру, пластичную консистенцию. Таким образом, путем плющения зерна, обработанного в течение времени до 10 мин, при атмосферном давлении пара, можно достигнуть довольно высокой степени клейстеризации – 45–50 %. Полная клейстеризация крахмала зерна может быть получена только после пропаривания в течение длительного времени порядка 50–60 мин и последующего плющения.

8.2.4. Влияние пропаривания и плющения на переваримость крахмала ячменя (*in vitro*)

Переваримость или атакуемость крахмала ферментами характеризуется интенсивностью процесса образования из него легкоусвояемых питательных веществ, таких как глюкоза, под воздействием амилолитических ферментов.

Количество образовавшихся при действии ферментами легкоусвояемых веществ показывает эффективность использования корма.

Опытные данные (рис. 8.2) показывают, что процесс переваримости (в опытах это процесс инкубирования) длится не менее 5 ч.

Как для необработанного, так и для пропаренного ячменя большее количество выделившейся глюкозы образуется в первые периоды (1–2 часа) реакции, т. е. процесс проходит с затуханием во времени. Если в первый час выделилось от 100 до 200 мг/г глюкозы при различной обработке, то на пятом часу выделилось 10–20 мг/г, т. е. процесс практически прекращался.

Меньшей переваримостью обладает крахмал необработанного (исходного) ячменя. В течение 5 ч инкубирования образовалось 215 мг/г глюкозы. Атакуемость крахмала амилолитическими ферментами была выше у ячменя плющенного без пропаривания – на 20–30 мг выделившейся глюкозы.

Отмечается общая закономерность повышения переваримости или количества выделившейся глюкозы с увеличением длительности пропаривания.

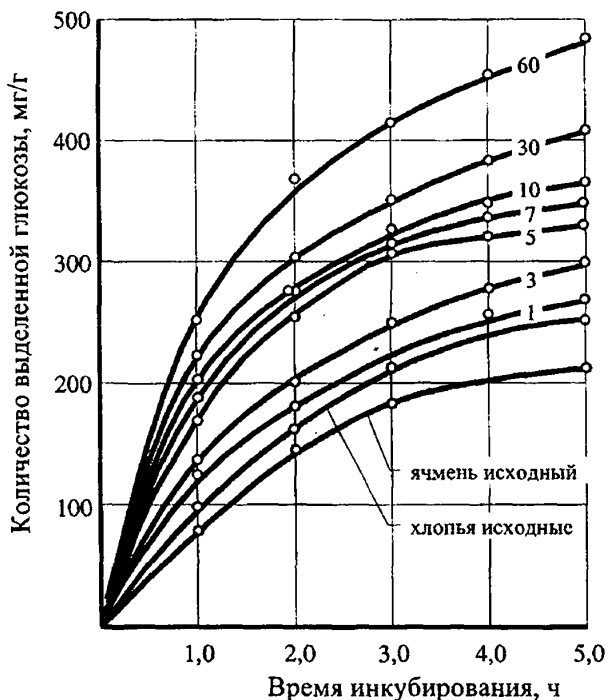


Рис. 8.2. Образование глюкозы при ферментативном гидролизе крахмала в хлопьях из пропаренного при атмосферном давлении ячменя при $\tau_{\text{пропаривания}} = 1, 3, 5, 7, 10, 30, 60$ мин

Так, после 5 мин пропаривания количество образовавшейся глюкозы в течение 5 ч инкубирования составила 320 мг/г, после 10 мин – 370 мг/г и после 60 мин возросло до 480 мг/г.

Таким образом, переваримость крахмала ячменя (*in vitro*), обработанного паром при атмосферном давлении и плющенного повышается с увеличением экспозиции обработки и превышает переваримость крахмала необработанного ячменя в 2 раза.

По утверждению ряда исследователей переваримость продуктов должна возрастать с увеличением степени клейстеризации.

Проведенные исследования по выявлению влияния степени клейстеризации крахмала на его переваримость показали (рис. 8.3– 8.4), что количество выделенной при ферментативном гидролизе глюкозы растет для более клейстеризованного продукта. При этом следует отметить, что для хлопьев с большей степенью клейстеризации длительность переваривания (инкубирования) сокращается до 4 ч.

В количественном выражении через 5 ч инкубирования в исходном продукте образовалось 140 мг/г глюкозы, хлопьях с 50 %-ной степенью клейстеризации крахмала 270 мг/г, т. е. увеличилось почти в 2 раза, а в хлопьях с полной клейстеризацией – 500 мг/г – увеличение в 3,5 раза, по сравнению с

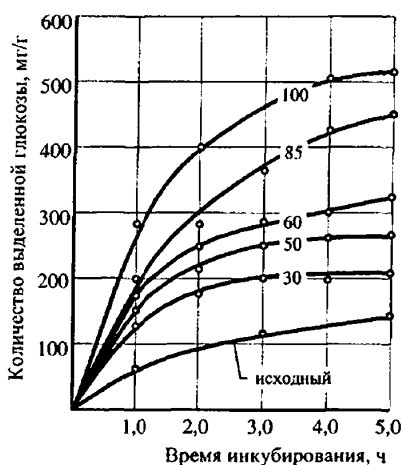


Рис. 8.3. Зависимость переваримости крахмала ячменя от длительности инкубирования при различной степени клейстеризации (30, 50, 60, 85, 100 %)



Рис. 8.4. Зависимость количества выделенной при гидролизе глюкозы от степени клейстеризации крахмала

необработанным зерном, причем процесс выделения глюкозы закончился через 4 ч.

Анализ зависимости количества выделившейся глюкозы от степени клейстеризации крахмала показывает, что процесс образования глюкозы протекает более интенсивно для хлопьев с большей степенью клейстеризации. Следовательно, хлопья с высокой степенью клейстеризации имеют лучшую переваримость крахмала (*in vitro*), чем необработанное зерно. Однако окончательные выводы об их питательной ценности можно будет сделать только после проведения опытов на животных.

8.2.5. Переваримость крахмала хлопьев (*in vitro*) различной толщины

Ранее (п. 8.2.3) показано, что для пропаренного при одних и тех же режимах ячменя можно получить различную степень клейстеризации в зависимости от величины зазора между вальцами, т. е. от толщины хлопьев. В связи с этим хлопья различной толщины могут иметь разную питательность.

Определено (рис. 8.5), что количество выделенной глюкозы при ферментативном гидролизе хлопьев растет с уменьшением толщины их, т. е. при уменьшении зазора между валками в процессе плющения.

Наилучшие результаты по переваримости достигаются при плющении ячменя на вальцах с зазором 0,1–0,15 мм. Количество образовавшейся глюкозы при этом через 4 ч составляет около 400 мг/г, в то время как при толщине

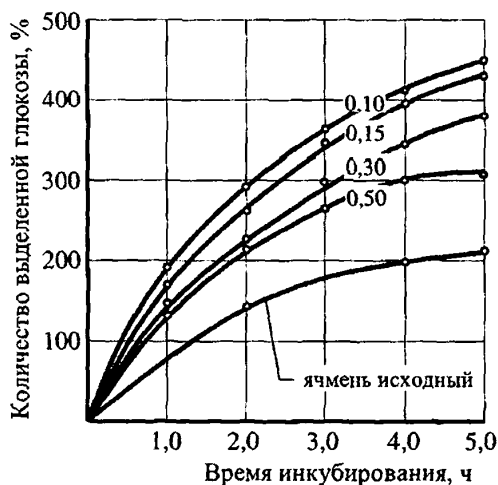


Рис. 8.5. Образование глюкозы при ферментативном гидролизе крахмала в хлопьях различной толщины (при величине зазора 0,1, 0,15, 0,3, 0,5 мм)

0,5 мм – всего 300 мг/г. Вместе с этим длительность процесса переваривания (инкубирования) увеличивается и составляет более 5 ч, количество выделенной глюкозы через 5 ч в хлопьях толщиной 0,1–0,15 мм достигает 420–440 мг/г, что в 2 раза превышает исходный образец. Это объясняется тем, что различные структурные изменения, происходящие в зерне, под воздействием валцов приводят к увеличению степени клейстеризации крахмала и водопоглотительной способности с уменьшением зазора между ними, т. е. с уменьшением толщины хлопьев, что в конечном счете повышает питательную ценность их.

8.3. Влияние пропаривания и плющения на белковый комплекс ячменя

8.3.1. Влияние пропаривания и плющения на содержание и фракционный состав белка

Исследованиями установлено, что плющение практически не изменяет суммы азотных веществ в ячмене, однако влияет на их состав, приводя к изменениям в соотношении белковых фракций (табл. 8.7). Так пропаривание при атмосферном давлении пара в течение 5 мин приводит к снижению растворимости всех фракций белка при одновременном увеличении белков нерастворимого остатка. При дальнейшей обработке до 60 мин количество водо-, соле- и спирторастворимых белков также уменьшается, а щелочерастворимых – возрастает. Увеличение щелочерастворимого белка, по-видимому, можно объяснить тем, что водорастворимые белки ячменя при пропаривании становятся неспособными растворяться в воде и частично растворяются в щелочи. Потеря белком растворимости говорит о денатурационных изменениях. При этом наиболее мобильными являются альбумины. Как показывают результаты наших исследований, глубина денатурационных изменений, происходящих в ячмене при пропаривании, определяется как длительностью обработки, так и величиной давления пара. Денатурация водорастворимых белков при обработке зерна паром при атмосферном давлении в течение 5 мин составляет 28 %, через 10 мин – 47,2 % и спустя 60 мин – 87,7 %.

8.3.2. Влияние пропаривания и плющения на переваримость белков ячменя (in vitro)

Из ряда литературных источников известно отрицательное воздействие нагревания на питательную ценность белков. Некоторые исследователи определили, что переваримость белка и продуктивность животных снижались

Таблица 8.7

Влияние длительности пропаривания ячменя при атмосферном давлении и площади на содержание и фракционный состав белка

Длительность пропаривания, мин	Показатели					Нерастворимый остаток, г
	"Сырой" протеина, г	Количество фракций белка, г				
		водорастворимая	солерастворимая	спирторастворимая	щелочерастворимая	
5	14,02	8,71	2,86	15,09	55,22	17,12
10	13,80	9,11	2,45	10,80	58,77	18,97
30	13,84	3,13	2,69	7,30	64,99	21,89
45	13,75*	2,50	2,49	6,90	64,10	22,00
60	13,68	1,35	1,73	6,21	64,89	25,72
Исходный ячмень	13,87	11,00	3,12	20,01	61,34	4,53

при скармливании им кормов, прошедших тепловую обработку. Это объясняется тем, что воздействие тепла может вызвать изменения химических и физических свойств белка. Прежде всего, эти изменения объясняются так называемой реакцией Майяра, т. е. взаимодействием свободного лизина с глюкозой, в результате чего образуется неусвояемый комплекс лизин-фруктоза. Кроме того, в результате перегрева белков ϵ -аминогруппа лизина вступает в реакцию с амидами и образует соединения, которые под действием ферментов расщепляются на биологически недоступные пептиды.

Установлено, что (табл. 8.8) содержание "сырого" протеина во всех образцах находится на одном уровне: переваримость протеина ячменя, обработанного паром при атмосферном давлении от 5 до 30 мин не ухудшается и практически также остается на одном уровне. Незначительное снижение коэффициента переваримости протеина наблюдается при пропаривании ячменя в течение 45 мин. Дальнейшее увеличение длительности пропаривания до 60 мин приводит к повышению количества непереваримого протеина, что отрицательно сказывается на его переваримости в целом. По нашим данным, коэффициент переваримости (in vitro) протеина ячменя, обработанного паром при атмосферном давлении в течение 60 мин снижается на 8 % по сравнению с исходным образцом.

Снижение переваримости протеина в данном случае, по-видимому, можно объяснить реакцией Майяра, т. к. полученный продукт имел коричневый цвет, что указывает на образование в нем меланоидинов. Последнее подтверждается также нашими данными о снижении содержания глюкозы в образ-

Зависимость коэффициента переваримости (in vitro) протеина ячменя от длительности обработки его паром при атмосферном давлении

Длительность пропаривания, мин	Содержание "сырого" протеина, г	Содержание непереваримого протеина, г	Содержание переваримого протеина, г	Коэффициент переваримости протеина, %
Ячмень исходный	13,87	2,36	11,51	82,9
5	14,02	2,42	11,60	82,7
10	13,80	2,29	11,51	83,4
30	13,84	2,30	11,54	83,4
45	13,75	2,75	11,00	80,0
60	13,68	3,42	10,26	75,0

цах, прошедших обработку при указанном режиме. Если в исходном ячмене глюкозы содержится 0,45 %, то в пропаренном в течение часа – всего 0,15 %.

По результатам данных исследований можно сделать заключение, что для предотвращения снижения переваримости протеина ячменя длительность пропаривания его при атмосферном давлении не должна превышать 30 мин. Отсюда следует, что экспозиция пропаривания является основным фактором, влияющим на переваримость протеина ячменя, обработанного паром при атмосферном давлении.

8.4. Влияние пропаривания на микроструктуру зерна ячменя

При пропаривании происходит разрыхление эндосперма, крахмальные гранулы набухают, некоторые из них разрушаются (рис. 8.6–8.7).

Микрофотографирование эндосперма ячменя после пропаривания и ИК-нагрева показало, что при данном способе обработки зерна крахмальные гранулы "сплавляются" и форма их просматривается с трудом (рис. 8.6). Однако структура эндосперма рыхлая за счет образования многочисленных микротрещин, разрушающих структуру эндосперма. Видно нарушение связи крахмальных гранул с белковой матрицей.

При исследовании структуры алейронового слоя ячменя установлено, что он состоит из двух-трех рядов крупных, толстостенных клеток (рис. 8.7). По внешнему виду клетки алейронового слоя в поперечном и продольном разрезе имеют почти квадратную или прямоугольную форму и плотно прилегают одна к другой, не образуя межклетников. Внутри клеток находится большое количество алейроновых зерен белковой природы.



Рис. 8.6. Эндосперм пропаренного зерна ячменя. Увеличение 3000 раз



Рис. 8.7. Алейроновый слой пропаренного зерна ячменя. Увеличение 500 раз

При пропаривании зерна ячменя алейроновые зерна также изменяют свой первоначальный вид. Увеличиваясь в объеме, они набухают. Но в отличие от изменений при других видах нагрева при пропаривании алейроновые зерна не изменяют своей формы. На микрофотографии (рис. 8.7) видны их очертания.

Наибольшему изменению в пропаренном зерне подвергаются стенки клеток алейронового слоя. Они значительно набухают, толщина стенок увеличивается в 4–5 раз и они разрываются. Аналогичное явление наблюдала Е. Я. Троицкая при варке перловой крупы. Как отмечает автор, стенки клеток алейронового слоя, богатые слизистыми веществами, обладают большой гидрофильной способностью и при варке толщина их значительно увеличивается.

8.5. Разработка, внедрение и испытания линии плющения на Варенском КХП Литовского ПО "Малиба"

8.5.1. Описание и принцип работы линии плющения

Линия плющения зернового сырья предназначена для повышения питательной ценности зернового сырья и его доброкачественности в результате влаготепловой обработки продукта паром и его механического плющения.

Основная цель производства хлопьев по данной технологии – это выработка на их базе высокопитательных и легкоусвояемых комбикормов для телят и молочных коров. Поэтому планируемая область применения данных

технологических линий – комбикормовые предприятия, производящие комбикорма для КРС.

Разработанная технологическая схема производства хлопьев из зернового сырья предусматривает выполнение следующих операций:

- очистку зерна от сорных, минеральных и металломагнитных примесей;
- пропаривание зерна;
- плющение зерна;
- сушку хлопьев;
- охлаждение хлопьев;
- хранение хлопьев.

На основании детального анализа отечественного оборудования и технологии плющения зерна в разработанную линию плющения зерна включено следующее технологическое оборудование: зерновой сепаратор А1-БЛС-12; камнеотборник РЗ-БКТ-150, магнитный сепаратор У1-БМЗ-01, агрегат для плющения зерна ПЗ-ЗА; конвейерная ленточная сушилка Г4-КСК-45.

Технологический процесс производства хлопьев на Варенском комбикормовом заводе организован следующим образом: зерно из склада силосного типа транспортными механизмами подается в бункер производственного корпуса, из которого поступает самотеком на два яруса сит воздушно-ситового сепаратора А1-БЛС-12, где очищается от сорной и посторонней примесей.

Опыт производства хлопьев на техническое состояние плющилки и качество хлопьев существенное влияние оказывает наличие в зерне гальки.

Поэтому для удаления гальки и соответственно для улучшения процесса плющения в технологической линии был установлен камнеотборник РЗ-БКТ-150.

Для удаления металломагнитных примесей в линии установлен магнитный сепаратор У1-БМЗ-01.

После очистки зерно направляется в бункер, установленный над агрегатом плющения зерна ПЗ-ЗА.

Агрегат для приготовления хлопьев из зерна ПЗ-ЗА (рис. 8.8) состоит из:

- горизонтального и вертикального конвейера;
- пропаривателя;
- дозатора;
- плющилки;
- системы вентиляции.

Из бункера очищенное зерно при помощи дозирующей задвижки поступает в горизонтальный конвейер пропаривателя, который направляет его в вертикальный конвейер. В вертикальном конвейере зерно смешивается с паром и транспортируется в пропариватель. При этом происходит предварительный подогрев и увлажнение зерна. Окончательная влаготепловая обработка

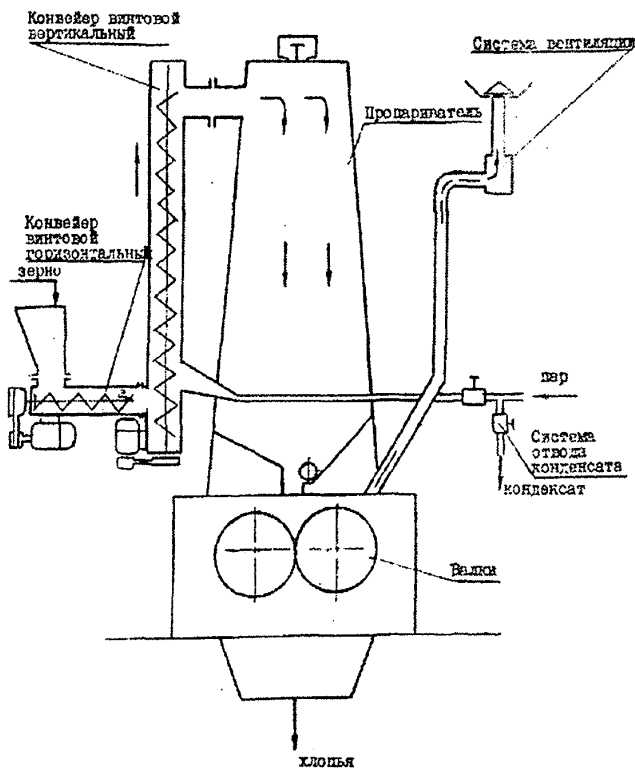


Рис. 8.8. Функциональная схема агрегата ПЗ-3А

зерна завершается в бункере пропаривателя. Заполнение бункера пропаривателя регулируется датчиком уровня. В период заполнения пропаривателя зерном и в процессе выполнения технологического цикла зерно в пропаривателе перемешивается (происходит так называемая рециркуляция). Это достигается тем, что часть зерна из пропаривателя, через отверстие, расположенное в его нижней части, поступает на горизонтальный конвейер. В горизонтальном конвейере пропаренное зерно смешивается с зерном, поступающим из бункера над агрегатом, и в таком виде подается в вертикальный конвейер, где повторно подвергается влаготепловой обработке.

Пропаренное зерно дозатором роторного типа направляется на валцы плющилки, при помощи которых происходит его плющение. Необходимую толщину хлопьев получают за счет регулировки зазора между валками, величина которого находится в пределах 0,5–2,0 мм.

Отработанный пар от плющильных валцов отсасывается системой вентиляции.

После влаготепловой обработки и плющения с помощью агрегата ПЗ-ЗА полученные хлопья имеют повышенную влажность (16–20 %), что приводит к быстрой порчи их при хранении, к слеживаемости и не истеканию из силосов.

Паспортные технические данные агрегата ПЗ-ЗА представлены в таблице 8.9.

Из всех анализируемых сушилок, изготавливаемых в нашей стране и используемых в перерабатывающих отраслях, наиболее подходила по своим конструктивным и техническим данным к предъявляемым требованиям сушилка конвейерно-ленточная Г4-КСК-45 (рис. 8.9, таблица 8.10).

Сушилка конвейерная ленточная Г4-КСК-45 представляет собой камеру, закрытую металлическими щитами и дверями, заполненными теплоизоляцией. Внутри сушилки один над другим расположены 5 пар барабанов. На каждую пару барабанов натягивается бесконечная сетчатая проволочная лента из нержавеющей стали. Каждая пара барабанов относительно другой смещены

Таблица 8.9

Технические данные агрегата ПЗ-ЗА

Наименование	Значение
1. Тип	стационарный
2. Производительность за время основной работы в зависимости от вида и влажности зерна, т/ч	3,0 - 5,0
3. Уровень механизации и автоматизации, %, не менее	100
4. Количество выполняемых операций	3
5. Удельный расход электрической энергии, кВт·ч/т	7,3-12,1
6. Масса, кг, не более	3477
7. Общая потребляемая мощность, кВт, не более	42
8. Тип вентилятора	В14-70-2,5-01 ТУ-22-3155-75
9. Тип плющильного органа	вальцевый
10. Номинальное напряжение питающей сети, В	380
11. Давление пара, подводимого к пропаривателю, МПа, в пределах	0,03-0,07
12. Массовая подача пара, кг/ч	200-300
13. Номинальный диаметр валцов, мм	450
14. Частота вращения валцов, об/мин	500 ± 15
15. Срок службы, лет	6
16. Габаритные размеры, мм	
длина	4500
ширина	2150
высота	4200

Технические данные сушилки Г4-КСК-45

Наименование	Значение
1. Рабочая поверхность конвейерных лент, м ²	45
2. Производительность по испаренной влаге, кг/ч	380
3. Производительность по высушенному продукту кг/ч, при снижении влажности в %	
картофеля от 80 до 12	110
моркови от 87 до 14	62
капусты	29
4. Ширина конвейерной ленты, мм	2000
5. Количество конвейерных лент, шт.	5
6. Скорость движения конвейеров, м/мин	от 0,1 до 0,6
7. Удельный расход тепла на 1 кг испаренной влаги, Дж	$4988 \cdot 10^3$
8. Общий расход пара, м ³	1200
9. Давление пара в калориферах, МПа	5-6
10. Удельный расход электроэнергии, кВт·ч/т	21,0
11. Установленная мощность электрооборудования, кВт	11,4
12. Производительность отсасывающих вентиляторов, м ³ /ч	64000
13. Габаритные размеры, мм	
длина	9070
ширина	3260
высота	4900

по длине, что предотвращает попадание сырого продукта в сухой при переходе его с одной ленты на другую.

Один из барабанов в каждой паре является ведущим. Привод сушилки состоит из двух самостоятельных приводных колонок, на каждой из которых установлено два редуктора. Кроме того, на приводных колонках установлен-

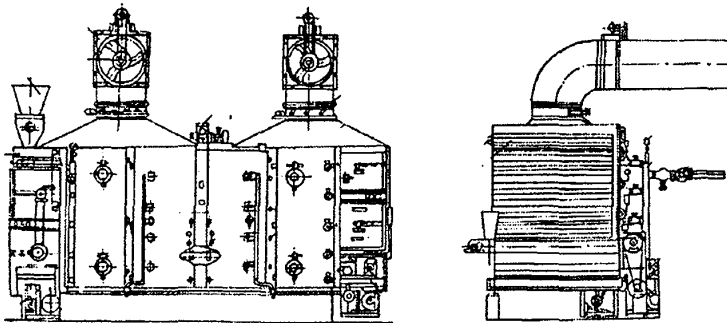


Рис. 8.9. Сушилка конвейерная ленточная Г4-КСК-45

ны цепные вариаторы с диапазоном регулирования $D=6$, которые обеспечивают бесступенчатое регулирование скорости движения конвейерных лент.

Для предотвращения спекания продукта по середине сушилки над верхними тремя конвейерными лентами установлены ворошители.

Внутри транспортных лент расположены пять секций калориферов, нагреваемых паром, который подается от раздаточного коллектора. Для удаления влажного воздуха из сушильной камеры применяется система вентиляции, которая состоит из 2-х вентиляторов и общего воздуховода.

В целях сокращения используемой производственной площади и упрощения процесса подачи хлопьев после плющилки на сушилку произведена частичная модернизация сушилки.

В частности, с целью уменьшения габаритов сушилки по длине на 2750 мм из состава сушилки был исключен наклонный транспортер. Раскладчик этого транспортера был установлен непосредственно на камеру сушилки над верхней лентой транспортера.

За счет переделки приводных колонок значительно увеличена скорость транспортных лент сушилки (до 30 раз), что позволило повысить производительность сушилки с 110 кг/ч до 3,5 т/ч.

Технологический процесс сушки осуществляется следующим образом: после плющилки хлопья направляются на транспортер-раскладчик сушилки, при помощи скребков которого через раскладочную доску равномерно распределяются по высоте слоя продукта на ленте первого транспортера сушильной камеры, который, двигаясь, выносит продукт на вторую ленту и таким образом проходит последовательно пять лент.

Нагретый от калориферов воздух, пронизывая слой продукта, удаляет из него влагу с помощью двух вентиляторов и выводится в атмосферу. По паспорту четыре верхние ленты сушилки предназначены для сушки продукта, а на пятой нижней происходит охлаждение продукта до температуры окружающей среды.

Высушенные хлопья из сушилки при помощи транспортирующих механизмов подаются на хранение в бункера основной линии дозирования-смешивания.

8.5.2. Испытания технологического оборудования линии плющения

Установлено, что при работе зернового ситовоздушного сепаратора А1-БЛС-12, камнеотборника РЗ-БКТ-150 и магнитного сепаратора У1-БМЗ-01 в паспортном режиме в очищенном зерне практически полностью отсутствовала крупная примесь (остаток на сите с отверстиями $\varnothing 10$ мм). Минеральная примесь во всех обследуемых партиях зерна не превышала 0,12 %. При этом

размер частиц минеральной примеси практически не превышал 2 мм, поэтому она хорошо удалялась, что положительно отразилось на стабильности и надежности работы плющилки.

Экспериментально определено, что наиболее важными факторами, оказывающими существенное влияние на эффективность работы агрегата и качество готовой продукции, являются влажность и температура зерна после влаготепловой обработки, а также толщина получаемых хлопьев.

Установлено, что эти два показателя при данном способе обработки взаимосвязаны (рис. 8.10): с увеличением влаги в пропаренном зерне степень декстринизации крахмала возрастает, особенно на начальном этапе обработки. С увеличением содержания влаги в пропаренном зерне выше 18–19 % тенденция роста степени декстринизации снижается.

Наряду с этим, повысить влажность зерна в процессе влаготепловой обработки в агрегате ПЗ-ЗА выше 20 %, из-за конструктивных особенностей пропаривателя, затруднительно.

Таким образом, наиболее оптимальная влажность пропаренного зерна 18 %. Длительность пропаривания продукта до этой влажности паром с давлением 0,03–0,1 МПа составляет 9–10 минут, температура зерна после пропаривания достигала 70–85 °С (рис. 8.11).

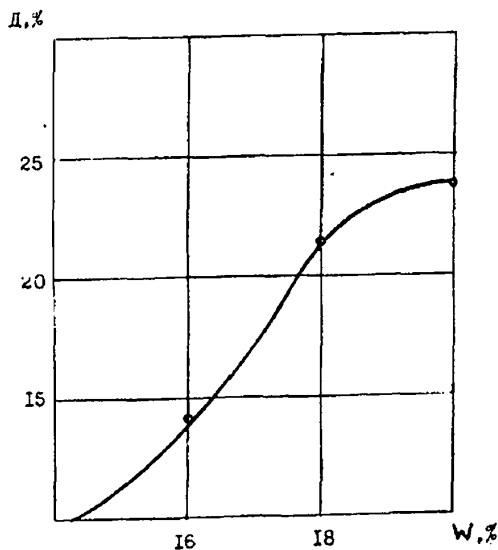
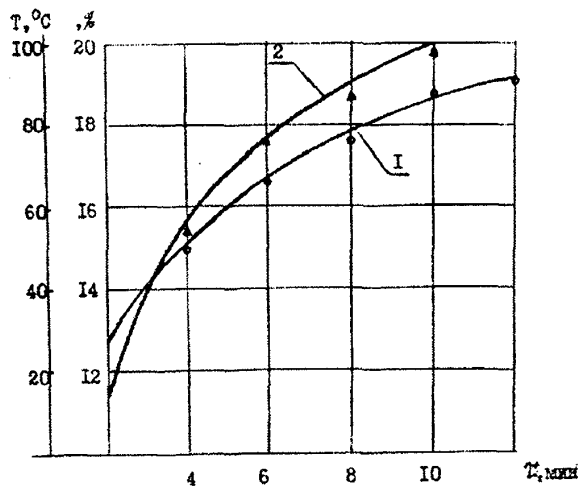


Рис. 8.10. Влияние влажности пропаренного зерна на степень декстринизации крахмала



*Рис. 8.11. Изменение влажности и температуры зерна пшеницы от длительности пропаривания в агрегате ПЗ-ЗА:
1 — влажность; 2 — температура*

Было установлено, что при такой длительности обработки зерна паром его оптимальная производительность 3 т/ч. Замеры нагрузки на электродвигатели плющилки агрегата ПЗ-ЗА показали, что, в отличие от пропаривателя, имеется резерв мощности для повышения производительности плющилки до 4 т/ч.

Оптимальная толщина хлопьев не должна превышать 1,4 мм, что установлено на основании ранее проведенных во ВНИИКП исследований [11, 20], а также рекомендаций завода-изготовителя на агрегат ПЗ-ЗА.

Все изучаемые при испытании агрегата ПЗ-ЗА показатели сведены в таблицу 8.11.

Испытания сушилки Г4-КСК-45 показали, что реконструкция конструктивных особенностей транспортера-раскладчика позволили равномерно распределять влажные хлопья по всей ширине верхней транспортной ленты, несмотря на низкие технологические свойства влажных хлопьев и подачу их после агрегата ПЗ-ЗА на сушилку самотеком. Высота слоя хлопьев на ленте при максимальной производительности плющилки 3,5 т/ч не превышала 50 мм. Однако при данной производительности установленная мощность электродвигателя транспортера-раскладчика 1,1 кВт не обеспечивала стабильную подачу продукта на сушилку. В связи с этим мощность электродвигателя была доведена до 2,2 кВт.

Таблица 8.11

Оптимальные сводные показатели результатов испытаний агрегата ПЗ-ЗА в линии площади зерна

Наименование показателей	Значение
1. Номинальная производительность за время работы при влажности ячменя и пшеницы 18-19 %, т/ч	3,0
2. Толщина хлопьев, мм, не более	1,4
3. Наличие целых зерен в хлопьях, %, не более	1,0
4. Удельный расход электрической энергии, кВт·ч/т, не более	12,1
5. Номинальная мощность установленного электрооборудования, кВт	36,5
6. Давление пара, подводимого к пропаривателю, МПа	0,03-1,0
7. Номинальная массовая подача пара, кг/ч, не более	300
8. Температура пара, °С	105-120
9. Время пропаривания, мин	9-10
10. Влажность хлопьев на выходе из пропаривателя, %, не менее	17,0
11. Температура хлопьев на выходе из пропаривателя, °С, не менее	70

В результате модернизации сушилки номинальная скорость лент транспортеров была увеличена с 0,239 м/мин до 7,2 м/мин или в 30 раз. Кроме того, благодаря установке в приводные колонки транспортеров цепных вариаторов с диапазоном регулирования $D=6$, обеспечивается бесступенчатое регулирование скорости движения ленты от 3 до 18 м/мин. Мощность электродвигателей приводных колонок транспортеров была увеличена до 3 кВт.

Такой диапазон регулировки скорости лент транспортеров позволяет варьировать длительность нахождения продукта в сушилке от 2 до 10 мин.

Испытания сушилки показали, что оптимальная длительность нахождения продукта в сушилке около 9 мин. За это время технические возможности сушилки позволяют снимать влагу увлажненных хлопьев при производительности 3,5 т/ч до 12 % (рис. 8.12). Поэтому, чтобы не пересушивать хлопья, а доводить их до кондиционной влажности не более 14 %, достаточно из пяти ленточных транспортеров использовать всего три.

Два остальных целесообразно применять для охлаждения высушенных хлопьев, так как температура их после третьего транспортера составляет 50–60 °С.

После охлаждения температура хлопьев на выходе из сушилки составляла 20–22 °С и не превышала температуру окружающей среды более чем на 5 °С. Номинальный расход пара при давлении 0,3–0,5 МПа – 800 кг/ч. Определяемые сводные технические данные конвейерной сушилки в процессе испытаний представлены в таблице 8.12.

Хлопья (табл. 8.13) являются трудносыпучим продуктом. Угол естественного откоса хлопьев изменяется от 45 до 50 град, объемная масса от 316 до

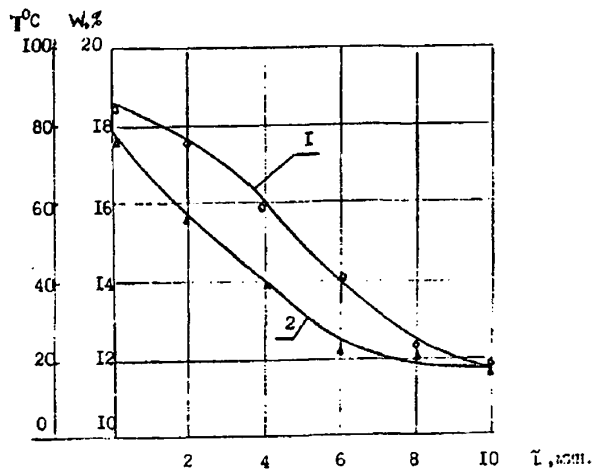


Рис. 8.12. Изменение влажности и температуры зерна пшеницы от длительности сушки в сушилке Г4-КСК-45:
1 – влажность; 2 – температура

Таблица 8.12
Оптимальные сводные показатели результатов испытаний сушилки конвейерно-ленточной Г4-КСК-45

Наименование показателей	Значение
1. Номинальная производительность по испаренной влаге, кг/ч	380
2. Производительность по высушенным зерновым хлопьям, т/ч, при снижении влажности в % с 19 до 14 при длительности сушки 9 мин	3,5
3. Количество конвейерных лент для сушки, шт.	3
4. Количество конвейерных лент для охлаждения, шт.	2
5. Скорость движения конвейеров, м/мин в пределах	от 3 до 18
6. Длительность нахождения продукта в сушилке, мин в пределах	от 2 до 10
7. Номинальный расход пара, кг/ч	800
8. Номинальное давление пара в калориферах	0,3-0,5
9. Установленная мощность электрооборудования, кВт	15,0
10. Номинальная производительность отсасывающих вентиляторов, м ³ /ч	30000
11. Температура нагретого продукта в сушильной камере, °C	50-60
12. Температура хлопьев после охлаждения, °C	20-22
13. Температура воздуха окружающей среды, °C	18
14. Влажность хлопьев после охлаждения, %, не более	14,0

Таблица 8.13

Показатели качества хлопьев

Показатели	Влажность %	Толщина на хлопьях, мм	Объемная масса, кг/м ³	Угол естественного откоса, град	Степень декстри- низации, %	Общая грибная обсе- менность		Общая бактериальная обсеменность		Токсич- ность на рыбах гуши
						Кол-во спор гри- бов в 1 г, тыс.	% к исход- ному, сни- жение %	Кол-во микроб- ных кле- ток в 1 г, тыс	% к ис- ходному, снижение	
Исходное зерно пшени- цы	13,1	-	688	24	-	3020	100,0	637720	100,0	Не ток- сично
Пропаренные пшенич- ные хлопья	18,7	1,2	394	57	23	130	95,7	90400	85,8	Не ток- сично
Высушенные пшеничные хлопья	13,7	1,1	316	44	21	150	95,0	40560	93,6	Не ток- сично
Исходное зерно ячменя	12,8	-	663	22	-	2780	100,0	732105	100,0	Не ток- сично
Пропаренные ячменные хлопья	18,2	1,0	368	63	27	115	95,1	27757	96,3	Не ток- сично
Высушенные ячменные хлопья	13,1	1,0	327	49	25	80	97,1	15325	98,0	Не ток- сично

330 кг/м³. Однако при испытании линии установлено, что хлопья удовлетворительно транспортируются цепными транспортерами, норями и в самотеках с углом наклона более 60 град.

Хранили хлопья в наддозаторных бункерах в течение 2-х суток. За данное время не наблюдалась слеживаемость хлопьев.

Отмечено, что наблюдается деструкция крахмала зерна. При этом степень декстринизации крахмала в хлопьях повышалась на 21–27 %.

Существенное влияние данный способ обработки оказывает на микробиологические показатели зерна. В готовой продукции наблюдается значительное снижение количества грибов и бактерий. В ячменных и пшеничных хлопьях грибная и бактериальная обсемененность уменьшилась на 95–97 и 85–98 % соответственно (табл. 8.13).

Глава 9

ГИДРОТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ЗЕРНА МЕТОДОМ ПРОПАРИВАНИЯ С ПОСЛЕДУЮЩИМ ПОДЖАРИВАНИЕМ

9.1. Влияние пропаривания с последующим поджариванием на декстринизацию крахмала ячменя

В результате воздействия влажного пара, поступающего в пропариватель, влажность зерна увеличивалась (рис. 9.1) до 13–20 % после трех минут обработки, до 20–25 % после пяти минут, до 25–30 % – после 7 минут и до 30–33 % после 10 минут.

В процессе пропаривания температура зерна в течение 1–2 минут достигала 98–100 °С и в дальнейшем не превышала этого значения, поскольку давление пара внутри пропаривателя составляло 1–1,5 атм.

Увлажненный паром ячмень поджаривали в тонком слое на греющей поверхности при температуре 250–300 °С. Максимальное время обработки составляло 60 минут при $t_n = 250$ °С и 10 мин при 300 °С. По истечении этого времени зерно обгорало и теряло товарный вид.

Определено (табл. 9.1), что содержание декстринов возрастает с увеличением длительности пропаривания, следовательно, с повышением влажности ячменя, а также экспозиции поджаривания и температуры греющей поверхности.

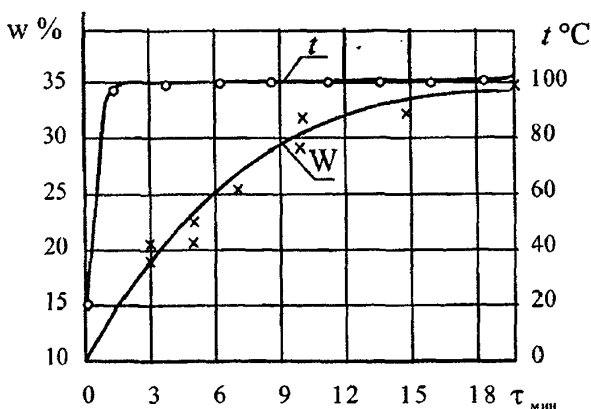


Рис. 9.1. Зависимость температуры и влажности ячменя от времени пропаривания

Так, при увеличении времени пропаривания с 3 до 10 мин влажность зерна возрастала до 30 %. Известно, что количество декстринов при пропаривании не увеличивается. Последующее поджаривание пропаренного зерна приводило к преобразованию крахмала в декстрины и степень декстринизации зависела от экспозиции обработки и температуры греющей поверхности. Для определенной температуры поджаривания количество декстринов зависело от начальной влажности ячменя и длительности теплового воздействия. Так, при температуре греющей поверхности 250 °С степень декстринизации, близкая к наибольшей, достигалась через 40–50 мин обработки (рис. 9.2) и составляла 4–6 % для ячменя влажностью до 20 % (пропаренного в течение 3–5 мин) и 12–13 % для ячменя влажностью 25–30 % (пропаренного в течение 7 и более минут). Дальнейшее увеличение экспозиции поджаривания несколько повышало количество декстринов, но зерно приобретало обгорелый вид. Повышение влажности зерна выше 25 % незначительно увеличивает степень декстринизации крахмала, следовательно, длительность пропаривания должна составлять 7–8 мин.

Установлено (рис. 9.3), что основное количество декстринов образуется при температуре зерна выше 100 °С, причем с повышением температуры процесс декстринизации значительно интенсифицируется.

Так, после 4 мин поджаривания температура зерна достигала ≈ 130 °С при $t_n = 250$ °С; $t_3 \approx 160$ °С при $t_n = 270$ °С и $t_3 \approx 180$ °С при $t_n = 300$ °С. При этом

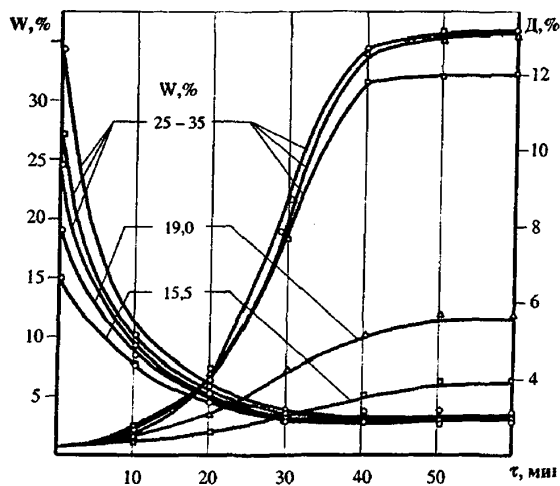


Рис. 9.2. Изменение влажности и количества декстринов в зерне ячменя при поджаривании после пропаривания, $t_n = 250$ °С

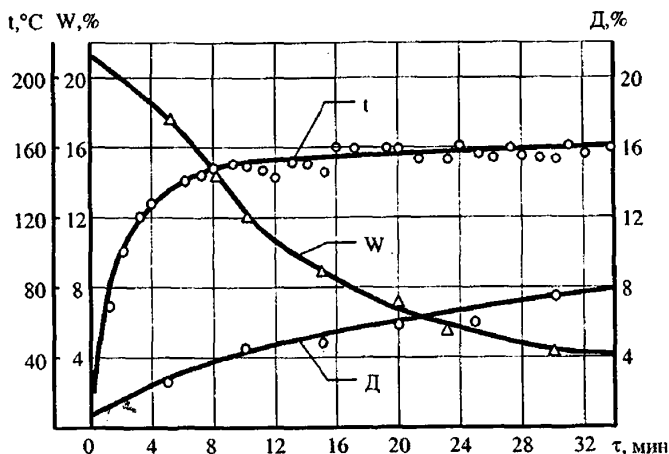


Рис. 9.3. Изменение температуры (t , °C), влажности (W , %) и количества декстринов в зерне ячменя при поджаривании после пропаривания, $t_n = 250$ °C

количество декстринов соответственно составляло 2,5; 4,5 и 12 %. При дальнейшем поджаривании содержание декстринов повысилось до 8 % при $t_n = 250$ °C в течение 35 мин, до 18 % при $t_n = 270$ °C в течение 24 мин и до 18 % при $t_n = 300$ °C через 8–10 мин обработки. Таким образом интенсификация процесса декстринизации за счет повышения температуры греющей поверхности до 300 °C приводит к сокращению длительности поджаривания до 8–10 мин.

Определено, что при увлажнении зерна паром получается равнозначный эффект декстринизации при более низкой влажности продукта, по сравнению с увлажнением холодной водой. Так, при увлажнении нешелушеного ячменя холодной водой максимальная степень декстринизации при поджаривании на всех режимах достигается при влажности продукта 35–40 % и составляет от 13 до 18 %, в то время как после пропаривания такое количество декстринов получается при влажности зерна 25 %. Это можно объяснить тем, что при воздействии пара происходит уплотнение белковой "сетки", окружающей эндосперм, в связи с чем необходимое давление паровоздушной смеси, вызывающее взрывание зерновки, достигается при наличии меньшего количества свободной влаги в продукте.

Вместе с этим положительное влияние процесса пропаривания ячменя не исчерпывается и сокращением времени для достижения необходимой влажности. Обработка зерна паром приводит к клейстеризации крахмала.

Следовательно, в ячмене, подвергнутом пропариванию с последующим поджариванием, получается оклейстеризованный крахмал, частично преоб-

Таблица 9.1

*Изменение степени декстринизации крахмала ячменя
при поджаривании после пропаривания*

Длительность пропаривания, мин	Длительность поджаривания, мин	Номер опыта					
		1		2		3	
		Влажность, %	Декстрины, %	Влажность, %	Декстрины, %	Влажность, %	Декстрины, %
1	2	3	4	5	6	7	8
		Температура греющей поверхности – 250 °С					
3	0	19,0	2,5	15,5	2,6	16,8	2,2
	10	8,9	2,5	7,7	2,3	8,4	2,9
	20	5,2	3,0	4,5	2,6	5,0	3,8
	30	3,9	4,2	3,6	2,8	3,9	5,3
	40	3,5	5,0	3,4	3,5	3,4	5,3
	50	3,3	5,6	3,2	3,8	3,2	5,1
	60	3,1	5,5	3,0	3,7	3,0	6,0
5	0	20,8	2,2	21,4	2,2	24,9	2,2
	10	8,9	2,6	9,1	2,8	10,0	2,6
	20	5,3	2,8	5,0	3,7	5,9	3,4
	30	4,0	4,1	4,0	4,5	5,0	5,9
	40	3,5	5,9	3,4	5,9	3,7	10,8
	50	2,9	5,8	2,7	5,9	3,1	10,9
	60	2,5	6,3	2,2	6,0	2,8	10,9
7	0	25,1	2,2	28,2	2,2	26,4	2,2
	10	10,3	2,5	10,8	2,7	11,0	3,0
	20	6,1	3,9	6,4	4,3	6,6	4,3
	30	5,5	8,6	4,0	7,5	5,3	7,5
	40	3,4	12,5	3,2	12,9	3,8	12,8
	50	3,0	12,6	2,5	13,2	3,2	12,8
	60	2,8	12,8	2,3	13,1	2,6	12,0
10	0	29,5	2,2	33,0	2,2	31,6	2,2
	10	9,4	2,7	10,1	2,9	9,9	3,0
	20	4,6	3,9	6,7	4,0	5,0	3,9
	30	3,6	7,6	4,2	7,9	3,7	7,1
	40	2,8	12,4	3,1	12,0	3,1	10,0
	50	2,4	12,9	2,7	12,0	2,5	10,1
	60	2,2	12,9	2,3	12,0	2,2	10,3
15	0	32,6	2,2	32,0	2,2	28,5	2,2
	10	10,6	3,0	10,5	2,7	9,3	2,6
	20	7,8	4,1	8,0	4,9	7,5	5,0
	30	4,6	8,0	5,1	7,5	4,3	7,9
	40	3,9	11,5	3,8	10,3	4,0	11,7
	50	3,0	11,3	3,2	10,3	3,0	11,7
	60	2,4	11,3	2,6	10,6	2,4	11,9
20	0	34,8	2,2	36,3	2,2	35,1	2,2

Продолжение табл. 9.1

1								
	10	8,6	2,5	11,2	2,7	8,6	2,9	
	20	8,2	3,8	8,6	4,8	7,9	3,5	
	30	5,0	7,5	5,3	8,1	4,9	7,7	
	40	3,4	11,6	4,0	12,5	3,5	11,2	
	50	3,0	11,7	3,6	12,7	3,2	11,3	
	60	2,2	11,8	2,5	12,7	2,7	11,3	
		Температура гремящей поверхности - 300°C						
3	0	20,2	2,2	16,7	2,2	18,6	2,2	
	3		3,0		2,6		3,1	
	5		6,7		4,8		5,3	
	8	8,5	8,5		7,8		8,9	
	0	22,1	2,2	23,7	2,2	25,3	2,2	
	3		4,9		4,8		4,8	
	5		9,8		8,6		7,5	
	10	2,5	13,0	2,5	14,6	2,7	14,3	
	0	25,6	2,2	26,3	2,2	30,0	2,2	
	3		5,2		5,0		5,2	
	5		11,3		7,9		10,1	
	10	2,5	18,5	2,8	13,1	2,9	17,2	
10	0	32,0	2,2	28,5	2,2	31,7	2,2	
	3		6,1		4,3		4,5	
	5		10,9		6,8		9,1	
	10	2,9	18,0	2,8	13,9	3,0	16,9	
	0	29,6	2,2	32,9	2,2	33,1	2,2	
	3		5,0		6,4		5,3	
	5		11,6		12,0		10,8	
	10	2,7	13,7	3,1	19,0	3,1	16,9	

разованный в декстрины, который, как известно, легче поддается расщеплению амилолитическими ферментами. Кроме этого нами установлено, что в ячмене, прошедшем такую обработку, декстрины имеют белый цвет и относятся к амилодекстринам, которые являются легкоусвояемыми углеводами.

Таким образом определено, что 35–40 % крахмала ячменя (до 18–20 % по отношению к общему весу) можно преобразовать в декстрины при обработке его паром под давлением 1,0...1,5 атм в течение 7–8 мин, в результате которой влажность зерна повышается до 25–30 %, с последующим поджариванием в тонком слое на металлической поверхности, нагретой до 280–300 °С в течение 8–10 мин.

Для изучения возможности применения этой технологии к заводу с оборудованием итальянской фирмы Джи-э-Джи проведено поджаривание пропаренного зерна на установке в толстом слое. Пропаренный нешелушенный ячмень с влажностью 33 % загружается в камеру с мешалкой, стенки и дно кото-

рой нагревались до 230–250 °С. Длительность поджаривания составляла 90 мин. Полученный продукт представлял собой вспученные зерна, содержал до 10 % декстринов, имел объемную массу 365 г/л при влажности 2,9 %, прочность зерен на раздавливании снизилась до 4,8 кг. Вкусовые качества и запах продукта улучшились.

Следовательно, для заводов с оборудованием итальянской фирмы Джи-э-Джи включение пропаривателя в технологическую схему перед обжаривателями-смесителями обеспечит повышение питательной ценности ячменя.

9.2. Влияние пропаривания с последующим поджариванием на биохимические свойства ячменя

Пропаривание ячменя при атмосферном давлении в течение 5–10 минут значительно повышает влажность продукта. Температура зерновой массы уже после первой минуты обработки паром достигает 100 °С. В результате этого происходит некоторое снижение содержания "сырой" клетчатки и крахмала и довольно интенсивное разрушение глюкозы. Общее количество "сырого" протеина остается неизменным. Однако с увеличением времени пропаривания несколько снижается переваримость его пепсином (*in vitro*), несмотря на наличие процесса денатурации белков.

В результате поджаривания пропаренного ячменя на греющей поверхности с температурой 300 °С в течение 8 мин влажность продукта значительно снижается, при этом происходит вспучивание и растрескивание зерен. Общее количество "сырого" протеина при данном режиме обработки остается неизменным как в шелушенном, так и нешелушенном ячмене, однако меняется его фракционный состав – растворимость легкоусвояемых фракций (водо-соле-растворимых) несколько повышается, а трудноусвояемых (спирто-щелочерастворимых) значительно снижается, по сравнению с теми же показателями в исходном продукте. При воздействии высокой температуры происходит разрушение крахмала и "сырой" клетчатки, а также снижение количества глюкозы за счет реакции меланоидинообразования (табл. 9.2).

9.3. Влияние пропаривания с последующим поджариванием на микроструктуру зерна ячменя

Изучение микроструктуры зерна с помощью сканирующего микроскопа позволяет лучше понять биохимические превращения. Анализ фотографий (рис. 9.4, 9.5) показывает, что крахмальные гранулы эндосперма и алейронового слоя увеличиваются и растрескиваются, крахмальные цепи разрываются, следовательно усвояемость крахмала улучшается.

Таблица 9.2

**Изменение качественных показателей показателей ячменя в процессе пропаривания
и последующего поджаривания**

№ п/п	Температура, давление °С, атм	Время обработки, мин	Показатели										Переваримый протеин, %
			Влажность	Растворимость фракций белка, %			"Сырой" протеин, %	"Сырая" клетчатка, %	Крахмал, %	Глюкоза, %	"Сырой" протеин, %	Переваримый протеин, %	
				водорастворимые	солеустойчивые	щелочерастворимые							
Пропаривание													
1.	Исходный шелушенный		11,13	11,00	3,12	61,34	20,01	13,55	5,19	51,32	4,02	10,45	
2.	1-1,5 атм	3	16,47	8,71	2,86	55,22	15,09	13,19	4,40	49,10	2,05	8,94	
3.	1-1,5 атм	7	20,34	6,11	2,45	56,77	10,80	13,67	5,60	48,30	2,10	9,29	
4.	1-1,5 атм	10	23,43	3,13	1,73	58,89	7,80	13,28	4,70	46,50	2,10	6,59	
Поджаривание после пропаривания													
1.	Исходный нешелушенный		11,45	7,41	3,38	54,72	15,69	13,87	5,19	60,4	4,03	10,45	
2.	300 °С	8	2,77	3,30	1,82	54,45	4,65	13,80	5,00	54,5	1,60	10,68	
3.	Исходный шелушенный		11,86	7,48	3,42	54,00	14,80	13,70	3,51	54,0	4,21	11,52	
4.	300 °С	8	2,98	3,50	1,60	55,0	4,87	13,66	2,20	53,7	1,70	11,08	



Рис. 9.4. Эндосперм пропаренного зерна ячменя с последующим его поджариванием. Увеличение 3000 раз



Рис. 9.5. Алейроновый слой пропаренного зерна ячменя с последующим его поджариванием. Увеличение 1000 раз

При более жестком режиме обработки (пропаривание с последующим поджариванием) ячменя структура алейронового слоя претерпевает наибольшие изменения. Содержимое клеток полностью отходит от стенок и при изготовлении среза легко выкрашивается (рис. 9.5).

9.4. Испытание линии влаготепловой обработки зерна на Кузнецовском комбикормовом заводе

На основании исследований, проведенных во ВНИИКП, было показано, что значительное количество крахмала ячменя можно перевести в декстрины при поджаривании ячменя, увлажненного до 20–25 %. Для практической реализации был предложен способ обработки зерна, заключающийся в предварительном пропаривании его в шнековом пропаривателе и последующем поджаривании.

Для производственной проверки технологии влаготепловой обработки зернового сырья при производстве комбикормов на Кузнецовском комбикормовом заводе была переоборудована линия обжаривания ячменя.

В существующую линию дополнительно перед обжаривателем был включен пропариватель-кондиционер АСК, который установлен над силосом для необжаренного ячменя.

Технологический процесс влаготепловой обработки зерна включал следующие операции: очистку, шелушение, отделение пленок, пропаривание, поджаривание и охлаждение.

В схеме линии (рис. 9.6) предусматривалось как обжаривание сухого ячменя, так и обжаривание ячменя с предварительным пропариванием.

Поджаривание зерна по итальянской технологии проводили при температуре теплоносителя 220–250 °С. Влажность обрабатываемого ячменя была в пределах 12 %. Длительность обработки равнялась 100 мин. Количество продукта в смеситель-обжариватель загружалось согласно проектной производительности и составляло 500–600 кг.

Температура зерна в процессе поджаривания возрастала до 170 °С при температуре теплоносителя 220 °С и до 185 °С при 250 °С.

Готовый продукт (обжаренный ячмень) был светло-коричневого цвета, имел запах поджаренного зерна и, по нашему мнению, горьковатый привкус.

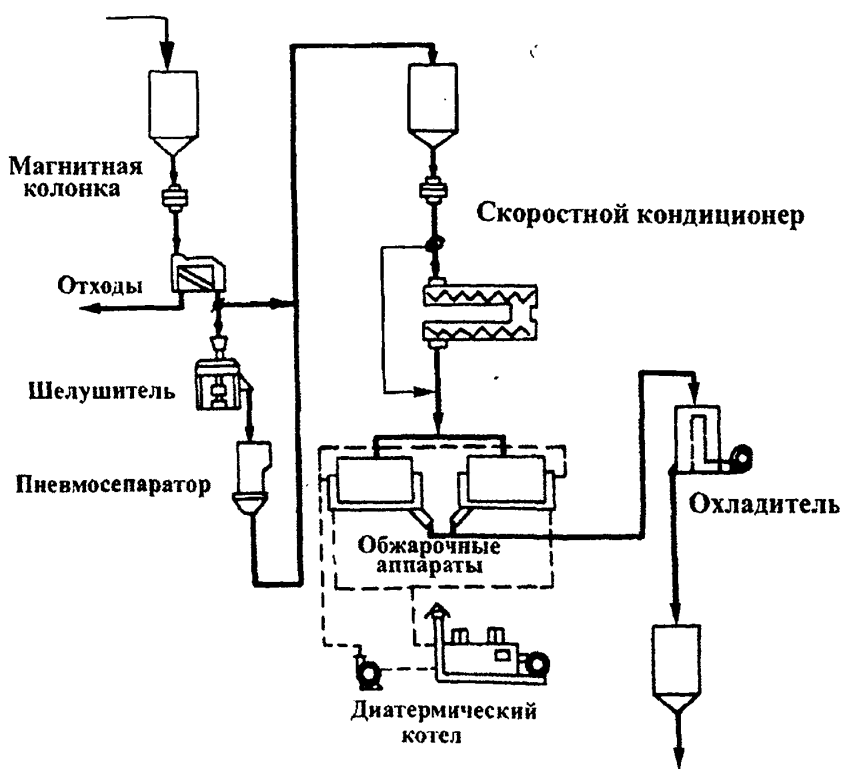


Рис. 9.6. Технологическая линия обжаривания ячменя на Кузнецовском комбикормовом заводе

Влажность ячменя снизилась до 4,9–6,6 %, вследствие этого зерна имели повышенную твердость.

Качественный состав продукта изменился незначительно. Количество декстринов в исходном ячмене составляло 1,5 %, а после обработки возросло до 2,25 % при температуре 220 °С и до 3,3 % при 250 °С.

При обработке зерна по технологии, предлагаемой ВНИИКП, зерно после очистки и шелушения направлялось в пропариватель, который представляет собой одну секцию кондиционера АСК-10, переоборудованную таким образом, что зерно в камере пропаривания находится 5–7 мин. При проведении испытаний пар подавался из котельной под давлением 0,25–0,45 МПа. В процессе пропаривания зерно увлажнялось до 22–24 % и нагревалось до 80 °С. Пропаренный ячмень поступал непосредственно в смеситель-обжариватель. Вместе с этим проведены опыты по изучению влияния отлежки пропаренного зерна перед поджариванием на качественные показатели продукта, для чего зерно накапливалось в бункере над смесителем-обжаривателем.

Определено, что пропаренное зерно в смесителе-обжаривателе нагревается медленнее, чем сухое и при температуре теплоносителя 220 °С при полной загрузке температура зерна составляла 110–130 °С. Влажность зерна в процессе поджаривания уменьшилась до 7,7–7,9 %. Количество декстринов в зерне возросло до 5,55–6,35 %.

При повышении температуры теплоносителя до 250 °С и уменьшении загрузки обжаривателя температура зерна достигла 160–180 °С, зерна при этом вспучивались и частично растрескивались. Экспозиция обработки сокращалась до 30 мин.

В процессе испытаний линии были выработаны опытные партии и определены их показатели качества. Анализ показал, что качество зерна улучшилось, количество декстринов достигало 10–12 %.

Лучшие показатели достигнуты при максимальной температуре теплоносителя 250 °С. Производительность линии при этом оставалась на том же уровне. Следует отметить, что при обжаривании пропаренного зерна необходимо применять теплоноситель с температурой нагрева не ниже 250 °С.

Вместе с тем количество декстринов значительно увеличится при повышении температуры теплоносителя до 300 °С. Однако установленное оборудование – диатермический котел – не позволяет увеличить температуру выше 250 °С. При таком режиме нагрев зерна осуществляется недостаточно интенсивно и, следовательно, перевод крахмала в декстрины проходит медленно. В связи с этим следует установить новое оборудование, например, парогенератор ВОТ-0,5 с теплоносителем – дифенильная смесь, обеспечивающий температуру до 340 °С.

На основании производственных испытаний линии можно сделать следующие выводы:

1. Установка пропаривателя в линию обжаривания ячменя, построенную с оборудованием фирмы Джи-э-Джи, позволяет улучшить качество готового продукта. Содержание декстринов при обжаривании пропаренного ячменя возрастает до 10 % (в исходном ячмене количество декстринов – 1,5 %).

2. Для достижения такого результата необходимо уменьшить единовременную загрузку обжаривателя до 1/3 его объема, длительность обработки при этом уменьшится в 3 раза и составит 30 мин.

3. Производительность обжаривателя остается практически на том же уровне.

4. Для интенсификации процесса обработки рекомендуется замена диатермического котла на парогенератор ВОР-0,5 отечественного производства.

Глава 10

ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ЗЕРНА И КОМБИКОРМОВ МЕТОДОМ ЭКСТРУДИРОВАНИЯ

Особенно эффективной является экструзионная обработка компонентов комбикормов. Этот процесс играет в настоящее время важную роль в технологии комбикормов, в особенности при производстве комбикормов для молодняка животных, для лабораторных животных, а также в тех случаях, когда требуется обеспечить высокую степень клейстеризации крахмала в различных комбикормах; эффективным является процесс экструзии при переработке соевых бобов. Этот процесс также предоставляет известные возможности для регулирования активности различных ингибиторов и биологически активных веществ.

Широко применяется процесс экструдирования также при переработке мясных продуктов, рыбы, отходов птицеводства, в частности, при этой обработке достигается полное уничтожение сальмонелл. Эффективно происходит производство комбикормов с высоким содержанием зернового компонента и с добавкой мочевины. Используется процесс экструдирования и в различных областях пищевой промышленности, например, для производства сухих завтраков и т. п.

Фундаментальной задачей процесса экструзии является глубокая клейстеризация крахмала. При этом происходит декструкция макромолекул крахмала с образованием различных декстринов и сахаров, в результате чего существенно повышается усвояемость комбикормов, причем ассимиляция питательных веществ происходит с меньшими энергетическими затратами. С точки зрения процесса питания процесс клейстеризации крахмала имеет следующее значение:

Во-первых, оклейстеризованный крахмал заметно повышает свою сорбционную емкость, что обеспечивает поглощение им большого количества воды; поэтому его усвояемость возрастает практически во всех случаях, повышается и переваримость корма.

Во-вторых, вследствие клейстеризации крахмала существенно облегчается доступность его молекул действию ферментов, поэтому процесс ферментативного гидролиза крахмала заметно облегчается, что обеспечивает образование значительного количества декстринов и сахаров различной молекулярной массы, вплоть до образования простых сахаров, глюкозы и т. п.

При экструзионной обработке зерновых продуктов или других высококрахмалистых компонентов высокая степень клейстеризации крахмала является совершенно обязательной, т. к. только в этом случае обеспечивается всасы-

чивание экструдата, резкое увеличение его объема и формирование пористой его структуры.

Почти полная клейстеризация крахмала и высокая степень вспучивания экструдата обеспечиваются при выполнении следующих условий процесса:

- предварительного измельчения сырья до равномерной крупности, со средним размером частиц в пределах около 1 мм;
- равномерное увлажнение всей массы продукта водой, паром или же их совместным употреблением для достижения влажности на уровне 18...27 %, в зависимости от конкретного состава композиции;
- тепловая обработка при высокой температуре в течение достаточно короткого периода.

Принято считать, что процесс клейстеризации протекает в три стадии:

- вначале крахмальные гранулы поглощают небольшое количество воды, набухание их выражено незначительно и они сохраняют свою исходную форму и характерное двойное лучепреломление;
- на второй стадии процесса поглощение воды резко возрастает, заметно повышается вязкость продукта, двойное лучепреломление исчезает;
- в конечной фазе процесс клейстеризации протекает при повышенной температуре, при этом крахмальные гранулы разрушаются, теряют свою форму, а молекулы крахмала деградируют.

Степень клейстеризации принято оценивать на основе исчезновения двойного лучепреломления или же дифракции рентгеновского излучения, а также посредством определения ферментативной атакуемости. Последний способ дает наиболее достоверные результаты и наиболее приемлем на практике.

Существующие конструкции экструдеров можно разделить на три типа по характеру организации процесса обработки продукта:

- экструдеры на основе кратковременного высокотемпературного воздействия на продукт;
- экструдеры на основе применения высокого давления;
- экструдеры для обработки продукта низкой влажности – без увлажнения продукта ("сухие" экструдеры).

В экструдерах первого типа, в которых осуществляется обработка продукта при высокой температуре в течение короткого периода, процесс протекает следующим образом:

- на первом этапе происходит обработка продукта паром при атмосферном давлении и относительно невысокой температуре – в пределах 66...99 °С;
- на втором этапе достигается равномерное увлажнение всей массы продукта;
- третий этап – обработка продукта в экструдере в тестообразном состоянии;

– на четвертом этапе, длительность которого составляет всего 10...20 с, обеспечивают резкое повышение температуры до 110...205 °С; этот этап является основным для формирования окончательных свойств продукта;

– на заключительном этапе осуществляется выпрессовывание продукта сквозь фильеры матрицы и формирование продукта в виде готового экструдата.

В экструдерах, процесс в которых протекает при высоком давлении, обработка продукта имеет следующие особенности:

– зерновой компонент подается в прессовую камеру при одновременной подаче пара под давлением от 0,2 МПа до 0,8 МПа.

На втором этапе происходит обработка продукта в экструдере в течение 10 с.

Затем готовый продукт выпрессовывается сквозь матрицу и формируются готовые экструдаты в виде различных гранул и т. п.

В сухих экструдерах процесс осуществляется только за счет трения, без применения пара или воды. Эти экструдеры имеют невысокую производительность и ограниченную область применения, обычно они используются в фермерских хозяйствах для обработки зерна или сои. Преимущество их состоит в том, что они могут использоваться буквально в любых условиях, необходимо только наличие энергии для привода. Не требуется также сушить готовый экструдат, достаточно только охладить его до обычной температуры. Эти аппараты отличаются невысокой стоимостью и просты в эксплуатации.

В настоящее время наиболее широко применяется одношнековый экструдер как при обработке зерновых, так и различных композиций с их включением.

Экструдированию можно подвергать практически любые органические материалы, индивидуально или в различных композициях. Однако ввод жирового компонента не должен быть выше 4,5 %, т. к. в противном случае существенно затрудняется вспучивание экструдата.

Можно вводить также различные биологически активные вещества, например, витамины, но лучше – в микрокапсулированном виде.

Плотность экструдата варьируется в очень широком диапазоне – от 50 до 560 кг/м³, в зависимости от конкретного состава продукта и варианта проведения этого процесса. Значительное влияние на плотность готового продукта оказывает содержание жира. В случае экструдирования зерновых плотность находится в пределах 260...560 кг/м.

Температура, до которой нагревается продукт в прессовой камере экструдера, зависит от следующих факторов:

– исходной температуры смеси;

- варианта предварительного увлажнения продукта: паром, водой или их совместным действием;
- количества поглощенной продуктом воды;
- конструктивных особенностей экструдера, в частности, конфигурации лопастей шнеков и формы матрицы;
- степени спрессовывания продукта, т. е. от давления в рабочей камере аппарата;
- площади живого сечения отверстий фильер и матрицы;
- числа отверстий в матрице;
- толщины матрицы, т. е. длины пути выпрессовывания продукта сквозь матрицу;
- скоростью истечения экструдата из матрицы.

Форма частиц полученного экструдата определяется формой отверстий матрицы, а также конструкцией ножа и характера его работы. Экструдат может быть получен в виде пластин, колечек, звездочек, трубочек типа макарон и т. п.

Поверхность частиц экструдата может быть гладкой или же шероховатой. В случае шероховатой поверхности продукт лучше увлажняется, его потребительские свойства выше.

Готовый экструдат подвергается сушке. Обычно она происходит в специальном туннельном канале, которым снабжаются современные конструкции экструдеров.

Наибольшее применение в технологии комбикормов нашел этот процесс при производстве вспученных кормов для молодняка животных. Например, в США ежегодно вырабатывается таких кормов не менее чем на 4 млн дол. Такие же экструдированные корма производят для домашних животных – собак и кошек. Для этого используют обычно экструдеры с кратковременным высокотемпературным воздействием.

Этот же процесс высокотемпературной экструзии используют для производства гранул для рыб; при этом для форели гранулы должны иметь плотность в пределах 320...480 кг/м³, т. к. они должны плавать, а для карповых рыб, которые поедают корм со дна – тонуть, поэтому их плотность составляет 450...560 кг/м³. И обязательно должны быть уничтожены сальмонеллы. Это происходит без снижения питательных свойств белка.

При производстве комбикорма для жвачных животных требуется, возможно более полная клейстеризация крахмала. В этом случае заметно сокращается расход корма, например при опытной кормлении овец получена его экономия в размере 13,5 % [40, 193]. Для достижения высокой степени клейстеризации крахмала требуется использовать крахмалосодержащие компоненты в измельченном виде, а еще лучше – в виде муки. Для зерновых куль-

тур рекомендуется измельчать зерно на молотковой дробилке. Можно использовать также целое зерно или грубодробленое, но при этом экструдат не будет иметь равномерную структуру и свойства его будут ниже.

Применение высокотемпературной экструзии полезно и при производстве комбикорма для жвачных животных. Установлено [98, 99 193], что в сычуге не все азотистые соединения превращаются в микробный белок; микробная флора сычуга использует белок также для выработки жирных кислот и аммиака – или же часть белка проходит через сычуг без изменений и затем в пищеварительном тракте ассимилируется в виде аминокислот.

Метод высокотемпературной экструзии обеспечивает при переработке зерна масличных культур сохранение белка, вследствие чего его усвояемость повышается.

Экструзионная обработка соевых бобов позволяет управлять активностью ингибиторов протеина роста. Эти вещества инактивируются при тепловой обработке. Главный из них – трипсин, белковый фермент, который катализирует синтез аминокислот в пищеварительном тракте.

В соевых бобах содержатся ингибиторы трипсина, например гемагглютинин, который также является теплочувствительным соединением.

Обнаружены [111, 149, 182, 245, 252, 263] и другие ингибиторы: сапонин и т. д.

Инактивация этих ингибиторов осуществляется вследствие их тепловой денатурации или даже деструкции их макромолекул. Однако при высоком тепловом воздействии на продукт с целью их инактивации одновременно происходит разрушение таких важных аминокислот, как лизин, аргинин, триптофан и цистин. Для полной инактивации ингибиторов требуется нагрев продукта выше 120 °С и достаточно длительная обработка. Но наилучший эффект достигается при кратковременном воздействии высокой температурой; существует для сои оптимальное сочетание температуры и длительности воздействия.

Питательные свойства белка существенно зависят от длительности тепловой обработки продукта. В случае кратковременного процесса обеспечивается высокий результат – пищевая ценность белка практически не снижается.

Особое значение имеет вопрос сохранения активности витаминов в готовом экструдате. Литературных данных имеется немного. Известно однако [144, 154], что жирорастворимые витамины А, Д и Е сохраняются лучше, чем водорастворимые В и С. Наилучшим вариантом, конечно, является ввод витаминов в комбикорм в микрокапсулированном виде.

Проведенный эксперимент [125, 151] за сохранностью витаминов А₁, В₁, В₂ и Д показал, что пальмитин (витамин А) сохраняется очень хорошо: снижение его активности за 6 месяцев хранения комбикорма при температуре 24

и 37 °С произошло всего на 1,4 %, что находится на уровне ошибки опыта. Однако синтетические тиамин и ниацин заметно понизили свою активность. Но естественные витамины зерна этой группы сохраняются намного лучше, их активность снижается лишь в незначительной степени.

Таким образом, при использовании высокотемпературного кратковременного способа экструзионной обработки продуктов витамины сохраняются намного лучше, чем при остальных вариантах этого процесса.

Экструзионная обработка продуктов в настоящее время широко применяется в самых различных отраслях пищевой, химической и других отраслях промышленности. В комбикормовой промышленности этот способ является наиболее перспективным для дальнейшего совершенствования технологии, повышения качества и пищевых достоинств комбикормов, а также использования самых неожиданных компонентов в рецептах комбикормов, с целью привлечения новых ресурсов, снижения стоимости корма, повышения его потребительских достоинств.

При экструзионной обработке продукта полученный экструдат оказывается экологически чистым: все микробы уничтожаются практически полностью. Это является важным дополнительным преимуществом процесса экструдирования.

К другим преимуществам следует отнести:

- возможность обработки любых органических материалов с получением из них оригинального продукта;
- существенное повышение питательной ценности экструдата по сравнению с питательной ценностью исходных продуктов;
- возможность использования в композициях малоценных продуктов при производстве комбикормов или же пищевых продуктов.

Таким образом, экструдирование предоставляет широкие возможности для совершенствования технологии комбикормов, в современных условиях этот способ является прогрессивным и заслуживает самого широкого применения на комбикормовых заводах.

10.1. Некоторые вопросы теории одношнекового пресс-экструдера

Известно, что условия устойчивой работы шнекового пресса с питателем и плоской матрицей является условие неразрывности потока (по Шенкелю, 1962):

$$Q_n = Q_{ш} = Q_m \quad (10.1)$$

где Q_n , $Q_{ш}$, Q_m – производительность пресса питателя, шнека и матрицы.

При $Q_n < Q_{ш} < Q_m$ гранулы либо будут плохо формироваться, либо не будут формироваться вообще. При $Q_n > Q_{ш} > Q_m$ произойдет заклинивание пресса.

Уравнения Q_n , $Q_{ш}$ и Q_m имеют вид:

$$Q_n = \frac{\pi^2 D_n^2 n_n h_n \sin \varphi_n \cos \varphi_n}{2}, \quad (10.2)$$

$$Q_{ш} = \frac{\pi D_{ш}^2 n_{ш} h_{ш} \sin \varphi_{ш} \cos \varphi_{ш}}{2} - \frac{\pi D_{ш} h_{ш}^3 \sin^2 \varphi_{ш} P_4}{12\mu} - \frac{\pi^2 D_{ш}^2 \delta \operatorname{tg} \varphi_{ш} P_4}{12\mu b} - \frac{P_4}{L},$$

$$Q_{ш1} = \frac{\pi D_{ш}^2 n_{ш} h_{ш} \sin \varphi_{ш} \cos \varphi_{ш}}{2} - \text{прямой поток вдоль шнека}, \quad (10.3)$$

$$Q_{ш2} = \frac{\pi D_{ш} h_{ш}^3 \sin^2 \varphi_{ш} P_2 - P_1}{12\mu} - \text{обратный поток вдоль шнека}, \quad (10.4)$$

$$Q_{ш3} = \frac{\pi^2 D_{ш}^2 \delta^2 \operatorname{tg} \varphi_{ш} P_2 - P_1}{12\mu b} - \text{обратный поток между шнеком} \\ \text{и цилиндром}, \quad (10.5)$$

$$Q_m = \frac{\pi d^4 \rho z}{128\mu(e + 4d)}, \quad (10.6)$$

- где
- D_n и $D_{ш}$ — диаметры питателя и шнека;
 - n_n и $n_{ш}$ — скорости вращения шнеков питателя и экструдера;
 - h_n и $h_{ш}$ — глубины нарезки шнеков питателя и экструдера;
 - φ_n и $\varphi_{ш}$ — угол подъема витков шнеков питателя и экструдера;
 - μ — вязкость смеси у входа в матрицу;
 - L — длина шнеков;
 - δ — зазор между витками шнеков и корпуса экструдера;
 - b — толщина выступа шнека;
 - z — число отверстий в матрице;
 - d — диаметр отверстий в матрице;
 - e — длина канала отверстий в матрице;
 - P_1, P_2, P_3 — давления смеси в зоне загрузки, сжатия и головки экструдера.
 - $P_4 = P_2 - P_1$

Непосредственное использование уравнений (10.2 – 10.6) для практических расчетов затруднено, так как величина μ и ρ заранее трудноопределимы. Например: $\mu = f(n_{ш}, T_{ш}, W, P_4)$.

Для точного определения μ и P_4 необходимо проводить специальные эксперименты. Поэтому основные параметры экструдера находят опытным путем, т. е. путем проведения экспериментов.

10.2. Технические характеристики экструдера КМЗ-2У

Экструдер типа КМЗ является автономной машиной для переработки зернового сырья. Электрическая энергия, потребляемая электродвигателем, превращается в механическую энергию шнека-смесителя, который служит для перемещения и перемалывания зерна и частичного превращения в тепловую энергию, в результате чего мы получаем из зерна законченный продукт – экструдат в виде гранул сформированной пористой массы. Количество механической энергии, превращенной в тепловую зависит от кинетических параметров экструдера, размера шайб и колец, установленных между секциями шнека.

Изменения технических характеристик экструдера представлены на рис. 10.1.–10.3.

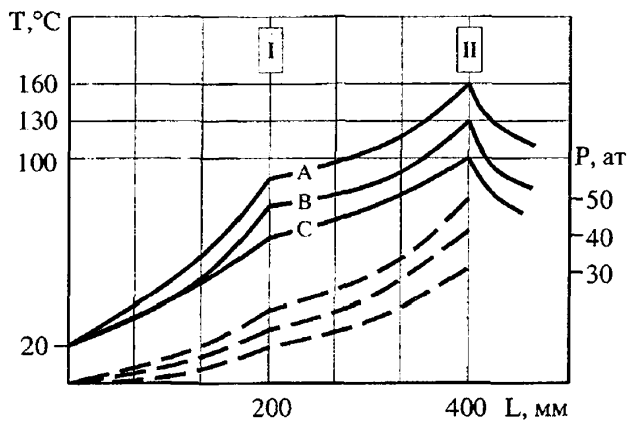


Рис. 10.1. Изменение температуры зерновой массы по длине шнека экструдера при различном диаметре шайб:

A – I- Ø 117 мм, II – Ø 125 мм

B – I- Ø 115 мм, II – Ø 124 мм

C – I- Ø 85 мм, II – Ø 117 мм

----- кривые давления;

———— кривые температуры

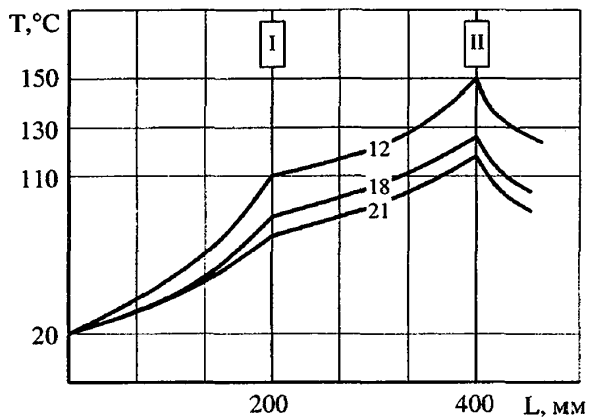


Рис. 10.2. Изменение температуры зерновой массы по длине шнека экструдера при различной влажности:
 $W = 12, 18, 21 \%$;
 I - $\varnothing 117$ мм, II - $\varnothing 125$ мм

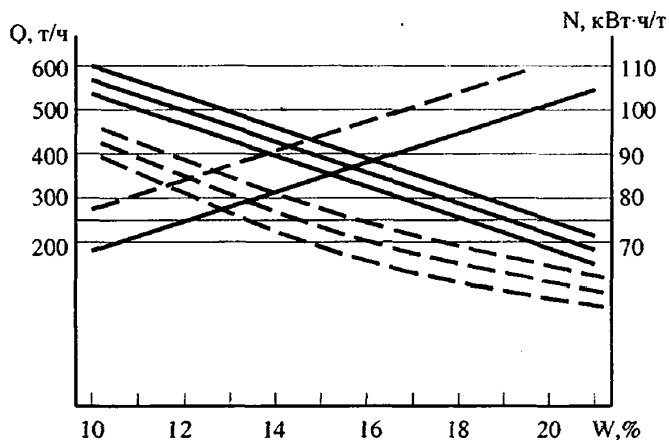


Рис. 10.3. Зависимость производительности и удельного расхода энергии от влажности продукта:
 - - - - пропаренный;
 ——— увлажненный

Анализ графических данных показывает (рис. 10.1), что с увеличением размера шайб, т. е. уменьшением зазора между шайбой и кольцом температура продукта возрастает. Применяли шайбы диаметром 85 мм (равные внутреннему диаметру шнека), Ø 117, 123, 124 и 125 мм. Температура продукта возрастала с увеличением размера шайб и изменялась от 100 до 160 °С. Дальнейшее повышение продукта приводит к перегрузке двигателя, снижению производительности и ухудшению качества продукта, т. к. происходит подгорание его. Повышение продукта происходит в первую очередь в зазоре между шайбой и кольцом и в последнем витке шнека перед шайбой, где продукт может иметь вихревое движение. Давление в шнеке также возрастает по мере продвижения к выходу шнека и может подниматься до 50 МПа при критическом режиме.

Повышение влажности продукта с 12 до 21 % приводит к снижению температуры со 150 до 110 °С (рис. 10.2). Увлажнение продукта можно осуществлять водой или паром, но большую стабильность работы дает увлажнение паром.

Соответственно, мощность, потребляемая двигателем, снижается с увеличением влажности (рис. 10.3), а производительность экструдера растет с повышением увлажнения зерна.

10.3. Исследование режимов экструдирования неизмельченного ячменя при различных способах подготовки

Исследование проводили на экструдере КМЗ-2 с конусной гайкой.

Экструдер КМЗ-2 с конусной гайкой испытывали на ячмене необрушенном, который имел следующие показатели: влажность 12,0–14,0 %, содержание сырого протеина – 16,12 %, переваримого протеина – 11,49 %, содержание крахмала – 48,0 %, содержание декстринов – 1,51 %.

Первоначально определяли возможность экструдирования неизмельченного зерна ячменя без его подготовки. Установлено (рис. 10.4), что неизмельченное зерно ячменя кондиционной влажности от 12,0 до 14,8 % экструдировается с большими затруднениями, особенно трудно добиться установившегося режима (таблица 10.1). Практически процесс экструдирования протекает неустойчиво, продукт периодически выбрасывается из камеры, стрелка амперметра в цепи основного двигателя сильно колеблется, величина тока превышает 90 А. Температура выходящего продукта достигает 160 °С, давление в камере экструдера превышает 20 кг/см² (2 МПа).

По органолептическим показателям экструдированный продукт представляет собой затвердевшее тесто с включенными нераздробленными половинками и целыми зернами.

Таблица 10.1
Технические и качественные показатели процесса экструдирования неизмельченного ячменя

№ п/п	Наименование продукта	Подготовка	Влажность, %		Содержание декстринов, %	Степень клейстеризации, %	Переваримость крахмала (in vitro), мг/г глюкозы			Кэф. фидинг-переваримости, %	Кислотное число КОН, мг/г	Температура в эктрудере, °С	Производительность, кг/ч	Удельный расход энергии, кВтч/т
			до	после			через 4 ч	через 5 ч						
1.	Ячмень исходный	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	-
			12,0	-	1,51	3,0	12,0	19,3	0,71	55,0	-	-	-	-
2.	Ячмень экструдированный	без подготовки	12,0	7,4	7,41	38	20,5	26,4	-	-	144	432	95,4	-
			12,0	9,8	3,53	35	12,2	19,3	-	-	133	417	94,9	-
3.	Ячмень экструдированный	увлажнение водой с отлежкой на 3 %	14,9	9,6	9,86	48	21,6	28,7	0,67	56,2	139	455	88,4	-
4.	" "	на 6 %	18,1	12,1	11,34	62	22,4	29,4	0,70	53,5	136	490	84,1	-
5.	" "	на 9 %	21,1	13,8	6,92	82	20,0	26,0	0,70	53,0	133	526	78,4	-
6.	Ячмень экструдированный	увлажнение водой без отлежки на 3 %	15,1	11,6	8,56	50	19,0	24,0	0,68	51,3	128	458	90,0	-
7.	" "	на 6 %	18,1	13,9	11,95	60	21,9	28,2	0,70	46,8	127	497	82,9	-
8.	" "	на 9 %	20,9	15,5	8,91	80	17,6	21,1	0,65	47,0	122	569	71,9	-

Продолжение таблицы 10.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
9.	Ячмень экструдиро- ванный "..."	пропаривание "..."	15,1	11,0	16,6	53	15,0	26,5	0,64	43,1	155	530	71,3
10.	"..."	"..."	18,0	14,0	11,6	100	31,9	36,3	0,67	47,2	146	568	68,5
11.	"..."	"..."	21,0	16,2	9,18	100	17,6	24,6	0,71	48,5	143	559	69,0
12.	Ячмень экструдиро- ванный "..."	ввод жира 1%	14,2	9,8	-	г) с вводом жира	22,3	23,9	-	-	118	508	77,2
13.	"..."	ввод жира 3%	14,2	10,2	-	-	24,4	33,9	-	-	118	566	71,6
14.	"..."	ввод жира 6%	14,2	10,8	-	-	21,3	25,8	-	-	115	690	50,6

Качественные показатели полученного продукта довольно высокие, так как вследствие воздействия высоких температуры и давления степень клейстеризации крахмала достигает 38 %, содержание декстринов – 7,4 %.

Однако в связи с тем, что процесс экструдирования при этом неустойчивый, экструдирование неизмельченного зерна кондиционной влажности на экструдере КМЗ-2 не может быть рекомендовано.

а) при увлажнении водой.

Для улучшения процесса экструдирования проводили увлажнение зерна водой, которое осуществляли путем добавления расчетного количества воды в зерновую массу до влажности 15,18 и 21 %. При увлажнении зерна водой непосредственно перед экструдированием процесс протекал устойчиво, так как экструдированный материал становился пластичнее. Ток основного двигателя колебался в пределах 63–68 А, удельный расход электроэнергии с увеличением влажности снижался с 91,8 кВтч/т при 12,0 % до 71,9 кВтч/т при 20,9 %. Производительность экструдера возрастала от 415 до 570 кг/ч. Температура продукта составляла 139 °С при $W = 12,0$ % и уменьшалась до 117 °С при $W = 18$ –21 % (рис. 10.4).

При увеличении влажности зерна, подаваемого в экструдер, влажность готового продукта также возрастала и составляла 13,9 % при $W_{\text{н}} = 18,1$ % и 15,5 % при $W_{\text{н}} = 20,9$ %. Качественные показатели продукта улучшались, степень клейстеризации возрастала от 38 до 80 %, однако наибольшее количество декстринов – 11,95 % получено при $W_{\text{н}} = 17$ –18 % (рис. 10.5), наилучшая переваримость крахмала наблюдалась при $W_{\text{н}} = 18,1$ %. На переваримость протеина изученные режимы обработки не оказывали влияния.

При обработке зерна, увлажненного водой и прошедшего отлежку в течение суток, наблюдалась более устойчивая работа экструдера. Процесс проходит при температуре 127–136 °С, производительность экструдера составляла 490–500 кг/ч. Конечная влажность продукта не превышала 13,8 % при начальном увлажнении до 21,1 %. Степень клейстеризации крахмала повысилась до 82 % при увлажнении зерна до 21,1 %, а содержание декстринов было наибольшим у экструдированного ячменя начальной влажностью 18,1 % и составляло 11,34 %. Переваримость крахмала (*in vitro*) была несколько выше, чем у экструдированного увлажненного без отлежки ячменя (рис. 10.6).

Следует отметить, что при экструдировании неизмельченного ячменя готовый продукт имеет включения нераздробленных частей зерна: половинок или несколько больших размеров, в связи с чем продукт является неоднородным.

Рис. 10.4. Зависимость температуры, производительности и удельного расхода энергии от влажности при экструдировании неизмельченного зерна

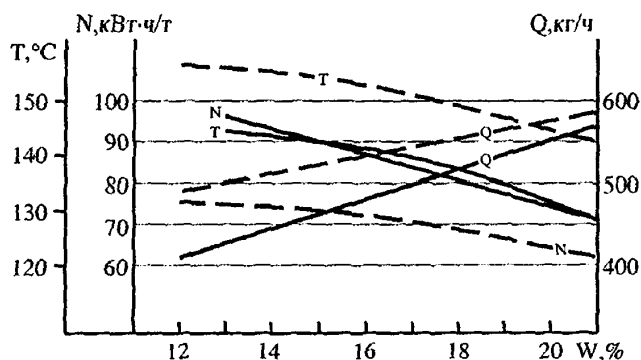


Рис. 10.5. Зависимость количества декстринов и степени клейстеризации крахмала от влажности при экструдировании неизмельченного зерна

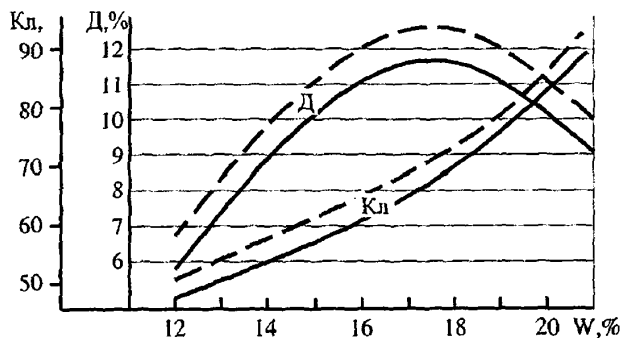
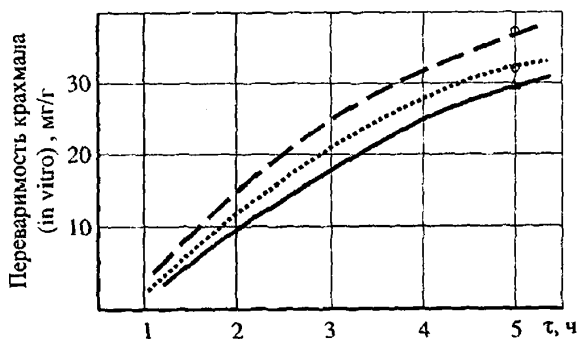


Рис. 10.6. Переваримость крахмала (in vitro) экструдированного неизмельченного зерна



б) при обработке паром.

При проведении этих исследований зерно пропаривали в шнековом пропаривателе паром под давлением, близким к атмосферному. В дальнейшем пропариватель был установлен непосредственно на экструдер вместо питателя и загрузочного бункера. Процесс экструдирования ячменя с пропариванием протекал устойчиво. Температура продукта на выходе из экструдера была в пределах 143–155 °С, производительность экструдера составляла до 568 кг/ч, удельный расход энергии снизился до 68,5 кВтч/т (рис. 10.4). Лучшие качественные показатели продукта получены при пропаривании до влажности 18 %, при этом содержание декстринов составляло 11,6 %, крахмал полностью клейстеризовался, переваримость его была наибольшей в этой серии опытов и в 2 раза превышала переваримость (in vitro) исходного ячменя (рис. 10.5–10.6). Экструдированный продукт был более однородный по внешнему виду, однако иногда встречались включения нераздробленных частиц зерен.

в) при вводе жира.

Перед экструдированием зерно смешивали с расплавленным кормовым жиром в количестве от 1 до 6 % в смесителе. Обработанное жиром зерно затем экструдировали. Температура продукта на выходе из экструдера составляла 115–118 °С, производительность экструдера возрастала от 508 кг/ч при вводе 1 % жира до 690 кг/ч при вводе 6 % жира. Однако следует отметить, что ввод жира хотя и повышает производительность экструдера, так как жир играет роль смазки, но не улучшает процесс экструзии, так как продукт практически мало вспучивается и качество его повышается незначительно. При температуре до 118 °С уже ощущается запах нагретого жира, выше 120 °С температура не повышается. Качество продукта ниже, чем при других способах экструдирования.

Таким образом, по результатам исследований неизмельченного зерна ячменя можно заключить:

- экструдирование неизмельченного ячменя кондиционной влажности невозможно;
- ввод жира не улучшает процесс экструдирования;
- процесс экструдирования протекает стабильно при увлажнении зерна водой или паром до влажности 16–18 %;
- лучшие показатели получены при пропаривании при следующем режиме: температура продукта на выходе – 140–150 °С, производительность экструдера – до 560 кг/ч;
- качество продукта повышается за счет декстринизации (до 11,6 %) и клейстеризации (до 100 %) крахмала, однако продукт имеет неоднородный состав в связи с включением в виде нераздробленных зерен.

10.4. Процесс экструдирования измельченного ячменя

а) при увлажнении водой.

Испытывали экструдер КМЗ-2, основной шнек которого снабжен конусной гайкой, и экструдер с гранулирующей головкой. Ячмень был измельчен на дробилке с ситами \varnothing 6 и \varnothing 3 мм.

Определено (таблица 10.2), что экструдирование ячменя кондиционной влажности, измельченного на ситах с отверстиями \varnothing 6,0 и \varnothing 3,0 мм на экструдере с конусной гайкой, осуществляется с большими затруднениями. Температура продукта в камере повышается до 150–170 °С, давление колеблется от 10 до 50 кг/см², процесс неустойчивый, наблюдаются выбросы продукта и хлопья.

На экструдере с гранулирующей головкой экструдировать измельченный ячмень кондиционной влажности практически невозможно, шнек экструдера забивается.

Для улучшения процесса экструдирования измельченное зерно увлажняли водой, которую подавали из расходного бака по шлангу непосредственно в приемный патрубок шнека, поскольку никакими другими приспособлениями для ввода воды экструдер не оборудован. Расход воды определяли и устанавливали по ротаметру.

Показано, что добавление воды стабилизирует процесс экструдирования, причем с повышением влажности зерна пластичность экструдированной массы улучшается, производительность экструдера увеличивается.

Однако экструдированный продукт имеет лучшие показатели при определенной влажности. Экспериментально установлено, что процесс экструдирования протекает довольно стабильно, получаемый продукт имеет высокое качество: содержание декстринов возросло до 14,9 %, переваримость крахмала в 4 раза выше, чем у исходного, при увлажнении зерна до расчетной влажности 15–16 % (подвод воды 12 литров в час или 3 % к исходному продукту). Температура продукта на выходе составляет при этом режиме – 140–150 °С, влажность конечного продукта – 9,0–10,0 %. При вводе воды в большом количестве температура продукта на выходе из экструдера понижается до 125 °С, продукт получается менее пористым, влажность его высокая – до 15 %, качественные показатели более низкие.

Таким образом, лучшим режимом экструдирования ячменя следует считать:

- ввод воды в измельченную массу из расчета увлажнения ее на 16–17 %, что составляет для экструдера КМЗ-2 – 12–14 литров в час или 3,0–4,0 %;
- температура продукта в камере шнека – 140–150 °С;
- производительность – 350–400 кг/ч.

Таблица 10.2

Технические и качественные показатели процесса экструдирования измельченного ячменя при увлажнении водой

№ п/п	Наименование продукта	Подготовка	Влажность, %		Содержание декстринов, %	Степень клейстеризации, %	Переваримость крахмала (in vitro), мг/г глюкозы		Кoeffициент переваримости крахмала, %	Кислотное число КОН, г	Температура в камере экструдера, °С	Производительность, кг/ч	Удельный расход эл. энергии, кВт/ч
			до	после			через 4 ч	через 5 ч					
1.	Ячмень исходный		11,8	-	2,0	3,0	9,1	10,8	0,71	55,0	-	-	-
2.	Ячмень измельченный на сите Ø 6мм и экструдированный "2"	без увлажнения	11,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3.	"	увлажнение водой в шнеке экструдера	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4.	"	на 3%	14,8	8,8	14,2	94	34,5	43,2	0,67	43,9	140	350	114
5.	"	на 6%	16,7	10,7	14,9	80	36,1	46,3	0,69	47,8	130	412	97
6.	Ячмень измельченный на сите Ø 3мм и экструдированный "2"	на 9%	19,0	15,1	8,82	80	31,2	38,4	0,70	54,2	125	460	87
		без увлажнения	11,8	7,2	12,8	100	32,8	38,2	0,68	49,5	150	-	процесс нестабильный
7.	"	увлажнение водой в шнеке экструдера	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8.	"	на 3%	14,7	11,6	13,6	88	28,2	34,0	0,69	45,8	145	408	98,0
		на 6%	-	13,4	14,5	100	33,6	42,5	0,72	46,4	140	285	140,4

процесс не стабильный

б) при различной крупности измельчения.

Для изучения влияния крупности измельчения зерна на процесс экструдирования были подготовлены следующие партии ячменя:

- ячмень измельченный, полученный проходом сита с отверстиями \varnothing 1,2 мм (№ 12);
- ячмень измельченный, полученный проходом сита № 20 и сходом сита № 12;
- ячмень измельченный, полученный проходом сита № 30 и сходом сита № 20;
- ячмень измельченный, полученный проходом сита № 40 и сходом сита № 30;
- ячмень измельченный на дробилке с ситом № 30;
- ячмень измельченный на дробилке с ситом № 60.

Экструдирование измельченного ячменя проводили с увлажнением его водой, которая подавалась из расходного бака через ротаметр непосредственно в приемный пагтрубок шнека экструдера.

Результаты исследований показывают (таблица 10.3), что при экструдировании измельченного зерна любой крупности без увлажнения температура продукта поднималась до 150–158 °С, процесс экструдирования постоянно нарушается, так как продукт в шнеке экструдера "заваривается", влажность конечного продукта 7–8 %. При вводе воды из расчета увлажнения исходной смеси до 16 % процесс экструдирования стабилизировался. Температура продукта на выходе из экструдера составляла 148–150 °С, влажность продукта после охлаждения в пределах 9,1–10,3 %. Продукт был вспучен, имел пористую структуру, представлял собой однородную массу, по виду напоминающую затвердевшее тесто. Однородность была выше у продукта, исходная крупность которого была меньше. Содержание декстринов было во всех опытах высоким, в пределах 14,8–15,9 %, степень клейстеризации составляла 90–95 %. Больше декстринов – 15,9 % – содержал продукт с исходной крупностью – проход сита № 30 (сход сита № 20), полная клейстеризация крахмала получена у продукта с исходной крупностью – проход сита № 12. Переваримость крахмала экструдированного продукта во всех образцах была значительно выше, чем у исходного ячменя.

Однако сделать вывод об оптимальной крупности исходного продукта для данного типа экструдера не представляется возможным. По органолептическим показателям более качественный продукт получен при меньшей крупности исходного сырья, но по биохимическим анализам явного преимущества не установлено. Поэтому можно рекомендовать с учетом технико-экономических показателей перед экструдированием измельчать зерно на дробилке с ситом с отверстиями \varnothing 3,0 мм.

Таблица 10.3
Технические показатели качества процесса экструдирования ячменя, измельченного до различной крупности

№ п/п	Наименование продукта	Подготовка	Влажность, %		Содержание декстринов, %	Степень клейстеризации, %	Переваримость крахмала (in vitro), мг/г глюкозы		Коэффициент переваримости, %	Кислотное число мг-КОЭ	Температура в экструдере, °С	Производительность, кг/ч	Удельный расход эл. энергии, кВтч/т
			до	после			через 4 ч	через 5 ч					
1.	Ячмень измельченный, проход сита \varnothing 1,2 мм экструдированный	без увлажнения	13,6	7,5	10,7	100	30,6	50,0	0,70	59,3	170	290	124
2.	Ячмень проход \varnothing 2,0 - сход \varnothing 1,2 мм экструдированный	".."	13,6	7,9	10,9	93	31,8	39,0	0,69	61,3	150	360	115
3.	Ячмень измельчен. проход \varnothing 2,0 - сход \varnothing 1,2 мм и экстр.	увлажненный в шнеке экструдера на 3 %	16,5	10,3	14,8	93	36,7	46,2	0,72	53,1	150	414	96
4.	Ячмень измельчен. проход \varnothing 3,0 - сход \varnothing 2,0 мм и экстр.	без увлажнения	13,6	8,0	11,6	95	32,7	37,5	0,67	55,2	158	365	115
5.	".."	увлажненный в шнеке экструдера на 3 %	16,6	9,1	15,9	90	38,0	48,7	0,69	66,8	148	429	93
6.	Ячмень измельчен. проход \varnothing 4,0 - сход \varnothing 3,0 мм и экстр.	без увлажнения	13,6	8,7	11,3	95	31,7	38,7	0,65	56,0	154	383	104
7.	".."	увлажненный в шнеке экструдера на 3 %	16,6	10,2	15,6	79	33,7	42,5	0,70	58,3	150	408	99

в) при пропаривании измельченного зерна зерна.

Одним из лучших приемов, повышающих эффективность работы экструдера, по литературным данным, является предварительное пропаривание смеси. В связи с этим с целью усовершенствования конструкции экструдера и улучшения процесса экструдирования зерновых компонентов был разработан и изготовлен смеситель-пропариватель, который установили на экструдер вместо питателя. Смеситель-пропариватель представляет собой цилиндрическую камеру диаметром 200 мм и длиной 670 мм, в которой помещен вращающийся ротор с лопатками. Лопатки толщиной 6 мм и шириной 30 мм установлены под углом к оси с шагом ≈ 50 мм и смещением на 90° . Привод ротора осуществляется от отдельного двигателя мощностью 3 кВт, частота вращения ротора 360 об/мин. Пар подводится через штуцер, установленный в верхней части пропаривателя. Продукт, поступивший в смеситель, перемещается вдоль его за счет угла установки лопаток и небольшого (порядка 5 град) наклона смесителя. При интенсивном перемешивании продукт обрабатывается паром, поступающим через штуцер из системы.

В результате пропаривания ячменя производительность экструдера повышается, удельный расход электроэнергии снижается (рис. 10.7), а количество декстринов в продукте (рис. 10.8) и переваримость крахмала (in vitro) также увеличивается, по сравнению с увлажненным зерном (рис. 10.9, табл. 10.4).

10.5. Режимы экструдирования смеси ячменя и отрубей при различной подготовке

Подготовка ячменя была выполнена по трем вариантам:

- 1 – увлажнение водой до 15, 18 и 20 % и последующая отлежка в течение 3-х суток;
- 2 – увлажнение водой до 18 % и отлежка в течение 3-х часов;
- 3 – увлажнение водой до 17 % без отлежки.

Измельчение зерна осуществлялось на молотковой дробилке ДДК на сите с отверстиями $\varnothing 3,0$ мм. Наблюдение за процессом измельчения показывает, что с повышением влажности зерна измельчение его затрудняется. Так уже при измельчении зерна влажностью 18 % производительность дробилки снижается на 25–30 %, а при измельчении зерна влажностью 20 % процесс протекает с затруднениями, так как наблюдается замазывание сит.

Измельченный ячмень смешивался с отрубями исходной влажностью 14,5 % в соотношении, предусмотренном рецептом СК-II (ячмень – 50 % и отруби 10 %), и смесь экструдировалась.

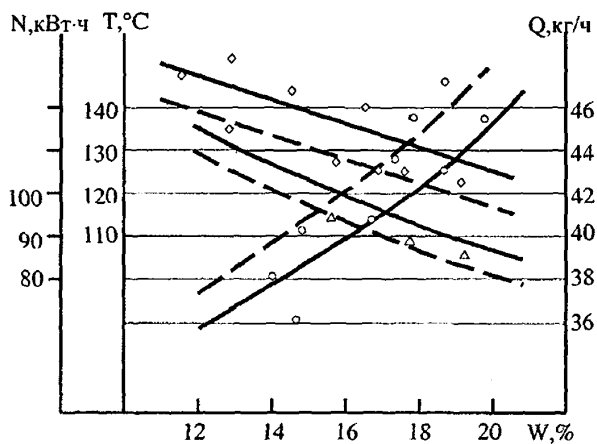


Рис. 10.7. Зависимость температуры, производительности и удельного расхода энергии от влажности при экструдировании измельченного зерна
 - - - пропаренного;
 — увлажненного

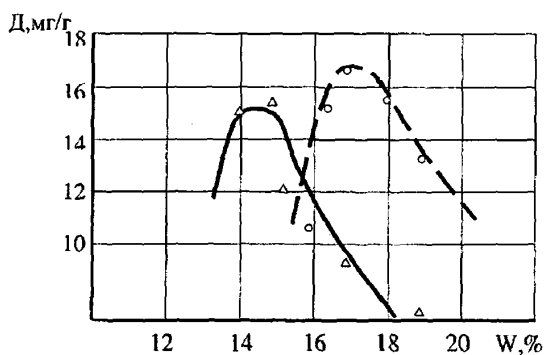


Рис. 10.8. Зависимость количества декстринов от влажности при экструдировании измельченного зерна
 - - - пропаренного;
 — увлажненного

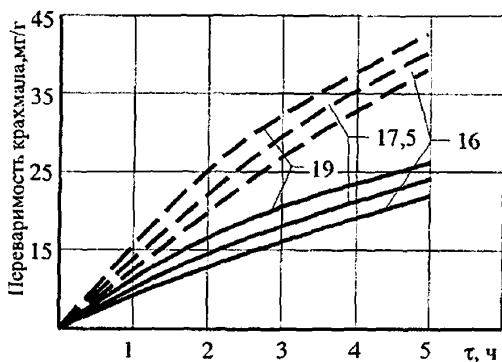


Рис. 10.9. Переваримость крахмала (*in vitro*) при экструдировании измельченного зерна (при различном увлажнении, %)
 - - - пропаренного;
 — увлажненного

Таблица 10.4

Технические показатели и показатели качества процесса экструдирования
ячменя, измельченного и пропаренного в смесителе-пропаривателе

№ оп.	Наименование продукта	Подготовка	Влажность, % после		Содержание декстринов, %	Степень клейстеризации, %	Переваримость крахмала (in vitro), мг/г глюкозы		Коэффициент переваримости, %	Кислотность, мг. КОН / г	Давление пара, МПа	Расход пара, кг/ч		Температура, °С	Производительность, кг/ч	Удельный расход эл. энергии, кВт·ч / т
			пропаривания	экструдирования			через 4 ч	через 5 ч				в пропаривателе	в экстракторе			
1.	Ячмень измельченный Ячмень пропаренный экструдированный	Исходный измельчение на сите Ø 3,0, пропаривание в смесителе-пропаривателе	13,6	8,8	15,0	100	35,6	46,7	0,70	65	-	-	149	420	94	
2.	" "	" "	16,3	9,8	14,5	100	29,5	41,5	0,63	58	0,18	28	78	400	100	
3.	" "	" "	17,1	11,5	16,1	100	31,2	43,0	0,62	59	0,18	30	77	420	100	
4.	" "	" "	17,8	14,0	14,8	100	31,0	41,0	0,60	59	0,20	32	80	440	91	
5.	" "	" "	18,0	14,2	15,0	100	30,5	40,2	0,62	57	0,24	34	83	460	87	
6.	" "	" "	19,5	15,0	13,3	100	29,2	39,6	0,61	57	0,24	34	83	470	85	

Установлено, что экструдирование смеси ячменя с отрубями в соотношении, предусмотренным рецептом СК-II влажностью выше 15 % возможно без применения пластификаторов (воды, пара и др.).

При производительности экструдера 350 кг/ч токовая нагрузка двигателя составляла 50 А, температура продукта на выходе из экструдера – 110–135 °С, конечная влажность продукта 4,0–7,2 % (таблица 10.5, опыты 1–6). По органолептическим данным продукт имел пористую однородную структуру. Качество продукта довольно высокое, так как содержание декстринов в обработанном при 120 °С продукте составляло 12,4–13,8 %, крахмал полностью клейстеризован, переваримость его возросла в 3 раза. За счет перекрытия выходящих отверстий температура продукта повысилась до 135 °С, однако производительность экструдера при этом составляла 350 кг/ч (опыты 3–4). По внешнему виду продукт был более вспученным, однородным, имел пористую структуру.

Повышение производительности, а следовательно, количества проходящей через шнек экструдера смеси, приводит к увеличению токовой нагрузки двигателя, но не повышению температуры продукта. Так, при увеличении производительности до 570 кг/ч ток двигателя возрос до 85–90 А, а температура выходящего продукта даже несколько снизилась – до 105 °С. Влажность продукта составляла 11,4 % при производительности 460 кг/ч, и 12,2 % – при 570 кг/ч. По органолептическим показателям продукт был хуже, так как имел менее пористую и однородную структуру.

Следовательно, конструкция основного шнека экструдера не позволяет при высокой производительности обеспечить требуемую температуру процесса.

Увеличение влажности исходной смеси приводит к стабилизации процесса, более устойчивой работе экструдера. При экструдировании смеси ячменя, прошедшего отлежку в течение 3-х суток после увлажнения, и отрубей влажностью 17,6 % производительность экструдера была в пределах от 350 до 570 кг/ч (таблица 10.5, опыты 7–11).

На режиме с производительностью 350 кг/ч температура продукта составляла 105–108 °С и конечная влажность его 13,0–10,8 %. Качество продукта было высоким, так как содержание декстринов достигало 15,08 % и переваримость его возросла в 3 раза. Продукт был однородным по виду, вспученным, с приятным запахом и вкусом.

Увеличение производительности до 570 кг/ч приводило к тому, что температура продукта на выходе снизилась до 100 °С, влажность возросла до 13,0 %. Качество продукта по внешнему виду несколько хуже, чем при производительности 350 кг/ч.

Таблица 10.5

Режимы экструдирования смеси ячменя и отрубей (5:1) с пропариванием увлажненного зерна водой

№ п/п	Наименование продукта	Подготовка	Влажность, %		Содержание декстринов, %	Степень клейстеризации %	Переваримость крахмала (in vitro), мг/г глюкозы		Коэффициент перевариваемости протейна, %	Кислотное число мг-КОН/г	Температура в экструдере, °С	Производительность, кг/ч	Удельный расход эл. энергии, кВтч/т
			до	после			через 4 ч	через 5 ч					
1.	Смесь ячменя и отрубей (5:1)	исходная	13,6	-	1,51	-	6,9	12,9	0,68	37,8	-	-	-
2.	Смесь ячменя и отрубей (5:1)	Увлажн. зерна ячменя водой до 15%, отволаживание в теч. 3-х суток	15,0	7,2	-	-	-	-	-	-	110	350	114
3.	экструдированная	измельч. ячм. на дробилке на сите с отв. Ø 5 мм смеш. с отруб. (5:1)	15,0	6,4	12,40	100	27,2	37,6	0,65	56,3	115	350	114
4.		Увлажн. зерна ячменя водой до 18%, отволаживание в теч. 3-х суток	15,0	6,2	13,82	100	30,8	41,6	0,65	100,1	120	350	114
5.		измельч. ячм. на дробилке на сите с отв. Ø 5 мм смеш. с отруб. (5:1)	15,0	4,0	-	-	-	-	-	-	135	350	114
6.		Увлажн. зерна ячменя водой до 18%, отволаживание в теч. 3-х суток	15,0	11,4	-	-	-	-	-	-	110	460	87
7.	".."	измельч. ячм. на дробилке на сите с отв. Ø 5 мм смеш. с отруб. (5:1)	15,0	12,2	-	-	-	-	-	-	105	570	70
8.		Увлажн. зерна ячменя водой до 18%, отволаживание в теч. 3-х суток	17,6	13,0	-	-	-	-	-	-	115	350	114
9.		измельч. ячм. на дробилке на сите с отв. Ø 3 мм смеш. с отруб. (5:1)	17,6	10,8	15,08	100	32,9	38,3	0,64	59,3	108	350	114
10.		Увлажн. зерна ячменя водой до 16%, отволаживание в теч. 3-х суток	17,6	14,0	-	-	-	-	-	-	100	570	70
11.		измельч. ячм. на дробилке на сите с отв. Ø 3 мм смеш. с отруб. (5:1)	17,6	12,8	-	-	-	-	-	-	110	570	70
		Увлажн. зерна ячменя водой до 20%, отволаживание в теч. 3-х суток	17,6	6,3	18,85	100	33,4	45,7	0,65	61,3	120	370	108

Продолжение таблицы 10.5

12.	Смесь ячменя и отрубей (5:1)	Увлажн. зерна ячменя водой до 18%, измельч. ячм. на дробилке на сите с отв. Ø 3 мм смеш. с отруб. (5:1)	17,8	-	-	-	-	-	-	-	116	350	114
13.	экструдированная	Увлажн. зерна ячменя водой до 16%, отволаживание в теч. 3-х суток	17,8	10,5	11,5	100	32,5	35,4	0,65	58,1	130	380	105
14.		измельч. ячм. на дробилке на сите с отв. Ø 3 мм смеш. с отруб. (5:1)	17,8	8,6	12,5	100	32,7	36,6	0,64	63,2	133	350	114
15.		Увлажн. зерна ячменя водой до 16%, отволаживание в теч. 3-х суток	17,8	9,2	10,8	100	31,6	35,8	0,66	60,2	132	460	87
16.		измельч. ячм. на сите с отв. Ø 3 мм смеш. с отруб. (5:1)	17,8	-	-	-	-	-	-	-	124	540	74
17.	".."	Увлажн. зерна ячменя водой до 16%, отволаживание в теч. 3-х суток	15,1	5,4	-	-	-	-	-	-	122	350	114
18.		измельч. ячм. на дробилке на сите с отв. Ø 3 мм смеш. с отруб. (5:1)	15,1	6,0	10,6	100	25,1	33,7	0,67	61,5	130	350	114
19.		Увлажн. зерна ячменя водой до 20%, отволаживание в теч. 3-х суток	15,1	6,4	10,0	100	23,8	32,6	0,66	68,0	126	460	87
20.		измельч. ячм. на дробилке на сите с отв. Ø 3 мм смеш. с отруб. (5:1)	15,1	6,8	-	-	-	-	-	-	132	460	87
21.		Увлажн. зерна ячменя водой до 20%, отволаживание в теч. 3-х суток	15,1	-	-	-	-	-	-	-	130	640	62
22.	".."	измельч. ячм. на сите с отв. Ø 3 мм смеш. с отруб. (5:1)	19,8	14,6	4,53	82	19,4	22,8	0,66	43,9	92	570	70
23.		Увлажн. зерна ячменя водой до 20%, отволаживание в теч. 3-х суток	19,8	15,4	-	-	-	-	-	-	92	570	70
24.		измельч. ячм. на дробилке на сите с отв. Ø 3 мм смеш. с отруб. (5:1)	19,8	8,0	15,99	100	28,7	35,7	0,69	53,1	115	350	114
25.		Увлажн. зерна ячменя водой до 16%, отволаживание в теч. 3-х суток	19,8	16,0	-	-	-	-	-	-	93	570	70
26.		измельч. ячм. на сите с отв. Ø 3 мм смеш. с отруб. (5:1)	19,8	9,2	11,7	100	29,8	32,6	0,65	55,2	125	220	182

При перекрытии выходящих отверстий температура продукта возрастала до 120 °С, однако токовая нагрузка двигателя увеличивалась до 90–95 А. Влажность экструдированного продукта снижалась до 10,6 %. Продукт имел высокие качественные показатели, содержание декстринов в нем составляло 18,85 %. Однако по токовой нагрузке двигателя этот режим работы близок к перегру-зочному.

При экструдировании смеси отрубей и ячменя, увлажненного без отлеж-ки перед измельчением, наблюдалась также стабильная работа экструдера (таблица 10.5, опыты 12–16). Производительность экструдера составляла 350 кг/ч при температуре продукта 116–130 °С. Качество продукта было до-статочно высоким. При производительности 460 кг/ч температуру в экстру-дере доводили до 132 °С при высоком качестве продукта. Дальнейшее повы-шение производительности привело к снижению температуры продукта и ос-тановке двигателя из-за перегрузки.

При вводе воды в зерновую массу перед измельчением (таблица 10.5, опы-ты 17–21), экструдирование возможно. Неустойчивая работа экструдера на-блюдалась при температуре до 120 °С, при более высокой температуре эк-струдер работал устойчиво без нарушений процесса, получаемый продукт был хорошего качества, производительность экструдера достигала 460 кг/ч.

Некоторое снижение качества экструдированной смеси отрубей и ячменя, увлажненного водой при небольшой длительности отлежки, можно объяснить тем, что при отволаживании происходит набухание крахмала, а также биохимические процессы, вызывающие гидролиз крахмала до моносахаров.

Таким образом, результаты исследований показывают, что длительность отволаживания увлажненного водой зерна не оказывает существенного влия-ния на процесс экструдирования и качество продукта.

Высокая влажность исходной смеси обеспечивает устойчивую работу эк-струдера и высокую его производительность, однако температура выходяще-го продукта имеет невысокую величину – 92–94 °С, а влажность продукта – превышает допускаемую по нормативно-технической документации – 14,6–15,4 % (таблица 3.56). Худшие результаты полученной при высокой произво-дительности – 570 кг/ч и полностью открытых выходных отверстиях – темпе-ратура продукта 92 °С, влажность – 16,0 %.

Перекрытие отверстий с целью повышения температуры и качественных показателей продукции приводит к снижению производительности до 350–220 кг/ч. При этом можно добиться высокого качества продукта (содержание декстринов до 20 %) при температуре экструдирования 125 °С, но токовая нагрузка двигателя приближается к критической.

Таким образом, на основании исследований по экструдированию увлажненного до различной влажности и измельченного ячменя в смеси с отрубями можно сделать заключение:

- подготовку к экструдированию можно проводить путем предварительного увлажнения зерна водой (до 17–18 %) и последующего его измельчения;
- длительность отволаживания зерна перед измельчением не имеет существенного значения для процесса экструдирования и качества продукта;
- режимы экструдирования для экструдера КМЗ-2 следующие:
 - начальная влажность смеси – до 17 %,
 - температура обработки в экструдере – выше 120 °С,
 - производительность экструдера – 350–400 кг/ч.

Испытания экструдера с пропаривателем проводили при различном расходе и давлении пара и с установкой греющих шайб разного диаметра.

На основании испытаний установлено, что пропаривание смеси стабилизирует процесс, экструдер работает устойчиво, без колебаний по нагрузке.

Результаты испытаний (таблица 10.6, опыты 1–4), полученные с применением шайб $\varnothing 117,5$ мм и $\varnothing 125$ мм, показывают, что в пропаривателе смесь нагревается до температуры 70–80 °С при производительности 350 кг/ч. Расход пара в изучаемых пределах изменения от 27 до 42 кг/ч не оказывал существенного влияния на температуру пропаренной смеси, а в основном на увеличение влажности, которая в результате пропаривания соответственно с 13 до 16,0, 19,8 %. Влажность экструдированного продукта после охлаждения была в пределах 8,4–13,0 %. Токовая нагрузка двигателя составляла 50–60 А.

Температура выходящего из экструдера продукта составляла 120 °С при расходе пара 27–42 кг/ч и производительности экструдера 350 кг/ч. При расходе пара выше 31 кг/ч влажность конечного продукта была выше – 13,8 % и по органолептическим показателям продукт был недостаточно высокого качества. Лучшие показатели качества продукта получены при режиме: расход пара 27–30 кг/ч, температура – 120 °С, продукт был вспученным и однородным по структуре, содержание декстринов достигало 16,2 %, переваримость его повысилась более чем в 2 раза.

Повышение производительности экструдера до 640 кг/ч (таблица 10.6, опыты 7–8) при одном и том же расходе пара – 38 кг/ч, давлении 0,18 МПа приводило к увеличению нагрузки двигателя до 70–80 А. Температура пропаренной смеси была несколько ниже – 60–70 °С, температура продукта на выходе из экструдера – 105–110 °С. Начальная влажность смеси – 13,4 %, после пропаривания – 17,5–16,3 % и после экструдирования – 10,1–10,2 %).

Качественные показатели продукта были несколько ниже, чем при производительности 350 кг/ч.

Таблица 10.6
Режимы экструдирования смеси ячменя и отрубей с проприаном в смесителе-проприателе

№ п/п	Наименование продукта	Подготовка	Влажность, %		Содержание декстринов, %	Степень клейстеризации крахмала, %	Переваримость крахмала (in vitro) мг/г глюкозы		Коэффициент переваримости проприана	Кислотное число пара КОН, г/ч	Расход пара кг/ч	Давление пара МПа	Температура, °С		Производительность кг/ч	Удел. расход эл. энергии, гнн, кВт.ч			
			после пропаривания	после экструдирования			через 4 ч	через 5 ч					в пропарителе	в экструдере					
1.	Смесь ячменя и отрубей (5:1)	Исходная ячменя на сите с отверстиями Ø3 мм, смешивание с отрубями (5:1), пропаривание смеси в смесителе-проприателе Шайбы на экструдере Ø117,5 и Ø125 мм	13,0	-	1,4	-	7,5	13,0	0,65	45,0	-	-	-	-	-	-	-		
2.			19,8	15,4	-	-	-	-	-	-	42	0,34	79	120	350	114	-		
3.			17,8	15,0	-	-	-	-	-	-	32	0,24	88	120	350	114	-	-	
4.			17,5	14,2	-	-	-	-	-	-	34	0,24	88	120	350	114	-	-	
5.			17,1	13,8	-	-	-	-	-	-	31	0,24	80	120	350	114	-	-	
6.			17,0	12,0	11,93	100	100	100	26,8	0,61	41,5	0,24	70	120	350	114	-	-	
7.			16,3	8,4	16,2	100	100	100	19,5	0,56	46,8	27	0,24	70	120	350	114	-	-
8.			17,5	10,2	10,24	100	100	100	24,3	0,63	52,0	38	0,18	78	105	460	87	-	-
			16,3	10,1	13,02	100	25,2	35,2	0,63	51,0	28	0,18	75	110	640	63	-	-	
9.	" "	То же. Шайбы на экструдере Ø85 мм на входе, Ø85 мм на выходе	18,0	14,4	3,53	90	10,9	15,2	0,59	47,2	34	0,18	55	90	460	87	-	-	
10.			15,4	12,6	7,3	100	14,7	16,2	0,55	54,2	27	0,18	62	100	460	87	-	-	
11.			14,2	11,2	8,38	100	18,2	19,5	0,63	43,9	23	0,18	67	115	460	87	-	-	
12.			13,4	10,6	9,3	100	18,0	21,3	0,63	49,5	без	без	пары	-	120	350	114	-	-

При применении шайб $\varnothing 85$ и $\varnothing 85$ мм также обеспечивалась высокая производительность – 460 кг/ч (таблица 10.6, опыты 9–12). Однако при этих шайбах следует меньше увлажнять смесь перед экструдированием, иначе температура продукта в экструдере имеет величину ниже 100 °С. При пропаривании смеси до влажности 14,2–15,4 % температура продукта в пропаривателе возрастала до 62–67 °С, в экструдере – до 100–115 °С. Качество продукта было удовлетворительным.

На основании результатов исследований можно заключить:

- при оборудовании экструдера пропаривателем значительно упрощается подготовка сырья к экструдированию;
- пропаривание смеси стабилизирует процесс экструдирования и обеспечивает высокое качество продукта, при этом можно применять шайбы меньшего диаметра;
- режим работы экструдера, оборудованного пропаривателем:
 - расход пара – 25–38 кг/ч (50–75 кг/т),
 - давление пара – 0,1–0,3 МПа,
 - влажность смеси после пропаривания – 16–18 %,
 - температура пропаренной смеси – 70–80 °,
 - температура продукта в экструдере – 120–130 °С,
 - производительность экструдера – 500–600 кг/ч.

Исследование процесса экструдирования смеси измельченного зерна и отрубей при увлажнении водой в смесителе-увлажнителе проводили на экструдере КМЗ-2, на котором вместо питателя был установлен смеситель лопастного типа. В шнеке экструдера были установлены шайбы $\varnothing 117,5$ мм и $\varnothing 125,0$ мм. Для обработки использовали смесь ячменя и отрубей в соотношении, предусмотренном рецептом СК-II, влажностью 13,4 %. Смесь увлажняли на 3–5 %, при экструдировании воду вводили в смеситель, при этом влажность смеси, поступающей в шнек экструдера, составляла 16,8–17,4 %.

Результаты опытов показывают (таблица 10.7), что температура продукта на выходе из экструдера при производительности 320 кг/ч и нагрузке по току 70–72 А составляла всего 94–98 °С, влажность его – 11,6–12,8 %. По органолептическим показателям продукт был недостаточно высокого качества.

За счет перекрытия выходящих окон в гранулирующей головке температура продукта возрастала до 110 °С, однако при этом ток двигателя достигал до 90 А. При увлажнении смеси до 16,8–17,4 % влажность продукта после экструдирования составляла 9,6–9,8 %, содержание декстринов – от 6,01 до 10,23 %, степень его клейстеризации – 91–96 %.

Увеличение производительности до 430 кг/ч приводило к возрастанию тока двигателя до 95 А, но температура продукта понизилась до 100 °С, что вызвало ухудшение качества продукта.

Таблица 10.7
 Режимы экструдирования смеси ячменя и отрубей с увлажнением водой в смесителе-увлажнителе

№ п/п	Наименование продукта	Подготовка	Влажность, %		Содержание декстринов, %	Степень клейстеризации крахмала, %	Преваримость крахмала (in vitro)		Коэффициент переваримости протены на %	Кислотное число м.г. КОН / г	Температура в экструдере °С	Производительность кг/ч	Удельный расход эл. энергии, кВт.ч / т
			перед экструдированием	после экструдирования			через 4 ч	через 5 ч					
1.	Смесь ячменя и отрубей (5:1)	Исходная Измельчение ячменя на сите с отверстиями Ø 3 мм, смешивание с отрубями, увлажнение смеси водой в смесителе-увлажнителе. Шайбы на экструдере Ø 117,5 и Ø 125 мм	13,0	-	1,40	-	7,5	13,0	0,7	45,0	-	-	-
2.			16,8	9,8	6,01	91	20,66	26,02	0,67	46,8	98	320	125
3.			17,4	9,8	8,04	96	27,01	33,48	0,66	43,3	100	320	125
4.			17,4	9,6	10,23	91	25,59	29,34	0,66	39,3	110	320	125
5.			19,4	14,8	2,34	95	16,4	18,4	0,72	43,0	88	320	125
			19,2	14,2	2,71	94	18,5	19,5	0,69	45,8	78	430	93
6.	"с."	То же. Шайбы на экструдере Ø 85 мм и Ø 85 мм	19,5	13,4	2,55	56	18,6	28,1	0,77	40,9	60	550	73
7.			20,6	16,0	2,43	59	18,2	22,1	0,69	36,4	65	430	93

Установка новых греющих шайб \varnothing 85 мм привело к тому (таблица 10.7), что температура продукта на выходе была в пределах 60–65 °С при изменении производительности от 420 до 550 кг/ч. Влажность исходной смеси была в пределах 19,5–20,6 %, после экструдирования снизилась на 4–6 %. Качественные показатели продукта были низкие, продукт представлял собой непроваренную тестообразную массу, степень клейстеризации крахмала составляла 64–59 %, содержание декстринов возросло на 1,0–1,5 %.

Следовательно, применение шайб меньших диаметров при увлажнении смеси водой не приводит к повышению температуры продукта до требуемой величины, снижению влажности и повышению качественных показателей.

Таким образом, экструдирование зерновых компонентов на экструдере КМЗ-2 возможно осуществлять при увлажнении измельченной смеси непосредственно перед экструдированием.

Лучшие качественные показатели продукта обеспечиваются при следующем режиме:

- увлажнение смеси до 16–17 %;
- температура продукта – выше 110 °С;
- производительность экструдера – 300–320 кг/ч.

При исследовании ввода жира в измельченную смесь жир вводили в смесь ячменя и отрубей в количестве, предусмотренном рецептом СК-II, т. е. 2,5 % с тем, чтобы все количество жира было введено за один прием. Начальная влажность подготовленной смеси составляла 12,8 %.

Опыты по экструдированию показывают (таблица 10.8), что ввод жира не улучшает процесс, экструдер работает нестабильно, наблюдается его забивание, хлопки, продукт выходит не из всех четырех отверстий, выделяется запах "горелого" жира. Производительность экструдера не превышала 350 кг/ч, при токовой нагрузке двигателя 55–65 А. Температура продукта на выходе достигала 145 °С, влажность его 7,2–7,6 %.

Таким образом, ввод жира в экструдруемые зерновые компоненты в количестве, предусмотренном рецептом, не обеспечивает стабильную работу экструдера и не может быть рекомендован для производства.

10.6. Режимы экструдирования смеси компонентов, входящих в состав рецепта СК-II

В рецепт полнорационного комбикорма СК-II для поросят-сосунов входят зерновые компоненты (ячмень и отруби), белковые (подсолнечный или соевый шрот, дрожжи, травяная и рыбная мука, сухое обезжиренное молоко), минеральные и премикс. Из перечисленных видов сырья нецелесообразно

Таблица 10.8

Режимы экструдирования смеси ячменя и отрубей с введенным эфиром

№ п/п	Наименование продукта	Подготовка	Влажность, %		Со- дер- жа- ние декст- ри- нов, %	Сте- пень кле- й- стери- зации крах- мала, %	Переваримость крахмала (in vitro) мг/г глюкозы		Коэф- фици- пере- вари- мости про- ду- кта, %	Кис- лот- ное число КОМ г	Тем- пера- тура в экст- руде- ре, °С	Про- изво- дите- льнос- ть, кг/ч	Удел. расход эл- энер- гии кВтч т	Примечание
			до	после			через 4 ч	через 5 ч						
1.	Смесь ячменя и отрубей	Ввод жира в смесь ячменя и отрубей в количестве 2,5%	12.8	7.8	-	-	-	-	-	-	145	350	114	Забился экс- трудер
2.			12.8	7.6	-	-	-	-	-	-	130	350	114	Неустойчи- вая работа экструдера
3.	"."	"."	12.8	7.2	8.55	85	19.4	21.07	0.65	27.6	120	320	182	Продукт вы- ходит из од- ного отвер- стия

подвергать обработке в экструдерах сухое молоко, минеральное сырье, пре-микс и, следовательно, полный набор компонентов, т. е. комбикорм.

Поэтому изучали экструдирование смеси компонентов в различных вариантах их набора без минеральной и витаминной части. Смесь оставляли в той пропорции, в которой изучаемые компоненты входят в состав рецепта СК-II. Изучение процесса экструдирования проводили на экструдере с конусной гайкой без подготовки компонентов и с предварительным увлажнением и пропариванием.

Экспериментально установлено (таблица 10.9), что смесь, составленная из ячменя, отрубей, соевого шрота, дрожжей, рыбной муки, фосфатидного концентрата и жира можно экструдировать без предварительной подготовки (опыты 7–9). Такие компоненты, как жир и фосфатидный концентрат, служат в качестве пластификаторов и способствуют продвижению сыпучей массы в шнеке-экструдере. Производительность экструдера составляла 430–440 кг/ч, удельный расход электроэнергии 70–86 кВт·ч/т. Температура прессуемой смеси составляла 134–139 °С. При начальной влажности 13,5–13,8 % конечная влажность охлажденного продукта составляла 7,7–8,0 %. Качественные показатели продукта улучшились, так как повысилась степень декстринизации крахмала, а клейстеризация его достигала 63–93 %, снизилось кислотное и перекисное числа жира.

Смесь состоящая из сухих компонентов без ввода жидких практически экструдировалась затруднительно. При вводе воды в экструдер из расчета увлажнения смеси до 16 % процесс экструдирования протекал устойчиво (опыты 1, 3, 5). Температура продукта на выходе из экструдера составляла 125 °С, производительность – 330–380 кг/ч. Конечная влажность продукта была в пределах 10,6–11,6 %. Результаты определения качества показали, что содержание декстринов возросло на 2,0–2,5 %, а степень клейстеризации крахмала достигала 56–89 %.

Значительно интенсифицируется процесс экструдирования, как и следовало ожидать, при пропаривании смеси компонентов (опыты 2, 4, 6). Влажность исходной смеси доводили до 20,3–20,8 %, влажность охлажденного экструдированного продукта была 13,5–13,8 %. Производительность экструдера возрастала до 635–690 кг/ч при снижении удельного расхода энергии до 55–60 кВт·ч/т. Температура смеси в камере прессования составляла 108–120 °С за счет того, что пропаренная смесь имела температуру до 85 °С. Качественные показатели крахмальной фракции улучшились. Содержание и переваримость протеина в основном зависели от количества в смеси белковых компонентов, и коэффициент переваримости был довольно низкий (0,55–0,7), особенно при экструдировании смеси, в состав которой входили дрожжи. На

Технические и качественные показатели процесса экструдирования смеси компонентов, входящих в рецепт СК-II

№ оп-та	Наименование компонентов по рецепту	Подготовка смеси	Влажность, %		Содержание декстринов, %	Степень клейстеризации, %	Кэфф. переваримости протейна, %	Кислотное число, мг-КОН/г	Перекисное число, % J ₂	Температура в экструдере, °С	Пронзодительность, кг/ч	Удельный расход эл. энергии, кВт.ч/т
			до	после								
1.	Ячмень+отруби + дрожжи	исходная увлажнение пропаривание	13.5	-	3.06	13	0.70	58.5	0.45	-	-	-
2.			16.1	11.6	5.60	56	0.59	27.1	0.34	125	330	118
3.	Ячмень+отруби+ дрожжи+соевый шрот	исходная увлажнение пропаривание	13.5	-	2.53	-	0.70	61.3	0.44	-	-	-
4.			16.0	10.6	2.70	60	0.67	32.2	0.47	125	360	90
5.	Ячмень+отруби+ дрожжи+соевый шрот+рыбная мука	исходная увлажнение пропаривание	13.5	-	2.53	-	0.70	65.6	0.44	-	-	-
6.			15.9	10.7	2.55	89	0.64	26.2	0.47	125	390	87
7.	Ячмень+отруби+ дрожжи+жир+ фосфат. концент.	исходная без подготовки	13.6	-	3.08	-	0.70	65.3	0.51	-	-	-
8.			13.5	7.7	2.26	70	0.68	36.6	0.57	138	430	86
9.	Ячмень+отруби+ дрожжи+соевый шрот+рыбная мука + жир+фосф. концентрат	исходная без подготовки	13.8	-	3.06	-	0.70	66.2	0.25	-	-	-
			13.8	8.0	3.87	63	0.70	34.8	0.11	134	430	86

основании этого можно заключить, что экструдировать белковые компоненты – дрожжи, рыбную муку – нецелесообразно.

10.7. Режимы экструдирования зерновых компонентов, входящих в состав рецептов СК

В состав рецепта СК-16 входят следующие зерновые компоненты: ячмень обрушенный 10 %, ячмень необрушенный – 20 %, кукуруза – 20 %, отруби – 20 %. Для экструдирования приготавливали смесь этих компонентов в названном процентном содержании. Экструдирование проводили на экструдере, оборудованном пропаривателем, с применением пара и без пара.

В шнеке экструдера были установлены шайбы \varnothing 117,5 и \varnothing 125 мм. Давление пара в системе составляло 0,3 МПа (3,0 кг/см²).

Определено (таблица 10.10), что при производительности экструдера 350 кг/ч и расходе пара 35 кг/ч или 100 кг/т температура смеси на выходе из пропаривателя составила 83 °С; при полностью открытых отверстиях гранулирующей головки температура продукта в шнеке экструдера возрастала до 98–104 °С. Нагрузка двигателя экструдера была невысокой и составляла 40–50 А. Влажность пропаренной смеси была в пределах 18 %, экструдированной – 12,8 %. С повышением производительности до 460 кг/ч добивались, чтобы температура продукта повысилась до 140 °С. Влажность смеси после пропаривания составляла 16,0 %, после экструдирования – 9,2 %. Качество продукта было достаточно высоким, так как содержание декстринов возросло до 14,5 %, степень его клейстеризации до 100 %. Дальнейшее повышение производительности до 640 кг/ч привело к снижению температуры в экструдере и ухудшению качества продукта. Перекрытие выходящих отверстий вызвало повышение токовой нагрузки двигателя, но температура продукта не увеличилась.

Переход на режим без пара способствовал повышению температуры до 120 °С при производительности до 460 кг/ч. Дальнейшее увеличение производительности также приводило к возрастанию токовой нагрузки двигателя, но температура продукта снижалась до 110 °С. В результате изменения параметров процесса было определено, что лучший режим экструдирования зерновых компонентов, входящих в рецепт СК-16, получен при производительности 350 кг/ч без применения пара, температура продукта при этом составляет 130 °С или с применением пара при производительности до 460 кг/ч при температуре продукта 120 °С.

Таким образом, процесс экструдирования смеси зерновых компонентов, входящих в рецепт СК-16, показал, что за счет наличия кукурузы процесс можно осуществлять как с применением пара, так и без пара.

Таблица 10.10

Режимы экструдирования зерновых компонентов, входящих в состав рецепта СК

№ оп	Наименование рецепта комбикорма	Подготовка	Влажность, %		Содержание декстринов, %	Степень клейстеризации крахмала, %	Переваримость крахмала (in vitro) мг/г глюкозы		Коэффициент переваримости протеина, %	Кислотное число мг КОН/г	Давление пара МПа	Расход пара, кг/ч	Температура, °С		Производительность кг/ч	Удельный расход энергии, кВТ.ч/т
			до экструдирования	после экструдирования			через 4 ч	через 5 ч					в пропаривателе	в экструдере		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1.	СК-16 ячмень-30 %	Исходный	10,4	-	0,30	10,2	8,94	8,94	0,66	123,1	-	-	-	-	-	-
2.	кукуруза-30 %	Измельченные зерновых компонентов на сите с отверстиями Ø 3 мм, смешивание с отрубями, пропаривание в смесителе-пропаривателе	18,0	12,8	-	-	-	-	-	-	0,3	35	83	104	350	114
3.	отруби-20 %	То же без пропаривания	16,0	9,2	14,50	100	32,64	36,65	0,70	48,3	0,3	35	83	140	460	87
4.		То же без пропаривания	15,6	8,2	10,95	100	27,11	29,12	0,66	51,7	0,3	36	83	105	640	63
5.		То же без пропаривания	10,4	6,6	12,60	100	25,44	31,71	0,66	18,9	без пара	-	114	350	114	
6.		То же без пропаривания	10,4	8,4	10,58	100	22,03	33,39	0,65	61,4	" "	-	118	460	87	
7.	СК-21 кукуруза-38,8 %	Исходный	10,4	-	0,39	11,8	7,43	9,25	0,69	111,6	-	-	-	-	-	-
8.	ячмень-15 %	Измельченные зерновых компонентов на сите с отверстиями Ø 3 мм, смешивание с отрубями	10,4	6,8	11,80	100	32,80	34,67	0,67	49,6	без пара	-	135	350	114	
9.	отруби-24 %	То же без пропаривания	10,4	6,2	12,51	100	34,59	37,30	0,66	53,5	" "	-	130	350	114	
10.		То же без пропаривания	10,4	6,6	13,10	100	27,78	31,35	0,68	40,7	" "	-	120	460	87	
		То же без пропаривания	10,4	8,0	12,20	100	18,14	29,92	0,67	40,3	" "	-	110	570	70	

Продолжение таблицы 10.10

11.		То же с пропариванием	16,6	8,4	18,70	100	36,00	39,77	0,69	15,5	0,34	30	66	105	410	87
12.		То же с пропариванием	16,8	8,6	16,80	100	34,58	38,14	0,65	37,9	0,34	30	70	118	460	87
13.		То же с пропариванием	14,6	6,4	11,84	98	24,94	28,50	0,64	41,6	0,34	20	64	125	570	70
14.		То же с пропариванием	14,8	8,4	10,40	96	26,96	29,73	0,65	37,8	0,34	20	62	126	570	70
15.	СК-8 кукуруза-30 %	Исходный	9,6	-	0,31	90	7,34	8,29	0,71	111,3	-	-	-	-	-	-
16.	ячмень-24 %	То же без пропаривания	9,6	6,2	11,10	100	30,14	40,14	0,77	45,2	без пара	-	120	350	114	
17.	отруби-22 %	То же без пропаривания	9,6	7,6	10,50	100	26,32	36,32	0,69	43,6	" "	-	114	460	87	
		То же без пропаривания	9,6	6,0	11,62	100	32,58	37,58	0,71	44,8	" "	-	123	460	87	

Из зерновых компонентов в состав рецепта СК-21 входят: ячмень обрушенный – 15 %, кукуруза – 38,8 %, отруби – 24 %.

Экструдирование смеси этих компонентов показало, что процесс можно осуществлять как с применением пара, так и без пара (таблица 10.10).

При экструдировании без пара производительность экструдера составляет порядка 460 кг/ч при токовой нагрузке двигателя 65 А, температура продукта при этом 120 °С. Полученный продукт имеет высокие качественные показатели: содержание декстринов до 13,1 %.

При повышении температуры продукта, которое достигается за счет перекрытия выходных отверстий, производительность экструдера снижается до 350 кг/ч и процесс переходит в нестабильное состояние, так как наблюдаются хлопья и прорывы пара.

Применение пара, который подавался из системы под давлением 0,34 МПа (3,4 кг/см²), в количестве 20–30 кг/ч (36–55 кг/т) способствовало увеличению производительности до 570 кг/ч, при этом температура пропаренной смеси составляла от 62 до 66 °С, температура продукта на выходе из экструдера 120–126 °С. Токовая нагрузка двигателя не превышала 80 А. Качество получаемого продукта было достаточно высоким.

Следовательно, процесс экструдирования смеси зерновых компонентов, входящих в состав рецепта СК-21, также можно осуществлять как с применением пара, так и без пара.

При экструдировании смеси компонентов, входящих в состав рецепта СК-8 – ячменя 24 %, кукурузы – 30 %, отрубей – 22 % – получены аналогичные результаты. Экструдирование смеси возможно как с применением пара, так и без пара (таблица 10.10).

При экструдировании без пара производительность экструдера составляет до 460 кг/ч при токовой нагрузке двигателя 80–85 А, температура продукта на выходе из экструдера достигает 122 °С. Качественные показатели экструдированной смеси достаточно высокие. С повышением температуры в экструдере за счет перекрытия выходных отверстий, производительность экструдера снижалась до 350 кг/ч.

Таким образом, на основании полученных данных по обработке смеси зерновых компонентов, входящих в состав рецептов СК, можно заключить, что смеси компонентов, в состав которых включена кукуруза, можно экструдировать без дополнительной подготовки по влажности.

10.8. Влияние экструдирования на сохранность витаминов в зерновых компонентах комбикорма

Питательная ценность кормов обуславливается содержанием в них не только белковых веществ, углеводов, а и наличием биологически активных веществ – витаминов, недостаток которых в пище приводит к различным заболеваниям и глубоким нарушением обмена веществ [101].

В таблице 10.11 приведены данные о витаминном составе кормов, используемом при расчете рецептуры комбикормов.

Роль витаминов в организме огромна.

Ряд исследований, проведенных в Центральном институте питания [87], показал тесную связь между обменом витаминов и другими веществами в организме. Особое значение приобретают соотношения между белком пищи и некоторыми из витаминов. О. М. Солнцева была выявлена необходимость определенных соотношений в пище между белком и витаминами комплекса В, в частности рибофлавином, никотиновой кислотой и пиридоксином. Витамин Е способствует энэпатическому переходу каротина в активный витамин А.

Важным фактором, от которого зависит конечное содержание витаминов в продукте, является их сохранение в условиях тепловой обработки. Основные исследования по этому вопросу проведены в хлебопечении. Вопрос о влиянии длительности выпечки хлеба на степень разрушения витамина В₁, освещен в ряде работ [43–47]. По данным Шульца, потери витамина В₁, происходящие при выпечке пшеничного хлеба, сравнительно невелики. Л. Я. Ауэрманом было установлено, что витамин В₁ сохраняется в хлебе на 70–88 %, В₂ – на 64–88 %, РР – на 95–100 %. По данным Мангора [50], витамин Е в хлебе

Таблица 10.11

Содержание витаминов в 1 кг корма, мг

Наименование корма	Каротин	Тиамин (В ₁)	Рибофлавин (В ₂)	Никотиновая к-та (РР)	Пантотеновая к-та (В ₃)	Холин	Пиридоксин (В ₆)	Фолиевая к-та (В ₉)	Токоферол (Е)
Ячмень	0,4	3,6	1,3	40,0	8,0	850,0	4,3	0,7	35,0
Пшеница	1,0	4,0	1,5	50,0	9,0	800,0	4,0	0,4	15,0
Кукуруза	1,0	3,5	1,0	25,0	5,5	600,0	4,8	0,2	20,0
Отруби пшеничные	-	7,0	2,5	150,0	25,0	1200,0	19,0	1,0	17,0

сохраняется в среднем на 85 %. Потери витаминов в хлебе зависят от условий выпечки. Выпечка хлеба с применением токов высокой частоты или инфракрасных лучей не снижает содержание витаминов в хлебе. По данным других авторов применение инфракрасных лучей в небольшой степени уменьшает потери витаминов В₁ и Е и несколько увеличивает потери витамина В₂.

В литературе имеются сведения о влиянии процесса гранулирования на сохранность витаминов. Н. Полунина, В. Benson установили, что процесс гранулирования не оказывает отрицательного влияния на содержание витаминов А, В₂, В₁₂, хотя и наблюдается некоторая тенденция к снижению рибофлавина. Эти данные подтверждаются исследованиями Е. Я. Челноковой.

Для исследований были взяты ячмень, отруби пшеничные и смесь их в отношении 5:1. Экструдирование проводили на экструдере КМЗ-2 с гранулирующей головкой, оборудованном пропаривателем, при следующем режиме:

- расход пара – 50 кг/т;
- температура в экструдере – 120 °С;
- производительность экструдера – 350–400 кг/ч.

В образцах продукта до и после экструдирования определяли витамин В₁, В₂ и Е.

Результаты исследований (таблица 10.12) показывают, что в исходном ячмене содержалось 0,47 мг% витамина В₁, 0,20 мг% витамина В₂ и 5,8 мг % витамина Е. После обработки в экструдере содержание витаминов группы В осталось на том же уровне, содержание витамина Е снизилось до 1,8 мг %, т. е. на 69 %. При экструдировании отрубей и смеси ячменя с отрубями наблюдалась аналогичная картина – содержание витаминов группы В не изменилось, витамин Е разрушается на 5 % в отрубях, на 67 % в смеси ячменя и отрубей.

Таблица 10.12

Изменение содержания витаминов в зерновых компонентах в процессе экструдирования

Компоненты	Содержание витаминов, мг%					
	В ₁		В ₂		Е	
	исходн.	экструд.	исходн.	экструд.	исходн.	экструд.
Ячмень	0,47	0,50	0,20	0,20	5,80	1,80
Отруби	0,88	0,88	0,20	0,20	3,00	2,85
Смесь ячменя и отрубей	0,68	0,68	0,20	0,20	5,00	1,65

10.9. Влияние экструдирования на микробиологические показатели сырья и комбикормов

Зерновое сырье, поступившее в комбикормовую промышленность, нередко в значительной степени обсеменено микроорганизмами вследствие уборки его в неблагоприятных метеорологических условиях и некачественного хранения. Наряду с этим и отруби, получаемые с мельниц, в отдельных случаях имеют повышенную грибную и бактериальную загрязненность. Интенсивное развитие микроорганизмов приводит к порче продукта, потерям в массе сухого вещества, снижению его качества.

Видовой состав плесневых грибов разнообразен, но на сохранность и качество зерна или его продуктов влияют, главным образом, грибы из родов *Aspergillus* и *Penicillium* и в меньшей степени представители муконовых и других грибов.

Исследование зерна, пораженного некоторыми видами плесеней, показало, возможность присутствия в нем токсичных для человека и животных продуктов метаболизма этих грибов.

Известно, что в зависимости от температурного оптимума все микроорганизмы подразделяются на холодостойкие (психрофильные), теплолюбивые (термофильные) и имеющие оптимум при средних температурах (мезофильные). Микрофлора зерна в основном состоит из мезофилов, имеющих максимальную температуру 45 °С (таблица 10.13).

Таблица 10.13

Основные температурные точки у разных групп микроорганизмов

Группа микроорганизмов	Температура		
	минимальная	оптимальная	максимальная
Психрофильные	-8 - 0	10 - 20	25 - 30
Мезофильные	5 - 10	20 - 40	40 - 45
Термофильные	25 - 40	50 - 60	70 - 80

Из данных таблицы 10.13 можно видеть, что улучшению санитарных показателей комбикормов способствует тепловая обработка компонентов.

Микологические исследования сырья, экструдированного сырья и комбикормов показывают (таблица 10.14), что исходная смесь измельченных зерновых компонентов по рецепту СК-16 из кукурузы, ячменя и отрубей содержала 9000 диаспор грибов, 383 500 бактерий, была нетоксична. После экструдирования при всех режимах диаспоры грибов полностью уничтожались, количество бактерий снизилось до 100–600 шт.

Таблица 10.14

Микробиологические показатели сырья и экструдированного продукта

№ п/п	Наименование продукта	Кол-во диаспор грибов в 1г, шт.	в том числе									Бактерии, шт/г	Токсичность на рыбах группы
			asp. flaus	asp. fumigatus	asp. niger	asp. glaucus	asp. candidus	Penicillium	Mucor	Fusarium	прочие		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1.	Смесь зерновых компонентов по рецепту СК-16 до экструдирования	9000	350	0	0	0	650	2650	1000	3000	1360	383500	не токсичн.
2.	То же после экструдирования при T=86,96,105,116,122 °C	нет										100-600	не токсичн.
3.	Смесь зерновых компонентов по рецепту СК-21 до экструдирования	22700	350	0	350	0	0	6000	0	16000	0	220000	не токсичн.
4.	То же после пропаривания при T=54 °C	22350	0	0	0	0	0	2650	0	19350	350	22000	не токсичн.
	T=62 °C	18400	350	350	0	0	0	350	1350	16600	0	11360	не токсичн.
	T=72 °C	110	0	0	0	100	0	5	0	5	0	500	не токсичн.
5.	То же после пропаривания при T=54 °C и экструдирования при T=120 °C	нет										стерильн.	не токсичн.
6.	То же после пропаривания при T=62 °C и экструдирования при T=125 °C	нет										стерильн.	не токсичн.
7.	То же после экструдирования при T=88-105 °C	нет										стерильн.	не токсичн.
	T=110-120 °C	нет										стерильн.	не токсичн.
	T=130-134 °C	нет										стерильн.	не токсичн.

Продолжение таблицы 10.14

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
8.	Смесь зерновых компонентов по рецепту СК-21 до экструдирования	36050	350	350	0	0	0	1600	350	32350	1000	299500	слабо токсичн.
9.	То же после экструдирования и измельчения	135	0	0	0	0	0	135	0	0	0	3100	не токсичн.
10.	Комбикорм по рецепту СК-21 с экструдированными зерновыми компонентами	935	35	65	0	105	0	435	0	200	35	12500	не токсичн.
11.	Комбикорм по рецепту СК-21 с неэкструдированными компонентами (контроль)	50700	0	650	0	350	0	3350	350	4600	0	50500	не токсичн.

Обработка смеси зерновых компонентов по рецепту СК-21, содержащей 22 700 диаспор грибов и 220 000 бактерий, на экструдере, оборудованном пропаривателем, показала, что пропаривание также имеет обеззараживающий эффект и при температуре продукта 72 °С количество диаспор грибов снижается до 110 шт/г, количество микробных клосток – на 99,8 %. Экструдирование смеси после ее пропаривания обеспечивает полное обеззараживание от грибной и бактериальной флоры, т. е. продукт практически стерилизуется.

Экструдирование смеси зерновых компонентов, которая была слабо токсична, показало, что продукт становится нетоксичным.

Эффект обеззараживания сырья можно объяснить снижением общего содержания грибов и микробных клеток, которые обуславливают токсичность, за счет воздействия высокой температуры и давления пара в экструдере. Комбикорм, приготовленный на основе экструдированных зерновых компонентов, вполне закономерно содержал меньшее число микроорганизмов по сравнению с контрольным комбикормом из неэкструдированных компонентов.

Таким образом, на основании полученных данных можно заключить, что экструдирование обеспечивает практически полное обезвреживание сырья от грибной и бактериальной флоры и частичное обезвреживание, так как слабо токсичное сырье становится нетоксичным. Это приводит к тому, что полученный на основе экструдированных компонентов комбикорм имеет лучшие санитарные показатели и в целом лучшее качество.

10.10. Влияние экструдирования на микроструктуру зерна

Наряду с изучением биохимических превращений в зерне при различных видах обработки в последнее время все шире применяются методы, позволяющие вскрыть механизм этих изменений, как, например, электронная микроскопия. Применение микроскопа позволяет изучить микроструктуру основных составляющих веществ зерна и с этой точки зрения объяснить изменение их под действием различных факторов.

Изучение микроструктуры зерна проводили на электронном сканирующем микроскопе при увеличении в 200, 500, 2000 и 3000 раз. Для исследования были отобраны образцы исходного зерна, пропаренного и экструдированного. На зерновках были выполнены срезы различных их частей: эндосперма, зародыша и оболочек с алейроновым слоем. Поскольку экструдированный продукт представляет собой однородную массу, то выделить какие-либо характерные участки было затруднительно.

В результате обработки в экструдере в структуре зерна происходят значительные изменения (рис. 10.10). На снимке увеличением в 200 раз можно оп-

ределить, что белковая сетка, хотя и сохранила свою основу, но сильно деформировалась, крахмальные зерна практически все разрушены.

На снимке (рис. 10.11) увеличением в 500 раз показано крахмальное зерно, в котором разрушена его наружная оболочка.

При увеличении в 2000 и 3000 раз (рис. 10.12–10.13) отдельных участков среза экструдированного продукта можно определить значительные струк-



*Рис. 10.10. Микроструктура
экструдированного зерна.
Увеличение 200 раз*



*Рис. 10.12. Микроструктура
экструдированного зерна.
Увеличение 2000 раз*



*Рис. 10.11. Микроструктура
экструдированного зерна.
Увеличение 500 раз*



*Рис. 10.13. Микроструктура
экструдированного зерна.
Увеличение 3000 раз*

турные изменения, происходящие в зерне при экструдировании под воздействием тепла и давления. Это дает основание утверждать, что за счет деструкции крахмальных зерен и белковых молекул атакуемость их амилолитическими и протеолитическими ферментами будет возрастать.

10.11. Режимы экструдирования кукурузы и пшеницы

При проведении исследований по экструдированию кукурузы и пшеницы изучали влияние на процесс экструдирования таких факторов, как размер частиц, влажность зерновых компонентов, ввод пластификатора. Качественные показатели экструдированного зернового сырья определяли на партиях, при выпуске которых наблюдалась устойчивая работа экструдера. Результаты исследований представлены в таблицах 10.15 и 10.16.

Первоначально исследовали возможность экструдирования измельченных зерновых продуктов различной влажности. Исходная влажность кукурузы составляла 12 %, пшеницы – 13 %. Увлажнение кукурузы водой проводили до 18 %, а пшеницы до 17 %.

Данные, приведенные в таблицах 10.15 и 10.16, показывают, что увлажнение кукурузы до 18 %, а пшеницы до 17 % способствует лучшей работе экструдера, повышению производительности экструдера, снижению удельного расхода электроэнергии.

Для исследования процесса экструдирования измельченной кукурузы и пшеницы проводили измельчение зерна на дробилке F-I с ситом с отверстиями \varnothing 3,0 мм. Результаты исследований показывают, что при экструдировании зерна исходной влажности, измельченного на дробилке с ситами с отверстиями диаметром 3,0 мм, наблюдается неустойчивая работа экструдера. Производительность экструдера 332–375 кг/ч. При увлажнении кукурузы, измельченной на дробилке с отверстиями сита диаметром 5,0 мм, до 18 % и пшеницы до 17 % производительность экструдера увеличилась соответственно до 370 кг/ч и 375 кг/ч.

При изучении влияния пластификатора на процесс экструдирования был использован жир кормовой.

В зерновое сырье, измельченное на дробилке с диаметром отверстий сита 5,0 мм, вводили жир кормовой в количестве 1,2 и 3 %. Ввод пластификатора осуществляли на смесителе А9-ДСГ-0,1, затем полученную смесь экструдировали. При использовании кормового жира в качестве пластификатора наблюдается устойчивая работа экструдера, увеличение производительности и снижение удельного расхода электроэнергии.

Анализ качества экструдированных зерновых компонентов показывает, что общее содержание протеина и переваримого протеина в процессе экструдирования

Таблица 10.15

Показатели процесса экструдирования пшеницы

№ п/п	Наименование продукта	Подготовка	Влажность, %		Содержан. декстринов, %		Степень клейстеризации, %		Общее содержание протеина, %		Кислотное число, мгКОЭ/г		Прекисное число, % I ₂		Температура в экструдере, °С	Производительность кг/ч	Уд. расход эл. энергии кВт.ч/т		
			до	после	до	после	до	после	до	после	до	после							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1.	Пшеница исходная		13,0	-	0,1	-	12,0	-	11,6	-	90,0	-	60,0	-	-	-	-	-	-
2.	Пшеница измельченная на дробилке с ситом Ø отверстий: 3,0 мм и экструдированная	Без увлажнения	13,1	8,9													130	332	120
3.	Пшеница измельченная на дробилке с ситом Ø отверстий 3,0 мм и экструдированная	Увлажнен. водой	17,0	12,8	1,86	2,67	12,4	89,4	11,5	11,5	90,0	88,9	52,1	39,1	0,37	0,24	115	375	104,0
4.	"	Ввод жира: 1 %	17,1	11,2	1,06	2,63	11,2	87,6	11,4	11,4	89,0	89,5	51,9	41,8	0,34	0,18	120	385	102
5.	"	2 %	17,2	10,6	0,98	2,77	10,7	87,1	11,2	11,3	87,5	89,5	50,4	40,9	0,30	0,18	112	428	90
6.	"	3 %	17,2	11,8	0,94	2,57	10,5	86,7	11,2	11,2	88,0	89,3	49,9	40,3	0,27	0,16	108	440	90

процесс нестабильный

Таблица 10.16

Показатели процесса экструдирования кукурузы

№ п/п	Наименование продукта	Подготовка	Влажность, %		Содержан. декстринов %		Степень клейстериз. %		Общее со- держ. про- тина, %		Перева- рим. про- тин, %		Кислотное число, мг/100 г		Прежисное число, % I ₂		Темпе- ратура в экст- рудере °С	Про- изво- дитель- ность кг/ч	Уд. рас- ход эл. энер- гии кВт·ч/т
			до	пос- ле	до	пос- ле	до	пос- ле	до	пос- ле	до	пос- ле	до	пос- ле					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1.	Кукуруза исход- ная	Без увлаж- нения	12,0	-	1,5	-	12,0	-	10,1	-	87,0	-	65,0	-	-	-	-	-	-
2.	Кукуруза измль- ченная на дро- билке с ситом Ø отв. 5,0 мм и экс- трудированная	Без увлаж- нения	12,0	9,0	1,87	10,6	12,0	80,2	10,1	10,4	86,6	88,1	60,5	45,4	0,43	0,28	122	300	130
3.	".."	Увлажнен- ная водой	18,0	13,7	1,97	11,1	12,0	82,0	10,1	10,4	86,5	87,9	60,5	42,5	0,43	0,29	110	370	105,4
4.	".."	Ввод жира 1%	18,1	10,0	1,95	10,9	10,6	80,9	9,44	10,4	88,0	89,0	51,9	43,8	0,42	0,21	118	390	100,0
5.	".."	2%	18,1	10,2	1,87	10,1	10,4	80,3	9,37	10,2	87,0	89,5	50,4	43,5	0,37	0,22	108	425	94,3
6.	".."	3%	18,2	10,3	1,55	10,2	10,6	79,6	9,15	10,1	88,0	87,9	49,9	43,5	0,35	0,20	110	436	93,8

рования почти не меняется. Уменьшение кислотного числа жира в партиях, полученных после экструдирования, по сравнению с необработанным сырьем, можно объяснить тем, что в процессе экструдирования под воздействием температуры и давления может происходить уменьшение количества свободных жирных кислот. Сопоставление данных таблиц свидетельствует о том, что при экструдировании кукурузы расщепление крахмала до легкоусвояемых декстринов и низкомолекулярных сахаров происходит в большей степени, чем при экструдировании пшеницы и степень клейстеризации возрастает соответственно от 10,41 до 82 % и от 10,49 до 89,44 %.

Таким образом, на основании исследований можно сделать выводы:

- экструдирование кукурузы и пшеницы улучшает их качественные показатели за счет декстринизации и клейстеризации крахмала;
- устойчивый режим работы экструдера наблюдался при крупности зернового сырья, измельченного на дробилке с ситом с отверстием диаметром 3,0–5,0 мм при влажности 17–18 %;
- оптимальный режим работы экструдера при экструдировании пшеницы и кукурузы следующий:
 - температура экструдирования – 130 °С,
 - производительность экструдера – 380–400 кг/ч.

10.12. Испытания линии экструдирования зерновых компонентов на Кузнецовском комбикормовом заводе

Линия экструдирования зерновых компонентов комбикормов смонтирована в рабочей башне элеватора.

Линия включает следующее технологическое оборудование: пропариватель зерна АСК-10 (одна секция), бункера над дозаторами, четыре дозатора ДДТ для дозирования зерновых и отрубей, сборный шнек, смеситель 2СМ-1, дробилка ДМ-440У, бункера над экструдерами, четыре экструдера КМЗ-2, сборный цепной транспортер ТСЦ-25, охладитель специальной конструкции, дробилка ДМ для измельчения экструдированного продукта.

Шелушенный ячмень на линию экструдирования подается из бункера линии обжаривания. С этой же линии можно подать нешелушенный ячмень. Кукуруза поступает в наддозаторные бункера с линии очистки зернового сырья в этой башне. Отруби поступают цепным транспортером из силоса линии сушки отрубей для премиксов. На пропаривание направляется только ячмень. Кукуруза и отруби подаются непосредственно в наддозаторные бункера.

Испытания линии проводили в основном при выработке комбикормов по рецепту СК-II, в процессе которых осуществляли наладку всего оборудования, отработали режимы его работы.

Пропариватель зерна путем перестановки лопаток настроен на производительность до 1,5 т/ч. При подаче пара под давлением 0,1–0,3 МПа и расходе его 35–50 кг/ч увлажнение зерна происходило до 16–18 %. Подача пара более высокого давления приводила к меньшему увлажнению – 15–16 %. Увлажненное зерно накапливалось в бункерах емкостью до 2-х тонн.

Дозаторы ДДТ обеспечивали требуемую точность дозирования зерна и отрубей. После сборного шнека увлажненное зерно и отруби перемешивались в смесителе 2СМ-I и смесь подавали непосредственно в дробилку ДМ-440У. Для получения требуемой крупности, и учитывая повышенную влажность измельченного продукта, в дробилке установили сито с отверстиями Ø 4,0 мм. В процессе эксплуатации "замазывания" сит не наблюдалось.

При соблюдении установленного режима увлажнения зерна экструдеры работали устойчиво и стабильно. Разогрев экструдеров до требуемой температуры осуществляли с использованием кукурузы, но возможно выйти на режим и без нее. Температура в экструдерах была от 110 до 140 °С. Экструдированный продукт разрезался вращающимся ножом на гранулы, поступал в транспортер и далее в охладитель. Охладитель обслуживает все четыре экструдера. Замеры температуры показали, что после охлаждения и измельчения в наддозаторный бункер поступал продукт, который имел температуру, на 5–8 градусов выше температуры окружающей среды, что находится в пределах нормы. В процессе испытаний линии получены следующие обобщенные результаты (табл. 10.17):

Показатели	До экструдирования	После экструдирования
1. Влажность, %	15,4 - 18,0	9,0 - 11,2
2. Гранулометрический состав, остаток на сите, %		
Ø 3,0	0,5 - 1,5	0,0 - 0,5
Ø 2,0	10,0 - 20,0	5,0 - 10,0
Ø 1,0	20,0 - 35,0	40,0 - 60,0
дно	50,0 - 70,0	45,0 - 65,0
3. Содержание декстринов, %	0,5 - 1,5	5,0 - 15,0
4. Степень клейстеризации крахмала, %	3,0 - 8,0	до 100
5. Содержание клетчатки, %	8,5 - 4,5	2,0 - 4,0

Производительность одного экструдера составляла от 250 до 350 кг/ч.

Мощность установленных двигателей в линии составляет около 230 кВт.

При работе линии наблюдалось залегание измельченной смеси зерна и отрубей в бункерах над экструдерами вследствие их неправильного изготовления. Экструдированный измельченный продукт хорошо истекал из наддозаторных бункеров и дозировался без затруднений.

На основании проведенных испытаний линии можно сделать следующие выводы:

1. В результате обработки зерновых компонентов в экструдерах качественные и санитарные показатели их улучшаются за счет повышения переваримости крахмала, снижения грибной и бактериальной загрязненности и обеззараживания.

2. Экструдеры КМЗ-2 при обработке зерновых компонентов имеют малую производительность и большой расход электроэнергии, для решения этого вопроса необходимо разработать экструдер большей производительности и менее энергоемкий.

ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА КОМБИКОРМОВ МЕТОДОМ ЭКСПАНДИРОВАНИЯ

Обработка зерновых и других компонентов комбикормов в экструдерах обеспечивает глубокое преобразование структуры и свойств материалов. Происходит полная клейстеризация крахмала, повышается содержание декстринов и других низкомолекулярных углеводов, повышается атакуемость белков ферментами; все это способствует более полной ассимиляции питательных веществ комбикорма, причем с меньшей затратой энергии на процесс пищеварения. Существенно расширяется ассортимент компонентов комбикормов и готовых экструдатов.*

Однако процесс экструдирования требует высокой затраты энергии: ее удельный расход составляет 120...150 кВт·ч/т. Поэтому специалисты вели активный поиск для разработки не менее эффективного, но менее энергоемкого варианта термомеханической обработки продуктов, в том числе и в комбикормовом производстве. Результатом этого поиска явилась разработка нового аппарата – экспандера. Принцип действия экспандера и основная его конструкция аналогичны экструдеру. Отличие состоит в том, что выпрессовывание продукта происходит не через матрицу с фильерами, а через кольцевой зазор, величина которого регулируется посредством специальной гидравлической системы. В кожух экспандера подается пар, что дополнительно обеспечивает прогрев продукта.

Благодаря таким изменениям, удельный расход энергии на экспандирование снижен в 2,0...2,5 раза, по сравнению с экструдированием, и составляет 25...60 кВт·ч на 1 т сырья.

Дополнительным преимуществом экспандера является возможность вводить в состав экспандата до 20 % жира и до 20 % мелассы, в то время как при экструдировании ввод жира не может быть выше 5 %, т. к. гранулы экструдата теряют связность и рассыпаются.

Давление в экспандере достигает 10 МПа, а продукт нагревается до 170 °С. В результате происходит полная клейстеризация крахмала и его гидролиз, белки денатурируют и расщепляются, происходит также формирование органических комплексов белков и фрагментов крахмальных молекул. Питательные свойства экспандата находятся на высоком уровне.

Суммарно преимущества технологии с использованием экспандера выглядят следующим образом:

– улучшается качество гранул, прежде всего в случае труднопрессуемых компонентов;

- на производство экспандата затрачивается меньше энергии, себестоимость продукта ниже, чем обычных гранул;
- экспандат, как правило, можно использовать непосредственно, вместо гранулированного комбикорма;
- появляется возможность вводить в комбикорм в большом количестве кормовой жир, мелассу, рыбный гидролизат, жидкие белковые корма;
- в процессе экспандирования витамины и другие биологически активные добавки не разрушаются, их кормовая ценность сохраняется в ожидаемом порядке величин;
- уничтожаются сальмонелла, бактерии и грибки, комбикорм получается свободным от микробного загрязнения;
- полностью клейстеризуется крахмал, его макромолекулы расщепляются на низкомолекулярные фрагменты, в результате чего существенно возрастает питательная ценность комбикорма;
- резко снижается активность ингибиторов протеиназ в тех продуктах, где они содержатся (соя и другие бобовые); это позволяет использовать в значительном количестве бобовые в качестве компонентов комбикормов, обеспечивая необходимое содержание белка в комбикорме;
- вследствие высокой санитарной чистоты комбикорма не требуется применения каких-либо консервантов.

Кроме того, экспандеры требуют для своего размещения незначительной площади, поэтому их можно использовать на подавляющем большинстве комбикормовых заводов или цехов.

Таким образом, по мнению специалистов – отечественных и зарубежных – применение экспандеров в настоящее время является самым экономичным и эффективным способом производства комбикормов, по сравнению с экструдированием и двойным гранулированием.

11.1. Режимы экспандирования комбикормов

Экспандер ЭК-1-250 на Денежниковском комбикормовом заводе, построенном по проекту производительностью 500 т/сутки, установлен в отделении гранулирования производственного цеха дополнительно к трем линиям гранулирования. В состав линии экспандирования (рис. 11.1) также входят бункера, экспандер, охладительная колонка Б6-ДГВ-II, измельчитель Б6-ДГВ-III, просеивающая машина, дополнительный измельчитель для сходовой фракции.

Техническая характеристика экспандера ЭК-1-250:

- производительность – 10–12 т/ч;
- тип экспандера – одношнековый;
- диаметр шнека – 250 мм;

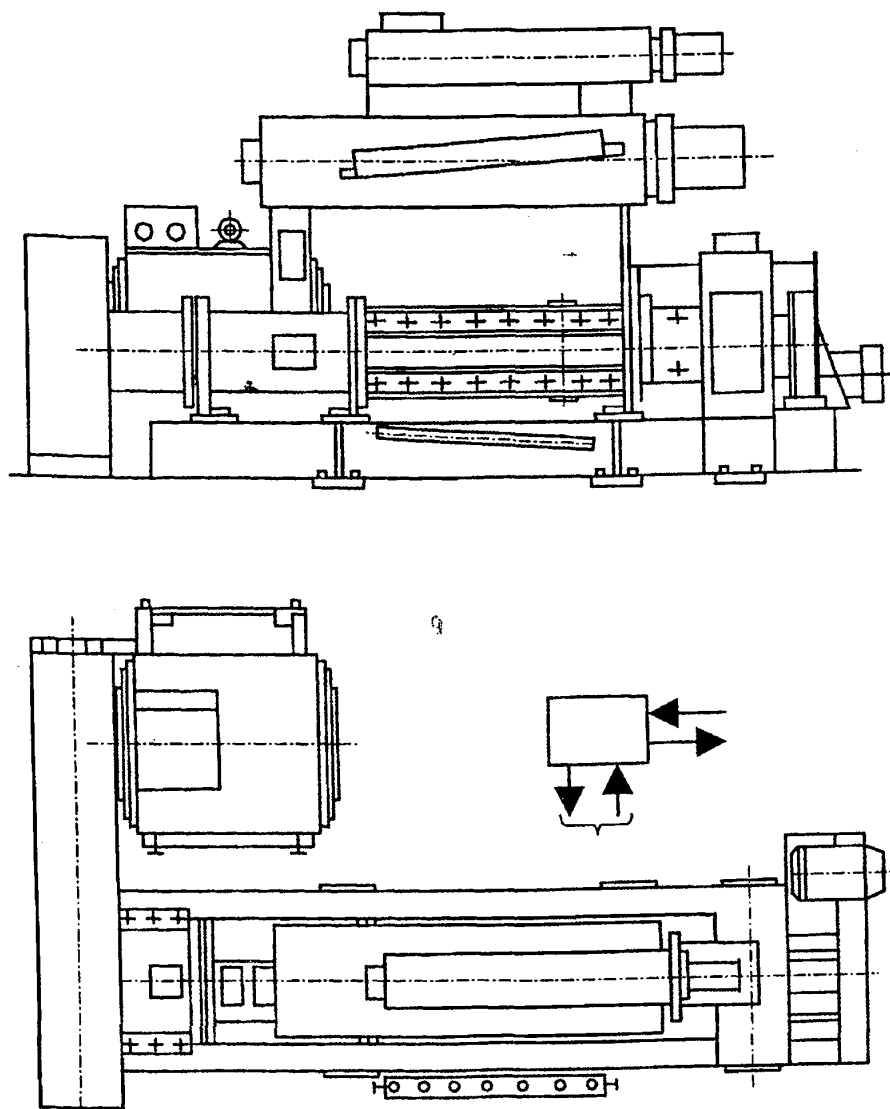


Рис. 11.1. Экспандер ЭК-1-250

- частота вращения шнека – 300 ± 10 об/мин;
- установленная мощность – 205 кВт;
- потребление воды – до 600 кг/ч;
- потребление пара – до 1000 кг/ч;

- габариты – 4100x2100x2000 мм;
- масса – 5000 кг;
- смазка подшипникового опорного узла – принудительная от комплектной станции смазки.

Экспандирование проводили при выработке комбикормов для кур-несушек и цыплят-бройлеров. Зерновая часть рецептов составляла от 61,8 до 68,0 %, белковая – 27–35 %. Комбикорм был обогащен витаминным премиксом (0,02–0,03 %) и минеральной смесью (0,11 %), полученными по импорту, а также метионином и лизином. Жир в комбикорм не вводили. Режимы процесса экспандирования приведены в таблице 11.1.

Таблица 11.1

Режимы работы экспандера

№ опыта	Обрабатываемый продукт	Q, т/ч	T, °C	P пара кг/см ²	Q воды		A, а	N, кВт.ч/т
					кг/т	кг/ч		
2	Комбикорм рецепта ПК-1	10,5	95	6,0	40,0	420	310	12,4
5	Комбикорм рецепта ПК-1	10,1	100	4,0	46,0	470	300	12,5
1	Комбикорм рецепта ПК-1	11,0	105-110	6,5	53,5	590	320	12,2
3	Комбикорм рецепта ПК-5	9,7	95	4,0	44,0	425	280	12,1
4	Комбикорм рецепта ПК-5	9,9	115	5,0	40,0	400	280	11,9
8	Комбикорм рецепта ПК-6	12,4	95	6,8	47,5	590	360	12,2
6	Комбикорм рецепта ПК-6	10,8	105	6,0	46,2	500	290-300	11,5
7	Комбикорм рецепта ПК-6	10,2	115	5,8	42,5	435	275	11,3
9	Дерь	9,8	100	6,4	45,9	450	250	11,4

Определено, что требуемую температуру продукта можно устанавливать и поддерживать за счет подачи определенного количества пара и воды. Температуру изменяли от 95 до 115 °C, давление пара, подаваемого из котельной, было в пределах 4,0–6,8 кг/см², расход пара не измерялся из-за отсутствия расходомера, расход воды варьировали от 40,0 до 53,5 кг/т или от 400 до 590 кг/ч. Токсовая нагрузка основного двигателя при этом была в пределах 275–360 А, производительность экспандера составляла от 9,7 до 12,4 т/ч. Удельный расход энергии достигал 11,3–12,5 кВт.ч/т. Экспандер при любом режиме работал устойчиво. Таким образом, на основании выполненных испытаний установлено, что экспандер ЭК-1-250 обеспечивает устойчивую работу, стабиль-

ное поддержания заданного температурного режима от 95 до 115 °С при производительности 10–12 т/ч.

При такой производительности и установке матрицы с отверстиями Ø 10 мм гранулы с начальной температурой до 115 °С в охлаждающей колонке Б6-ДГВ-II охлаждались недостаточно, поэтому применяли повторное охлаждение на второй охлаждающей колонке.

Изменение влажности комбикормов в процессе экспандирования приведено в таблице 11.2.

Таблица 11.2

Изменение влажности комбикорма при экспандировании, %

№	Стадии процесса	Номера опытов, вид комбикормов								
		комбикорм рецепта ПК-1			комбикорм рецепта ПК-5		комбикорм рецепта ПК-6			
		2	5	1	3	4	8	6	7	
1	Рассыпной комбикорм	11,6	11,6	11,6	12,0	12,0	11,8	11,8	11,8	
2	Комбикорм после экспандера	15,0	15,5	16,1	15,4	15,7	15,8	15,7	15,4	
3	Комбикорм после охладителя	13,2	13,4	13,3	14,2	13,4	14,3	14,0	13,0	
4	Готовая продукция при поступлении в силос	12,8	12,5	12,3	13,3	12,5	12,8	12,4	12,3	
	Увеличение влажности комбикорма	+ 1,2	+ 0,9	+ 0,7	+ 1,3	+ 0,5	+ 1,0	+ 0,6	+ 0,5	

Анализ данных показывает, что рассыпной комбикорм всех рецептов имел влажность от 11,6 до 12,0 %, в экспандере под воздействием пара и воды влажность его повышалась и на выходе составляла 15,0–16,1 %, после охладителя понижалась до 13,0–14,2 %, а после измельчения, просеивания и транспортирования при поступлении в силос уже составляла 11,9–13,3 %. Таким образом, хотя влажность экспандированного комбикорма повысилась по сравнению с рассыпным на 0,5–1,3 %, но конечная влажность не превышала значений, установленных на гранулированный комбикорм и крупку из гранул для птицы, равных 14,0 %. Усушки продукции также не наблюдалось, поэтому нормы выхода экспандированного комбикорма можно принять аналогично гранулированному комбикорму.

11.2. Влияние экспандирования на биохимические показатели комбикормов

Под воздействием тепла, влаги и давления (табл. 11.3) в экспандере происходит расщепление крахмала до более простых соединений, а также увеличение количества растворимых и легкогидролизуемых углеводов. Так, в исходном комбикорме количество растворимых углеводов составляло 4,95–5,29 мг/100 г, в экспандированном оно повышалось до 5,72–6,68 мг/100 г, при этом, как и следовало ожидать, с повышением температуры обработки количество растворимых и легкогидролизуемых углеводов (сахаров и декстринов) возрастает. Так, при температуре 95 °С оно увеличилось на 8,1–19,2 %, при 115 °С – на 20,9–27,2 %. Соответственно, переваримость крахмала *in vitro* возрастала в экспандированном при температуре 95 °С комбикорме на 19,2–21,7 % по сравнению с рассыпным, при температуре 115 °С – на 21,7–26,7 %.

Вместе с этим отмечено, что влаготепловая обработка в экспандере оказывает иное воздействие на переваримость протеина *in vitro*. По полученным данным (см. табл. 11.3) при экспандировании при температуре 95 °С переваримость протеина несколько повысилась на 1,3–4,9 %, однако при последующем повышении температуры до 115 °С наблюдалось снижение переваримости протеина на 3,1–4,5 %. Таким образом, результаты исследований подтвердили данные ранее проведенных другими исследователями работ, что температурное воздействие оказывает положительное влияние на углеводный комплекс комбикорма, но переваримость протеина после определенного предела температуры (выше 105–110 °С) снижается.

Биохимические показатели опытных партий комбикормов

Выработанные для зоотехнических исследований опытные партии комбикормов по показателям питательности соответствовали удостоверению о качестве. Наряду с этим для оценки влияния экспандирования в комбикормах определяли степень превращения углеводов в простые сахара и переваримость протеина *in vitro*. Результаты приведены в таблице 11.4.

Анализ табличных данных показывает, что под действием тепла, влаги и давления углеводы в комбикорме частично преобразуются в простые сахара. Так, при температуре экспандирования 95 °С количество растворимых углеводов увеличилось на 16,4–17,1 %, при температуре 115 °С – на 19,2–21,4 %, атакуемость крахмала *in vitro* возросла на 21,1–21,4 % при температуре 95 °С и на 26,1–26,6 % под воздействием температуры 115 °С. Вместе с этим экспандирование при этих режимах оказало отрицательное влияние на переваримость протеина *in vitro*. Обработка комбикорма при температуре 95 °С

Таблица 11.3

Изменение биохимических показателей комбикорма при экспандировании

№ опыта	Наименование продуктов	Углеводный комплекс				Протеин	
		растворимые углеводы, мг/100 г	+ увеличение, - уменьшение, %	атакуемость крахмала амилоглюкозидной % глюкозы	+ увеличение, - уменьшение, %(отн)	переваримость протеина %	+ увеличение, - уменьшение, %
Комбикорм рецепта ПК-1							
	Исходный комбикорм рассыпной	4,95		7,39		60,9	
2	Экспандированный при T = 95 °C	5,90	+19,2	9,00	+21,7	65,8	+4,9
5	Экспандированный при T = 100 °C	6,03	+21,8	9,36	+26,6	59,4	-1,5
1	Экспандированный при T = 105-110 °C	6,03	+27,2	9,63	+30,3	57,5	-3,4
Комбикорм рецепта ПК-5							
	Исходный комбикорм рассыпной	5,28		7,17		61,3	
3	Экспандированный при T = 95 °C	6,46	+18,3	8,55	+19,2	62,6	+1,3
4	Экспандированный при T = 115 °C	6,68	+20,9	8,73	+21,7	58,2	-3,1
Комбикорм рецепта ПК-6							
	Исходный комбикорм рассыпной	5,29		7,40		61,9	
8	Экспандированный при T = 95 °C	5,72	+8,1	9,00	+21,6	64,4	+2,5
6	Экспандированный при T = 105 °C	6,21	+11,2	9,09	+22,8	61,2	-0,7
7	Экспандированный при T = 115 °C	6,66	+25,8	9,38	+26,7	57,4	-4,5

привела к снижению переваримости протеина на 0,4-0,7 %, при температуре 115 °C - на 3,3-4,7 %. С точки зрения питательной ценности комбикорма желательнее, чтобы переваримость протеина оставалась на первоначальном уровне или повышалась. Очевидно, режимы обработки выше 95 °C, несмотря на кратковременность воздействия, являются высокими для протеина.

Биохимические показатели опытных партий комбикормов

№ п/п	Наименование партий	Углеводный комплекс				Протеин	
		растворимые углеводы, % мг/100г	+ увеличение, - уменьшение, %	атакуемость крахмала амилогликозидозой % глюкозы	+ увеличение, - уменьшение, % (отн)	персваримость протеина %	+ увеличение, - уменьшение, %
Комбикорм рецепта ПК-5							
1.	№ 1 – контрольная – рассыпной комбикорм	6,30		9,1		60,1	
2.	№ 2 – опытная – экспандированный при T = 95 °С	7,38	+17,1	11,02	+21,1	59,7	-0,4
3.	№ 3 – опытная – экспандированный при T = 115 °С	7,65	+21,4	11,48	+26,1	56,8	-3,3
Комбикорм рецепта ПК-6							
4.	№ 1 – контрольная – рассыпной комбикорм	6,75		10,15		60,6	
5.	№ 2 – опытная – экспандированный при T = 95 °С	7,65	+16,4	12,32	+21,4	60,0	-0,6
6.	№ 3 – опытная – экспандированный при T = 115 °С	7,83	+19,2	12,85	+26,6	55,9	-4,7

11.3. Влияние экспандирования на санитарно-гигиенические и микробиологические показатели опытных партий комбикормов

После выработки были отобраны пробы и определены санитарные и микробиологические показатели. Установлено (таблица 11.5), что комбикорм был не токсичен, не содержал сальмонелл и кишечной палочки, т. е. был доброкачественным.

Рассыпной комбикорм имел повышенную бактериальную обсемененность – 1000–1200 тыс. микробных клеток, экспандированный при температуре 95 °С – 400–500 микробных тел, экспандированный при температуре 115 °С – 280–400 тыс. шт.

Хранили комбикорм в неотопливаемом складе при температуре окружающей среды +5...+10 °С. Отмечено, что при хранении в этих условиях обсе-

Таблица 11.5

*Санитарно-гигиенические и микробиологические показатели
опытных партий комбикормов*

№ п/п	Наименование продукции	Токсичность	Сальмонеллы	Кишечная палочка	Кол-во микробных клеток, тыс.шт.
Рецепт ПК-5					
1.	Рассыпной комбикорм (контрольная № 1)	не токсичен	отсутствует	отсутствует	1000
2.	Экспандированный комбикорм при T = 95 °C (опытная № 2)	“_”	“_”	“_”	500
3.	Экспандированный комбикорм при T = 115 °C (опытная № 3)	“_”	“_”	“_”	400
Рецепт ПК-6					
4.	Рассыпной комбикорм (контрольная № 1)	не токсичен	отсутствует	отсутствует	1200
5.	Экспандированный комбикорм при T = 95 °C (опытная № 2)	“_”	“_”	“_”	400
6.	Экспандированный комбикорм при T = 115 °C (опытная № 3)	“_”	“_”	“_”	280

мененность как рассыпного, так и экспандированного комбикорма снижалась ≈ в 2 раза.

11.4. Аминокислотный состав комбикормов (опытных партий)

В соответствии с рецептом в комбикорма вводили синтетические аминокислоты: лизин (98 %) в количестве 0,14 % и метионин – 0,19 %. Согласно удостоверению о качестве в комбикорме ПК-5 содержится лизина 1,26 %, метионина+цистина – 0,9 %, в комбикорме ПК-6 – лизина 1,16 %, метионина+цистина – 0,85 %.

Фактический аминокислотный состав комбикормов, определенный на анализаторе, приведен в таблице 11.6. Получены данные по 17-ти аминокислотам, в том числе по 10 незаменимым.

Анализ табличных данных показывает, что фактическое содержание лизина в комбикорме рецепта ПК-5 несколько ниже и составляло 0,95 %, рецепта ПК-6 – 0,91 %, метионина+цистина в рецепте ПК-5 – 0,66 %, ПК-6 – 0,67 %. Содержание остальных аминокислот не регламентируется НТД.

Аминокислотный состав опытных партий комбикормов

Наименование аминокислот	Содержание аминокислот в % в комбикорме					
	рецепта ПК-5			рецепта ПК-6		
	рассыпной	экспандирован. при 95 °С, % сохранности	экспандирован. при 115 °С, % сохранности	рассыпной	экспандирован. при 95 °С, % сохранности	экспандирован. при 115 °С, % сохранности
Аспарагиновая кислота	1,139	97,2	94,2	1,188	89,6	80,1
Треонин*	0,675	99,1	92,3	0,650	93,8	93,8
Серин	0,598	98,7	96,5	0,565	95,6	95,4
Глютаминовая кислота	3,366	92,8	92,2	3,432	95,6	89,2
Пролин	1,320	100	100	1,104	97,8	97,8
Глицин	0,768	90,2	78,8	0,655	98,3	92,4
Аланин	0,826	80,1	79,7	0,665	97,4	90,7
Валин*	0,703	99,4	99,4	0,759	94,1	84,7
Цистин*	0,298	100	100	0,307	99,3	92,2
Метионин*	0,361	100	100	0,365	99,5	94,0
Изолейцин*	0,502	94,2	91,2	0,605	76,0	72,7
Лейцин*	1,082	97,1	97,1	1,152	95,8	90,6
Тирозин	0,240	99,2	90,0	0,325	84,9	82,2
Фенилаланин	0,734	98,0	90,5	0,783	86,0	84,7
Лизин*	0,949	85,5	84,1	0,910	91,4	84,3
Гистидин*	0,406	96,3	95,8	0,423	90,3	90,3
Аргинин*	0,723	93,6	93,6	0,792	90,9	90,4
Сумма аминокислот	14,690	94,5%	92,4%	16,520	82,9%	79,1%

* - неизменяемые аминокислоты.

Экспандирование комбикорма приводит к некоторому снижению содержания аминокислот, причем степень сохранности их зависит от температуры продукта. Анализ результатов показывает, что при температуре экспандирования 95 °С сохранность аминокислот в комбикормах обоих рецептов составляла примерно 90–95 %, при температуре 115 °С сохранность их уменьшилась до 80–90 %.

Согласно таблице 11.6 сохранность суммы аминокислот составила при температуре 95 °С – 92,4–94,5 %, при температуре 115 °С – 79,1–82,9 %.

Таким образом можно заключить, что снижение аминокислот при рациональном режиме экспандирования не превышает 5–8 %.

11.5. Сохранность витаминов в опытных партиях комбикормов

Известно, что при тепловой обработке комбикормов важным показателем является сохранность витаминов, так как большинство из них является термолабильными и разрушается под воздействием температуры. Поэтому в рассыпных (контроль) и экспандированных (опытные) при различных температурных режимах комбикормах определяли содержание основных витаминов А, Е, В₁ и В₂.

Результаты показывают (табл. 11.7), что витамины при экспандировании частично теряют свою активность, что вполне закономерно. При этом снижение активности зависит от температуры.

Таблица 11.7
Сохранность витаминов в опытных партиях комбикормов

Наименование витаминов	Ед. измерения	Номер партии комбикормов			
		№ 1 – контроль рассыпной		№ 2 – экспандиров. Т = 95 °С % сохранности	№ 3 – экспандиров. Т = 115 °С % сохранности
		по удост. качества	фактически		
Рецепт ПК-5					
А – ретинол	млн. и. е./т	12,0	11,62	91,9	72,8
Е – токоферол	г/т	15,0	14,32	88,0	52,1
В ₁ – тиамин	г/т	2,25	1,82	90,1	80,8
В ₂ – рибофлавин	г/т	6,0	5,12	87,5	77,0
Рецепт ПК-6					
А – ретинол	млн. и. е./т	12,0	9,32	94,0	68,9
Е – токоферол	г/т	12,5	12,2	90,7	58,7
В ₁ – тиамин	г/т	1,82	1,34	95,5	73,1
В ₂ – рибофлавин	г/т	5,0	4,28	92,5	72,9

Так, при температуре экспандирования 95 °С в комбикорме ПК-5 сохранность витаминов составила 87,5–91,9 %, в ПК-6 – 90,7–95,5 %. С повышением температуры экспандирования до 115 °С разрушение витаминов увеличилось и сохранность их в обоих рецептах составила: для витамина Е – 52,1–58,7 %; витамина А – 68,9–72,8 %; витаминов группы В – 72,9–80,8 %. Таким образом, исследования показали, что обработка комбикормов в экспандере при температуре до 95 °С приводит к снижению содержания витаминов до 10 %, при температуре 115 °С – 20–40 %. Следовательно, можно заключить, что режим экспандирования 115 °С является "жестким" и неприменим для комбикорма, так как снижает качество продукции.

Глава 12

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЖИВОТНЫМИ КОМБИКОРМОВ, ПОДВЕРГНУТЫХ СПЕЦИАЛЬНОЙ ОБРАБОТКЕ

12.1. Эффективность использования поросятами раннего отъема комбикормов, включающих пропаренный, поджаренный, пропаренный с ИК-обработкой и микронизированный ячмень

Для эффективности скармливания комбикормов, включающих ячмень, подвергнутый тепловой и влаготепловой обработке, был проведен научно-хозяйственный опыт на поросятах раннего отъема в спецхозе "Великий Октябрь" Воронежской области.

Состав и питательность комбикормов представлены в таблице 12.1.

Таблица 12.1

Состав и питательность комбикормов для поросят раннего отъема (в %)

Компоненты и показатели питательности	Комбикорма, %				
	I	II	III	IV	V
I	2	3	4	5	6
Ячмень пропаренный с последующей ИК-обработкой	52,9	-	-	-	-
Ячмень после ИК-обработки	-	52,9	-	-	-
Ячмень необработанный	-	-	52,9	-	-
Ячмень микронизированный (хлопья)	-	-	-	52,9	-
Ячмень пропаренный и поджаренный	-	-	-	-	52,9
Травяная мука	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Горох	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8
Шрот подсолнечниковый	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0
Сухой обрат	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
Рыбная мука	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5
Дрожжи кормовые	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
Мясокостная мука	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Животные жиры	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
Поваренная соль	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Премикс КС-3	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
И Т О Г О :	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
В 100 кг комбикорма содержится, %:					
кормовых единиц, кг	104,1	104,1	104,1	104,1	104,1
сырого протеина	22,3	22,3	22,3	22,3	22,3
переваримого протеина	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0
сырой клетчатки	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75
кальция	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2

1	2	3	4	5	6
фосфора	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
натрия	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42
лизина	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42
метионина+цистина	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
триптофана	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26

По составу и питательности все рецепты комбикормов были одинаковыми. Опыт проводился по следующей схеме (табл. 12.2):

Таблица 12.2

а. Схемы проведения опытов

Группы животных	Рецепты комбикормов
I - опытная	Комбикорм, включающий пропаренный с последующей ИК-обработкой ячмень
II - опытная	Комбикорм, включающий ячмень после ИК-обработки
III - контрольная	Комбикорм, включающий необработанный ячмень
IV - опытная	Комбикорм, включающий микронизированный ячмень (хлопья)
V - опытная	Комбикорм, включающий пропаренный и поджаренный ячмень

Формирование пяти подопытных групп животных для научно-хозяйственного опыта проводилось по принципу аналогов. На опыт были отобраны поросята крупной белой породы в возрасте 35 дней со средним живым весом на начало опыта 7,6–8,1 кг. Поросят отнимали от свиноматок на 35 день подсосного периода. Подопытные поросята размещались в одном свиноматке в отдельных станках. Кормили поросят вволю сухими рассыпными комбикормами. Поедаемость комбикормов с первого до последнего дня опыта была хорошей. Взвешивание поросят проводили в начале и конце опыта. Результаты взвешиваний животных приведены в таблице 12.3.

Данные таблицы свидетельствуют о том, что поросята, получавшие комбикорма, включающие ячмень, подвергнутый влаготепловой обработке, значительно увеличивает среднесуточные привесы. Животные, получившие комбикорма, включающие ячмень после ИК-обработки, также увеличили среднесуточные привесы по сравнению с контрольной группой.

Затраты корма также оказались различными (табл. 12.4).

Из таблицы видно, что животные I, II, IV, V группы затратили кормовых единиц и переваримого протеина на единицу продукции меньше по сравнению с III группой.

Таблица 12.3

Живой вес и привесы поросят (в среднем на 1 голову)

Группы	Живой вес (кг)		Привес за период опыта (кг)	Среднесуточный привес (г)
	на начало опыта	на конец опыта		
I	8,1	18,2	10,1	480
II	7,6	16,2	8,6	410
III	7,7	14,6	6,9	330
IV	7,8	16,6	8,8	420
V	8,0	18,4	10,4	495

Таблица 12.4

Затраты корма на единицу привеса

Группы	Затрачено на 1 кг привеса	
	кормовых единиц (кг)	переваримого протеина (г)
I	1,78	397
II	2,08	463
III	2,60	480
IV	2,10	468
V	1,71	381

Таким образом, по среднесуточным привесам, затратам корма лучшие показатели были в группах поросят, получавших комбикорм, включающий пропаренный и поджаренный, а также пропаренный, с последующей ИК-обработкой ячмень.

12.2. Эффективность использования поросятами-отъемышами комбикормов с экструдированной зерновой частью

В задачу исследований входило изучение влияния экструдирования зерновой части рациона на линии экструдирования по предложению ВНИИКП на поедаемость корма, рост поросят, использование азота рациона.

Опыт проводили в совхозе "Боровский" Калужской области на поросятах-сосунах и отъемышах крупной белой породы. Для опыта было отобрано шесть супоросных свиноматок, по три свиноматки в группе. После опороса под каждой свиноматкой находилось по 10 поросят-сосунов. С 10- до 26-дневного возраста поросята I (контрольной) группы получали подкормку – комбикорм СК-II, а II группы – СК-II с экструдированной зерновой частью. Состав комбикорма включал следующие компоненты (%): ячмень – 50,0, отруби пшеничные – 10,0, соевый шрот – 13,0, рыбная мука – 4,0, дрожжи кормовые –

Таблица 12.5

Химический состав рациона, %

Показатели	Рацион	
	с неэкструдированной зерновой частью	с экструдированной зерновой частью
Сырого протеина	20,38	20,37
Сырой клетчатки	3,13	2,78
Сырого жира	3,42	3,51
Энергии, ккал/г	400,00	405,20
Фосфора	0,78	0,73
Кальция	0,88	0,80
Натрия	0,46	0,46

2,5, сахар – 5,0, молоко сухое обезжиренное – 10,0, жир – 2,5, монокальцифосфат – 0,9, мел – 0,8, соль – 0,3, премикс КС-3 – 1,0.

Комбикорм был сбалансирован по основным питательным веществам (табл. 12.5).

Полученные данные отражают питательную ценность корма с неэкструдированной и экструдированной зерновой частью рациона.

В 26-дневном возрасте был проведен отъем поросят от маток. По принципу аналогов в I и II группах отобрали по 20 голов с живой массой 6,156–6,600 кг соответственно. В период 26–42 дня подопытным пороссятам I и II групп продолжали скармливать комбикорм того же состава, что и до отъема.

Поросята, получавшие рацион с экструдированной зерновой частью, быстрее привыкали к корму, охотно и в большем количестве поедали его, меньше страдали расстройством функций желудочно-кишечного тракта, лучше были подготовлены к отъему. Экструдированный корм обладает лучшими вкусовыми качествами, имеет приятный запах. В результате клейстеризации и декстринизации крахмала образуются легкопереваримые углеводы, более доступные действию ферментов желудочно-кишечного тракта, а следовательно, повышается усвоение и использование корма. Среднесуточный прирост в этой группе был выше на 18,63 %, а расход корма на 1 кг прироста меньше на 9,1 % по сравнению с животными I группы (табл. 12.6).

Отставание в росте поросят контрольной группы вызвано снижением поедаемости и худшим использованием азота корма. На 1 кг прироста израсходовано корма в I группе 2,10 кг, во II – 1,91 кг, сырого протеина – 428 и 389 г соответственно.

Для изучения эффективности использования азота в 35–42-дневном возрасте на трех пороссятах из каждой группы провели балансовые опыты. Баланс азота по группам был положительный (табл. 12.7).

Таблица 12.6

Среднесуточный прирост и оплата корма за период опыта

Показатели	Г р у п п ы			
	I		II	
	живая масса, г	прирост, г	живая масса, г	прирост, г
Возраст, дней				
10	3,000± 0,03		3,046± 0,05	
26	6,156± 0,11	197± 5,10	6,600± 0,14	222± 5,32
37	8,410± 0,15	204± 6,23	9,130± 0,17	230± 5,07
42	9,685± 0,21	255± 11,97	10,785± 0,25	331± 9,41
Среднесуточный прирост за период:				
10-26 дней		197± 5,10		222± 5,32
26-42 дня		220± 9,48		261± 7,76
10-42 дня		208± 7,55		241± 6,92

Таблица 12.7

Среднесуточный баланс азота у поросят 35-42-дневного возраста

Показатели	Г р у п п ы	
	I	II
Потребление с кормом, г	16,30	17,60
Выделено, г: с калом	3,32	2,84
с мочой	4,03	3,58
Персварено, г	12,98	14,76
Коэффициент персваримости, %	79,63	83,86
Отложено в теле, г	9,95	11,18
Процент отложенного:		
от принятого	54,90	63,52
от персваренного	69,95	75,74

Поросята опытной группы потребляли азота с кормом больше на 7,97 %, а выделяли с калом и мочой соответственно на 14,46 и 11,17 % меньше, чем поросята контрольной группы (табл. 12.7). Более высокое усвоение азота у поросят II группы (на 8,62 % выше, чем в I) объясняется лучшей переваримостью комбикорма в связи с экструзией его зерновой части. Коэффициент переваримости азота у опытных поросят был выше на 4,23 %, чем у контрольных животных.

На основании исследований можно сделать следующие выводы:

1. Экструзия зерновой части рациона способствует лучшему поеданию корма поросятами-сосунами и отъемышами на 7,8 % и повышает усвоение азота на 8,62 % по сравнению с контрольной группой.

2. Среднесуточный прирост живой массы у поросят, получавших рацион с экструдированной зерновой частью, выше на 18,63 %, чем у контрольной группы.

12.3. Эффективность использования комбикормов с зерновыми компонентами, подвергнутыми специальной обработке способами микронизации и экструдирования при выращивании поросят

Скармливание комбикормов с ячменем обработанного разными способами, сказалось на поедаемости их поросятами. Так, уже на 5 день после начала скармливания поросята II группы полностью съедали заданный корм. На 7 день начали съедать корм поросята и III и IV опытных групп, получавшие комбикорм с микронизированным ячменем.

Животные контрольной группы начали есть корма только на 8 день.

В результате чего, в предотъемный период (до 36-дневного возраста) среднесуточное потребление корма было более высоким у поросят II, III и IV опытных групп и составило соответственно 84, 78 и 79 г, а у поросят I контрольной группы – 71 г.

Поросята опытных групп съедали больше корма и в послеотъемный период, и в целом за опыт (табл. 12.8).

В целом за опыт поросята, получавшие комбикорма с обработанным зерном, съели комбикорма больше по сравнению с контрольными соответственно на 7,49, 8,95 и 9,52 %.

Вместе с тем наблюдения показали, что у поросят, получавших экструдированный ячмень в составе комбикорма, отмечалось более частое расстройство пищеварения, начиная с 35 по 42 день выращивания.

При смешивании с водой комбикорма с ячменем, обработанным способом экструдирования, образовался клейкий ком, прилипающий к корыту. Комбикорм с микронизированным ячменем имел нормальную консистенцию, обладал лучшей сыпучестью и сохранностью (не комковался) в отличие от комбикорма II опытной группы.

Живая масса поросят в начале опыта была практически одинаковой во всех группах. В 35-дневном возрасте живая масса поросят опытных групп была выше, чем у их аналогов из контрольной группы на 0,7–1,5 кг или 9,3–12,0 %. Эти различия оказались статистически достоверными во всех случаях.

В 60-дневном возрасте живая масса поросят контрольной и IV групп различалась несущественно, и это различие было статистически недостоверным. Тогда как живая масса поросят II и III групп превышала таковую контрольной соответственно на 2,08 и 2,65 кг или на 11,6 и 14,8 %, и это различие было статистически достоверным.

Результаты научно-хозяйственного опыта на поросятах

Показатели	I контроль	II экструдиро- ванным ячме- нем	III с микронизи- рованным яч- менем	IV с микронизи- рованным яч- менем с уменьшением ввода СОМ
До 35-дневного возраста				
Живая масса, кг: в начале опыта	2,90 ± 0,34	2,94 ± 0,29	2,94 ± 0,16	2,84 ± 0,30
в конце периода	7,50 ± 0,19	8,20 ± 0,22	9,0 ± 0,22	8,4 ± 0,25
Среднесуточный при- рост, г	164	188	216	199
Среднесуточное потребление корма, г	71	84	78	79
В % к контролю	100	118,3	109,8	111,2
С 35- до 60-дневного возраста				
Живая масса в конце опыта, кг	17,87 ± 0,80	19,95 ± 0,82	20,52 ± 0,57	18,20 ± 0,54
В % к контролю	100	111,6	114,8	101,8
Среднесуточный при- рост, г	414	470	461	392
В % к контролю	100	113,6	111,4	94,7
Среднесуточное потребление корма, г	869	929	947	951
В % к контролю	100	106,9	108,9	109,4
За опыт				
Среднесуточный при- рост, г	282	321	332	290
В % к контролю	100	113,8	117,7	102,8
Съедено корма за опыт, кг	21,21	22,80	23,11	23,33
В % к контролю	100	107,5	109,0	109,5
Среднесуточное потребление корма, г	400	430	436	438
Затраты корма на 1 кг привеса	1,42	1,34	1,31	1,51
В % к контролю	100	94,4	92,3	106,3

Полученные данные позволяют сделать вывод о том, что скормливание поросятам стартерных комбикормов с ячменем, подвергнутому обработке способом экструдирования и микронизации, позволяет получить в 60-дневном возрасте поросят с живой массой, превосходящей таковую поросят, получавших стартерный комбикорм с нативным ячменем, на статистически достоверную величину.

Вместе с тем можно отметить, что при скармливании стартерных комбикормов с микронизированным ячменем и пониженным процентом ввода сухого обезжиренного молока в 60-дневном возрасте живая масса поросят была такой же, как и поросят, получавших комбикорм с повышенным процентом ввода СОМ, но с необработанным ячменем.

Среднесуточный прирост подопытных поросят находился в соответствии с динамикой их живой массы. В целом за научно-хозяйственный опыт среднесуточный прирост поросят I и IV групп различался несущественно, тогда как среднесуточный прирост поросят II и III групп превышал контроль на 13,8 и 17,7 % соответственно.

Таким образом, скармливание стартерного комбикорма с обработанным ячменем повышает его поедаемость и, как следствие, прирост живой массы поросят. Комбикорм с микронизированным ячменем и пониженным уровнем сухого обезжиренного молока повышает его, но это не сопровождается увеличением прироста поросят. Наилучший зоотехнический эффект (поедаемость корма, прирост живой массы) был получен при скармливании комбикорма с микронизированным ячменем.

12.4. Эффективность использования телятами комбикормов с зерновыми компонентами, подвергнутыми специальной обработке способами микронизации, двойного гранулирования и экструдирования

В научно-хозяйственном опыте кормление телят было групповым, за исключением молочных кормов (цельного молока и обрат), которые выпаивались индивидуально.

Среднесуточный рацион приведен в таблице 12.9.

По данным, представленным в таблице 12.9 видно, что каких-либо различий в потреблении кормов между группами телят отмечено не было.

Энергетическая питательность рационов, рассчитанная на основе данных о фактическом потреблении кормов и переваримости питательных веществ находилась в пределах 3,0–3,2 корм. ед. или 27–29 МДж обменной энергии. Некоторое увеличение энергетической питательности у телят III и IV групп, по сравнению с двумя первыми было связано, как с незначительным (на 100 г/голову/сутки) возрастанием потребления сухого вещества, так и с некоторым увеличением переваримости питательных веществ, установленных в физиологических исследованиях. Об этом же свидетельствуют данные о концентрации энергии в сухом веществе рациона, которая составила соответственно 1,15, 1,15, 1,19 и 1,19 корм. ед. или 10,3 10,5, 10,9 и 10,7 МДж обменной энергии в 1 кг сухого вещества.

Таблица 12.9

Рацион телят в среднем за период опыта по фактически потребленным кормам (кг)

Вид корма и показатели питательности	Группы			
	I	II	III	IV
Молоко цельное	1,46	1,46	1,46	1,46
Обрат	2,73	2,73	2,73	2,73
Сено злакобобовос	1,03	1,03	1,03	1,03
Сенаж злакобобовый	0,1	0,1	0,1	0,1
Зеленая масса	1,22	1,22	1,22	1,22
Комбикорм-стартер	1,14	1,12	1,14	1,14
В рационе содержится:				
Кормовых единиц	3,0	3,0	3,2	3,2
Обменной энергии, МДж	26,9	27,3	29,4	29,0
Сухого вещества, кг	2,6	2,6	2,7	2,7
Сырого протеина, г	486	484	503	510
Переваримого протеина, г	370	378	402	405
Сырой клетчатки, г	407	415	455	452
Сырого жира, г	122	124	129	127
Кальция, г	22	24	24	21
Фосфора, г	16	16	17	15

Таким образом, увеличением потребления телятами III и IV групп, в состав рациона которых входил комбикорм с микронизированным ячменем, ежедневно на 100 г сухого вещества приводило к увеличению энергетической питательности рациона у них на 6,6 % по сравнению с таковым их сверстников из двух первых групп.

Содержание в рационах подопытных животных сырого и переваримого протеина, клетчатки, кальция и фосфора находилось в соответствии с существующими нормами кормления телят. И только содержание жира в рационах телят всех групп было ниже рекомендуемых норм. Такое же положение отмечали в своих исследованиях И. И. Сосницкий (1985), М. А. Цинцадзе (1989), С. В. Нечаевская (1989). Это связано, вероятнее всего, с тем, что существующие нормы кормления телят рассчитаны на высокий расход цельного молока.

О степени удовлетворения потребности телят в энергии, питательных и биологически активных веществах, количественной и качественной оценке рациона можно судить прежде всего по динамике живой массы и величине ее прироста (табл. 12.10).

Из данной таблицы 12.10 видно, что при рождении и в период формирования групп живая масса телят всех подопытных групп была фактически одинаковой. В конце опытного периода живая масса телят опытных групп на

Динамика живой массы и прирост подопытных телят

Показатели	Группы			
	I контрольная	II с ячменем двойного гра- нулирования	III с ячменем микронизиро- ванным	IV с ячменем микронизиро- ванным без СОМ и сахара
Живая масса, кг				
при рождении	29,7 ± 0,82	29,2 ± 1,46	30,9 ± 1,13	29,8 ± 0,39
при постановке на опыт	53,4 ± 2,34	55,1 ± 2,63	54,3 ± 2,58	54,3 ± 2,22
при снятии с опыта	121,7 ± 4,12	128,9 ± 4,10	130,2 ± 3,54	127,6 ± 3,11
в 6-месячном возрасте	157 ± 6,12	165,5 ± 4,10	167,4 ± 3,68	164,3 ± 4,29
Валовый прирост, кг:				
с рождения до начала опыта	23,7 ± 2,14	25,9 ± 1,72	23,4 ± 2,50	24,5 ± 2,27
за период опыта	63,3 ± 2,30	73,8 ± 3,05	75,9 ± 2,23	73,3 ± 2,38
с рождения до 6-месячного воз- раста	127,6 ± 5,58	136,3 ± 3,34	136,5 ± 4,04	134,5 ± 4,36
Среднесуточный прирост, г:				
с рождения до начала опыта	643 ± 36,6	687 ± 42,6	611 ± 61,1	634 ± 42,0
за период опыта	813 ± 27,5	878 ± 36,3	904 ± 26,0	873 ± 28,4
с рождения до 6-месячного воз- раста	709 ± 31,0	757 ± 18,6	758 ± 22,4	747 ± 24,2
Расход кормовых единиц на 1 кг прироста живой массы	3,95	3,66	3,66	3,74
В % к контрольной группе	100	92,7	92,6	94,7

5,9–8,5 кг или 4,8–7,0 % превышала таковую их аналогов из контрольной груп-
пы.

И хотя эти различия были статистически недостоверными, можно с уве-
ренностью утверждать о тенденции положительного влияния обработки яч-
меня, входящего в состав стартерных комбикормов, на этот показатель. Уста-
новленная тенденция сохранилась и в 6-месячном возрасте, когда живая мас-
са телят опытных групп была выше на 7,0–10,1 кг или на 4,5–6,4 %, чем у
аналогов из контрольной группы. Эти данные свидетельствуют о том, что от-
ставание телят I группы в живой массе за опытный период не было компенси-
ровано в последующие два месяца выращивания, когда кормление телят всех
групп было одинаковым.

Если рассматривать полученные данные по живой массе в плане роста
телят, то необходимо отметить, что нормами кормления ремонтного молод-
няка при выращивании коров живой массой 600–650 кг предусмотрено иметь
в 6-месячном возрасте телят живой массой 164 кг. Следовательно, приросты
телят всех опытных групп отвечали по живой массе этим нормативным тре-
бованиям и только у телят контрольной группы живая масса была несколько
ниже этих требований.

Валовый прирост телят с рождения до начала опыта различался несущественно и составлял 23,4–25,9 кг. За период научно-хозяйственного опыта валовой прирост телят опытных групп был выше контроля на 5,0–7,6 кг или 7,3–11,1 %. Наибольший валовой прирост живой массы за опытный период был отмечен у животных III группы, которые в составе рациона получали стартерный комбикорм на основе СКР-I с микронизированным зерном. Аналогичная закономерность была отмечена по показателю валового прироста и за период выращивания с рождения до 6-месячного возраста, т. е. валовой прирост за этот период в опытных группах был выше, чем в контроле, а среди опытных групп некоторое преимущество имели телята III группы.

Среднесуточный прирост телят с рождения до начала опыта между группами различался не существенно и колебался в пределах 611–687 г. За опытный период среднесуточный прирост телят контрольной группы был ниже, чем у их сверстников на 60–91 г или на 7,4–11,1 %, т.е. эти различия оказались статистически достоверными только между I и III группами животных при значении $P < 0,05$.

За период с рождения до 6-месячного возраста среднесуточный прирост телят опытных групп был выше контроля на 36–67 г или 5,4–6,9 %, затраты кормов ниже на 7,3–7,4 %. И хотя эти различия были статистически недостоверны во всех случаях, можно говорить о четко проявляющейся тенденции благоприятного влияния обработки ячменя на прирост живой массы телят.

При этом необходимо отметить, что прирост, как валовой, так и среднесуточный, живой массы телят IV группы, которые в составе рациона получали комбикорм-стартер с микронизированным ячменем, но без сухого обезжиренного молока и сахара, практически не отличался от прироста телят II и III групп, комбикорма которых включали эти компоненты.

На телятах 2,5-месячного возраста были проведены физиологические исследования по изучению переваримости и использованию питательных веществ. Балансовый опыт был проведен на трех телятах из каждой группы. После балансового опыта от пяти из каждой группы для биохимического контроля за состоянием здоровья и обмена веществ были взяты пробы крови.

Следовательно, скармливание комбикормов с включением микронизированного ячменя обеспечивает статистически достоверное увеличение среднесуточного прироста живой массы телят на 11,1 % по сравнению с нативным зерном. Скармливание комбикорма-стартера с микронизированным ячменем без ввода в его состав сухого обезжиренного молока и сахара позволило получить прирост живой массы телят на уровне комбикорма с СОМ, сахаром и ячменем, подвергнутым двойному гранулированию с наименьшей стоимостью кормов, затраченных на единицу прироста.

12.5. Эффективность использования экспандированных комбикормов цыплятами-бройлерами

Для проведения исследований были приобретены цыплята кросса "Смена-2" в количестве 300 голов. В каждой группе было по 100 голов, которых размещали в 3-х клетках по 33-34 головы.

Результаты приведены в таблицах. Анализ данных показал, что сохранность поголовья (табл. 12.11) была 98-99% в контрольной группе № 1, снизилась до 95% в опытной группе № 2, которая получала экспандированный при 95 °С комбикорм, и до 88% - в опытной № 3, которой скармливали экспандированный при 115 °С комбикорм. Следует отметить, что у цыплят, которым давали экспандированный комбикорм, в первые дни наблюдался понос, что привело к их худшему развитию и падежу, по сравнению с контролем. При вскрытии павших цыплят ветеринарные врачи отмечали разжижение мозжечка, нарушение обмена веществ, энцефалопатию, что объясняли снижением витаминов (табл. 11.5), некоторым снижением содержания незаменимых аминокислот (табл. 11.6). Цыплята в опытных группах развивались хуже, росли медленнее. Возможно в первые дни сказалась повышенная крупность крупки, но сразу же были приняты меры по ее доизмельчению.

Результаты взвешивания после 28 дней показали (табл. 11.9), что цыплята контрольной группы росли хорошо, имели массу 888,3 г, опытной группы экспандированном при 95 °С - 842,6 г, что составило 94,9% от контроля. Было отмечено, что экспандированный комбикорм хуже влиял на цыплят только в первые дни, а затем он лучше поедался ими. Поэтому после 28 дней было выделено еще 2 группы № 1а и № 2а по одной клетке (по 33 головы), т. е. цыплят, которых кормили рассыпным комбикормом, стали кормить экспандированным и наоборот.

В связи с тем, что цыплята 3-й опытной группы, которой скармливали экспандированный при 115 °С комбикорм, значительно отставали в росте,

Таблица 12.11

Сохранность поголовья за опытный период

№ группы	Кол-во голов на начало опыта	Падж с 5 до 28 день, голов	Сохранность за I период, %	Падж с 29 до 49 дней, голов	Сохранность за II период, %	Падж с 29 до 49 дней, голов
Контроль № 1	100	1	99,0	1	99,0	98,0
Опытная № 2 (T = 95 °С)	100	4	96,0	1	99,0	95,0
Опытная № 3 (T = 115 °С)	100	6	94,0	6	93,6	88,0

живая масса бройлеров была в пределах 566,7–569,7 г, что составляло 64 % от контрольной, было принято решение этот опыт прекратить, чтобы спасти поголовье. В дальнейшем эту группу по II периоде доращивали на смешанном комбикорме с добавлением лекарственного препарата дипроанемина в количестве 1,5 % (группа 3б) и 3,0 % (группа 3в).

По окончании опыта в 49 дней лучшие результаты получены при скармливании экспандированного при 95 °С комбикорма. Живая масса цыплят, которым скармливали экспандированный комбикорм, достигла 2185,3–2188,0 г (группы № 1а и № 2), что на 2,4 % выше по сравнению с контролем.

Следует отметить, что и цыплята 3-й опытной группы к 49 дням также достигли живой массы 1692,5–1760,9 г, но все же по сравнению с контролем их масса составляла 79,2–82,4 %. Ввод дипроанемина в комбикорм полностью прекратил падеж цыплят.

Данные по среднесуточным привесам цыплят различных групп приведены в таблице 11.10. Результаты показывают, что в первом периоде лучшие показатели были у цыплят контрольной группы, получавших рассыпной комбикорм – 34,7 г/сутки. Цыплята второй опытной группы имели привес 32,0–32,8 г/сутки, что составляло 92,2–94,5 % от контроля. В соответствии с меньшей живой массой (табл. 11.9) у цыплят 3-й опытной группы были и меньшие привесы – 21,3–21,6 г/сутки, т. е. 61,4–62,2 % к контролю.

Однако во втором периоде цыплята второй группы, которым скармливали экспандированный при 95 °С комбикорм, по среднесуточным привесам превзошли контрольных. Их привесы составляли 65,0–67,2 г/сутки, т. е. на 4,0–5,1 % выше контроля. Среднесуточный привес цыплят третьей группы составлял 56,2 г, т. е. 89,9 % от контрольной.

В целом за весь период выращивания среднесуточные привесы составили у цыплят контрольной группы, которым скармливали рассыпной комбикорм 47,3 г/сутки, у цыплят, которые получали экспандированный при 95 °С – за весь цикл кормления (группа № 2) и во втором периоде (группа № 2а) – 48,4–48,5 г/сутки, что на 102,4–102,5 % превышало контроль.

По нашему мнению, высокие привесы можно объяснить высоким качеством комбикормов. По основным фактически определенным показателям питательности комбикорма были близки к расчетным, сбалансированным по всем питательным веществам, в том числе аминокислотам и витаминам. Этому способствовал также ввод энергетических компонентов: масла растительного в количестве 2–2,5 % и жира животного также в количестве 2–2,5 % и в соотношении 1:1. Комбикорм, как уже отмечалось в п. 3.11.3, был доброкачественным, не токсичным, не содержал сальмонелл и кишечной палочки, а бактериальная обсемененность при высокой питательности не оказывала отрицательного действия. Цыплята получали корм вволю, поедаемость корма

Таблица 12.12

Живая масса цыплят-бройлеров

Группа, вид комбикорма	Возраст цыплят, дней						
	4	28		49			
	Средняя масса цыпленка, г	в среднем		петушки M ± m	курочки M ± m	в среднем	
M ± m		в % к контролю	M ± m			в % к контролю	
I контроль - рассыпной комбикорм	56,3	888,3 ± 15,6		2363,6 ± 35,4	2024,4 ± 36,8	2137,5 ± 33,5	
Ia опытная - рассыпной комбикорм I период, экспандированный комбикорм при T = 95 °C - II период	55,2	888,3 ± 25,3	100	2375,7 ± 47,9	2043,5 ± 58,9	2188,0 ± 47,9	102,4
2a опытная - экспандированный комбикорм при T = 95 °C - I период, рассыпной комбикорм - II период	54,8	823,0 ± 27,3	92,7	2297,8 ± 61,5	1954,3 ± 60,2	2134,1 ± 53,0	99,9
2 опытная - экспандированный комбикорм при T = 95 °C	55,3	842,6 ± 12,9	94,9	2350,5 ± 40,5	2028,4 ± 33,7	2185,3 ± 31,8	102,3
3 опытная - экспандированный комбикорм при T = 115 °C	55,0	569,7 ± 9,7	64,2	-	-	-	-
3a опытная - экспандированный комбикорм при T = 115 °C - I период, смешанный комбикорм - II период	55,2	568,2 ± 12,5	64,0	1872,5 ± 20,6	1654,7 ± 42,5	1692,6 ± 39,2	79,2
3б опытная - экспандированный комбикорм при T = 115 °C - I период, смешанный комбикорм с 1,5 % дипроанемина - II период	55,2	574,2 ± 19,1	64,6	1772,5 ± 71,5	1676,2 ± 61,0	1719,7 ± 46,5	80,5
3в опытная - экспандированный комбикорм при T = 115 °C - I период, смешанный комбикорм с 3,0 % дипроанемина - II период	54,7	566,7 ± 18,7	63,8	1853,8 ± 35,2	1685,3 ± 38,9	1760,9 ± 30,6	82,4

Таблица 12.13

Среднесуточный прирост живой массы цыплят-бройлеров

Группа, вид комбикорма	Возраст цыплят, дней									
	от 5 до 28		от 29 до 49				от 5 до 49			
	в среднем, г	% к контролю	петушки, г	курочки, г	в среднем, г	% к контролю	петушки, г	курочки, г	в среднем, г	% к контролю
I контроль - рассыпной комбикорм	34,7		73,7	56,8	62,5		52,4	44,7	47,3	
Ia опытная - рассыпной комбикорм I период, экспандированный комбикорм при T = 95 °C - II период	34,7	100	74,4	56,3	65,0	104	52,7	44,6	48,5	102,5
2a опытная - экспандированный комбикорм при T = 95 °C - I период, рассыпной комбикорм - II период	32,0	92,2	73,8	56,6	65,7	105,1	51,0	43,2	47,2	99,9
2 опытная - экспандированный комбикорм при T = 95 °C	32,8	94,5	75,3	59,3	67,2	107,5	52,2	44,8	48,4	102,3
3 опытная - экспандированный комбикорм при T = 115 °C	21,4	61,7	-	-	-	-	-	-	-	-
3a опытная - экспандированный комбикорм при T = 115 °C - I период, смешанный комбикорм - II период	21,4	61,7	65,2	54,3	56,2	89,9	41,3	36,4	37,2	78,7
3б опытная - экспандированный комбикорм при T = 115 °C - I период, смешанный комбикорм с 1,5 % дипроанемина - II период	21,6	62,2	59,9	55,1	57,3	91,7	39,0	36,8	37,8	80,0
3в опытная - экспандированный комбикорм при T = 115 °C - I период, смешанный комбикорм с 3,0 % дипроанемина - II период	21,3	61,4	64,4	55,9	59,7	95,5	40,9	37,1	38,8	82,0

Группа, вид комбикорма	Возраст цыплят, дней					
	от 5 до 28		от 29 до 49		от 5 до 49	
	на голову в сутки, г	на 1 кг прироста живой массы, кг	% к контролю	на голову в сутки, г	на 1 кг прироста живой массы, кг	% к контролю
1 контроль - рассыпной комбикорм	56,7	1,63	100	146	2,34	94,4
1а опытная - рассыпной комбикорм - I период, экспандированный комбикорм при T = 95 °C - II период	56,7	1,63	100	144	2,21	94,5
2а опытная - экспандированный комбикорм при T = 95 °C - I период, рассыпной комбикорм - II период	55,0	1,64	100,1	148	2,26	96,0
2 опытная - экспандированный комбикорм при T = 95 °C	41,7	1,65	100,1	151	2,25	96,0
3 опытная - экспандированный комбикорм при T = 115 °C	41,3	1,93	118,4	-	-	-
3а опытная - экспандированный комбикорм при T = 115 °C - I период, смешанный комбикорм - II период	41,3	1,93	118,4	115	2,05	87,6
3б опытная - экспандированный комбикорм при T = 115 °C - I период, смешанный комбикорм с 1,5 % дипроанемином - II период	41,3	1,93	118,4	112	2,03	86,7
3в опытная - экспандированный комбикорм при T = 115 °C - I период, смешанный комбикорм с 3,0 % дипроанемином - II период	41,3	1,93	118,4	110	2,01	85,9

была высокой. Данные по затратам комбикормов (табл. 2.14) показывают, что расход комбикормов в сутки на 1 голову в группах № 1 и № 2 в первый период составлял 55,0–56,7 г, во второй период 146–151 г. На 1 кг прироста затраты комбикормов составили в контрольной группе 1,63 кг в период от 5 до 28 дней, 2,34 кг – от 29 до 49 дней и в целом за весь цикл выращивания – 2,01 кг. При скармливании экспандированного при 95 °C комбикорма затраты комбикорма составили 1,93 кг/кг.

12.5.1. Балансовые опыты

Для изучения переваримости питательных веществ комбикормов *in vivo* были проведены балансовые опыты на цыплятах. В течение 3-х дней (с 38 по 40 день) фиксировали расход комбикорма и количество помета, а также отбирали пробы комбикорма и помета для анализа.

Исходные данные для расчета баланса питательных веществ приведены в таблице 12.15.

Таблица 12.15

Исходные данные для расчета баланса

Группа, вид комбикорма	Кол-во голов в группе	Общее кол-во корма, г	Среднее кол-во корма на 1 голову, г	Общее кол-во помета, г	Среднее кол-во помета в расчете на 1 голову, г
1 - контроль - рассыпной комбикорм ПК-6	31	13600	146,20	17020	183
2 - опытная - экспандированный комбикорм ПК-6 при 95 °C	31	14200	152,69	17090	183,8
3 - опытная - экспандированный комбикорм ПК-6 при 115 °C с дипроанемином	32	11000	114,6	13610	141,8

В отобранных пробах комбикорма и помета было определено содержание питательных веществ (табл. 12.16). Анализ данных показывает, что показатели питательности комбикорма близки к расчетным. Содержание сырого протеина составляло 20,74–21,08 %, жира 6,62–6,81 %, клетчатки 3,82–4,57 %, золы 5,07–5,08 %. Отмечено, что содержание сырой клетчатки при экспанди-

Таблица 12.16

Содержание питательных веществ в комбикорме и помете при проведении балансового опыта

Группа, вид комбикорма	Общее количество влаги, %	Количество сырого протеина, %	Количество сырого жира, %	Количество сырой клетчатки, %	Количество сырой золы, %	БЭВ, %	Са	Р
Комбикорм								
1-контроль - рассыпной комбикорм ПК-6	11.18	20.92	6.81	4.57	5.08	56.52	1.28	0.79
2-опытная - экспандированный комбикорм ПК-6 при 95 °С	11.21	20.74	6.74	3.97	5.07	57.34	1.24	0.73
3в-опытная - экспандированный комбикорм ПК-6 при 115 °С с дипроанемином	11.19	21.08	6.62	3.82	5.07	57.29	1.24	0.81
Помет								
1-контроль - рассыпной комбикорм ПК-6	78.64	5.98	1.02	2.52	2.18	9.66	0.70	0.28
2-опытная - экспандированный комбикорм ПК-6 при 95 °С	79.58	5.98	1.05	2.1	2.51	8.78	0.62	0.24
3в-опытная - экспандированный комбикорм ПК-6 при 115 °С с дипроанемином	78.63	6.95	1.16	2.2	2.82	8.24	0.83	0.32

а

Таблица 12.17

Количество перевариваемых питательных веществ и коэффициенты переваримости в комбикорме (in vivo)

Группа,	Протеин			Жир			Клетчатка			БЭВ		
	Кол-во сырого протеина, %	Кол-во переваримого протеина, %	Кэф-фициент переваримости, %	Кол-во сырого жира, %	Кол-во переваримого жира, %	Кэф-фициент переваримости, %	Кол-во сырой клетчатки, %	Кол-во переваримой клетчатки, %	Кэф-фициент переваримости, %	Кол-во БЭВ, %	Кол-во переваримого БЭВ, %	Кэф-фициент переваримости, %
1 - контроль - рассыпной комбикорм ПК-6	20.92	13.43	64.2	6.81	5.53	81.25	4.57	1.41	30.85	56.52	44.43	78.61
2 - опытная - экструдированный комбикорм ПК-6 при 95 °С	20.74	13.54	65.3	6.74	5.48	81.24	3.97	1.44	36.32	57.34	46.77	81.57
3в - опытная - экспандированный комбикорм ПК-6 при 115 °С с дипроанемином	21.00	12.48	59.2	6.62	5.19	78.35	3.82	1.09	28.74	57.29	47.09	82.2

Баланс питательных веществ в организме цыплят-бройлеров 40-дневного возраста

Группа, вид комби-корма	Азот		Жир		Клетчатка		БЭВ		Кальций		Фосфор						
	При-нято с ком-би-кор-мом, г	Ба-ланс	При-нято с ком-би-кор-мом, г	Вы-де-лено с по-ме-том, г	Ба-ланс	При-нято с ком-би-кор-мом, г	Вы-де-лено с по-ме-том, г	Ба-ланс	При-нято с ком-би-кор-мом, г	Вы-де-лено с по-ме-том, г	Ба-ланс	При-нято с ком-би-кор-мом, г					
1 контроль - рассыпной комбикорм ПК-6	4.9	+2.94	9.96	1.87	+8.09	6.68	4.61	+2.07	82.63	17.68	+64.95	1.87	1.28	+0.59	1.15	0.51	+0.64
2 опытная - экспандиро- ванный ком- бикорм ПК-6 при T = 95 °C	4.79	+2.93	10.29	1.93	+8.36	6.06	3.86	+2.2	87.55	16.14	71.41	1.89	1.34	+0.55	1.11	0.44	+0.67
3 опытная - экспандиро- ванный ком- бикорм ПК-6 при T = 115 °C	3.86	2.03	7.59	1.64	+5.95	4.38	3.12	+1.26	65.65	11.68	53.97	1.42	1.18	+0.24	0.93	0.45	+0.48

ровании комбикорма несколько снижается, меньше ее и в помете. Повышенное содержание сырого протеина в помете цыплят 3в группы, получавшей экспандированный при 115 °С комбикорм, указывает на ее худшую переваримость.

Определены коэффициенты переваримости питательных веществ комбикорма (*in vivo*) (табл. 12.17). Анализ их подтверждает полученные результаты (*in vivo*). Переваримость протеина была несколько выше (65,3 %) в экспандированном при 95 °С комбикорме по сравнению с рассыпным (64,2 %) и снижалась до 59,2 % в экспандированном при 115 °С комбикорме.

Переваримость клетчатки также была самой высокой в комбикорме, экспандированном при 95 °С. Худшие показатели по переваримости протеина, жира и клетчатки имел комбикорм, экспандированный при 115 °С. Как и следовало полагать, переваримость БЭВ возрастает с повышением температуры экспандирования. Рассчитанный по результатам экспериментальных данных баланс питательных веществ в организме цыплят-бройлеров приведен в таблице 12.18. Определено, что цыплята 2-й группы, получавшие экспандированный при 95 °С комбикорм, больше усвоили жира, клетчатки, безазотистых экстрактивных веществ, кальция и фосфора, по сравнению с контролем, и одинаковое количество протеина.

В группе цыплят № 3в, которым скармливали экспандированный при 115 °С комбикорм усвоение питательных веществ было меньше, что сказалось на их продуктивности.

12.5.2. Качество животноводческой продукции

Для полной оценки влияния экспандирования на качество комбикорма и в конечном счете на качество животноводческой продукции – мяса проводили контрольный забой цыплят. От каждой группы были забиты по 3 цыпленка, проанализированы основные части тушки, отобраны образцы мяса для аминокислотного анализа.

По органолептическим показателям тушки цыплят-бройлеров всех групп отвечали требованиям ГОСТ 7702.1-74, установленным на свежее мясо. Поверхность тушки была сухая, желтоватого цвета. Мышцы плотные, упругие, слегка влажные. Грудные мышцы бледно-розового цвета, бедренные – красные, с запахом, свойственным свежему мясу.

Данные контрольного забоя цыплят приведены в таблице 12.19.

Анализ показывает, что в 1 и по 2 группах масса потрошеной тушки составляла 71,6–73,3 % к живой массе, мышечный желудок – 1,77–2,0 %, масса внутреннего жира 2,2–2,9 %.

Таблица 12.19

Показатели контрольного забоя цыплят в 40 дней

Группа, вид комбикорма	Живая масса цыпленка в среднем, г	Потрошенная тушка в % к живой массе, %	Масса мышечного желудка с капикулой, г	Мышечный желудок в % к массе потрошенной тушки, %	Масса потрошенной тушки в среднем, г	Масса внутреннего жира в % к массе потрошенной тушки
1 контроль - рассыпной комбикорм	2230	71,7	32,0	2,0	1600	2,2
1а опытная - рассыпной комбикорм - I период, экспандированный комбикорм при T = 95 °C - II период	2240	71,6	31,5	1,97	1605	2,4
2а опытная - экспандированный комбикорм при T = 95 °C - I период, рассыпной комбикорм - II период	2215	72,2	30,5	1,91	1600	2,4
2 опытная - экспандированный комбикорм при T = 95 °C	2202	73,3	28,6	1,77	1615	2,9
3а опытная - экспандированный комбикорм при T = 115 °C - I период, смешанный комбикорм - II период	1735	70,3	22,0	1,80	1220	1,8
3б опытная - экспандированный комбикорм при T = 115 °C - I период, смешанный комбикорм с 3 % дипроанемином - II период	1890	72,8	23,0	1,67	1375	2,1
3в опытная - экспандированный комбикорм при T = 115 °C - I период, смешанный комбикорм с 1,5 % дипроанемином - II период	1750	69,4	20,5	1,69	1215	2,3

Можно отметить, что цыплята, получавшие экспандированный при 95 °С комбикорм, имели большее количество внутреннего жира, и меньшую массу желудка, что очевидно указывает на более легкую переработку обработанного корма.

Аминокислотный состав мяса цыплят различных групп представлен в таблице 12.20.

По общей сумме аминокислот в мясе бедренной мышцы цыплят-бройлеров несколько большее содержание наблюдается в группе, которой скармливали комбикорм, обработанный при 95 °С. На 4 % этот показатель ниже в группе, где цыплята получали рассыпной комбикорм. В группах, где использовали разные дозы дипроанемина, значение общей суммы аминокислот в мясе находится на одном уровне – 20,03 и 20,12 %.

Содержание в мясе птицы незаменимых аминокислот, которые поступают только с кормом и не синтезируются организмом, во всех группах находи-

Таблица 12.20
Аминокислотный состав мяса цыплят-бройлеров разных групп

Наименование аминокислоты	Содержание в, %				
	группы				
	1	2	3а	3б	3в
Аспарагиновая кислота	1,79	1,89	1,78	1,77	1,87
Треонин*	0,88	0,94	0,89	0,91	0,92
Серин	0,86	0,85	0,85	0,77	0,91
Глютаминовая кислота	3,71	3,67	3,59	3,57	3,74
Пролин	1,20	1,29	1,26	1,36	1,22
Глицин	0,94	0,95	0,97	0,98	0,97
Аланин	1,03	1,18	1,10	1,14	1,05
Валин*	1,12	1,22	1,09	1,15	1,12
Цистин*	0,18	0,17	0,16	0,19	0,18
Метионин*	0,31	0,27	0,28	0,27	0,29
Изолейцин*	0,71	0,71	0,72	0,72	0,73
Лейцин*	1,50	1,52	1,55	1,61	1,57
Тирозин	0,64	0,65	0,61	0,58	0,59
Фенилаланин	0,72	0,73	0,80	0,81	0,71
Лизин*	2,07	2,18	2,07	2,11	2,09
Гистидин*	0,94	0,95	0,91	0,84	0,94
Аргинин*	1,13	1,18	1,22	1,2	1,23
Сумма аминокислот	19,72	20,51	19,85	20,03	20,12
Сумма незаменимых аминокислот	9,56	9,87	9,69	9,87	9,78
Процентное соотношение суммы незаменимых аминокислот к общей сумме аминокислот	48,48	48,12	48,82	49,29	48,61

* – незаменимые аминокислоты.

лось приблизительно на одном уровне и составляло от 48,12 % во 2 группе до 49,28 % в 36 группе. Таким образом, по результатам исследований можно заключить, что полученная животноводческая продукция имела хорошие убойные качества и высокую питательную ценность. В процессе экспандирования, особенно при температуре 115 °С, произошло заметное снижение жирорастворимых витаминов, что явилось одной из причин патологических изменений в организме птицы. В связи с этим был проведен ряд биохимических исследований.

Содержание микроэлементов в печени цыплят-бройлеров 1 и 2 групп первого периода (до 28 дней) находится приблизительно на одном уровне и в пределах нормативных значений, необходимых для полноценного роста и развития организма (табл. 12.21). У цыплят 3 группы уровень микроэлементов значительно снижен по сравнению с 1 контрольной группой: цинка на 45 %; марганца на 66 %; железа на 39 % и меди на 31 %. Недостаток железа и меди ведет к нарушению процессов кроветворения: цинка – к нарушению углевод-

Таблица 12.21

Содержание микроэлементов в печени цыплят-бройлеров

Группа, вид комбикорма	Содержание микроэлементов, мг%			
	Zn	Mn	Fe	Cu
	I период			
1-контроль-рассыпной комбикорм	34,038	3,97	196,07	2,03
2-опытная - экспандированный комбикорм при T = 95 °С	34,01	3,99	197,81	2,18
3-опытная - экспандированный комбикорм при T = 115 °С	18,83	1,73	142,4	1,4
	II период			
1-контроль-рассыпной комбикорм	35,14	4,19	225,52	2,97
2-опытная - экспандированный комбикорм при T = 95 °С	36,59	4,02	232,16	2,79
3а-опытная - экспандированный комбикорм при T = 115 °С - I период смешанный комбикорм - II период	23,03	2,18	169,65	1,79
3б-опытная - экспандированный комбикорм при T = 115 °С - I период смешанный комбикорм с 1,5 % дипроанемина - II период	27,19	2,48	189,89	2,08
3в-опытная - экспандированный комбикорм при T = 115 °С - I период смешанный комбикорм с 3,0 % дипроанемина - II период	28,31	2,51	174,29	2,17
Норма	30-40	3,5-4,5	185-250	2-3

ного обмена, а недостаток марганца приводит к деформации костей крыльев и ног.

При смене комбикорма у цыплят 3а группы II периода (49 дней) было обнаружено увеличение количества цинка, марганца, железа и меди по сравнению с I периодом на 18, 21, 16 и 22 % соответственно.

В группах 3б и 3в, где был введен гепатотропный препарат дипроанемин в разных дозировках, наблюдалось увеличение цинка, марганца, железа и меди до субнормального уровня соответственно на 15–19, 12–13, 11–13 и 14–18 % по сравнению с 3а группой (без дипроанемина) II периода.

Снижение усвояемости микроэлементов в 3 группе можно объяснить тем, что микроэлементы в крови транспортируются в виде металлопротеиновых комплексов, а при высокотемпературной обработке очевидно произошла денатурация белков и образование трудноусвояемых соединений.

Известно, что на состояние здоровья животных, получавших только комбикорма, оказывает влияние витаминный состав кормов. Поскольку витамины накапливаются в печени и известны нормативные их значения, то было определено содержание витаминов А и Е в печени цыплят после первого (28 дней) и второго (49 дней) периода выращивания.

Таблица 12.22

Содержание витаминов в печени цыплят-бройлеров

№ группы	Содержание витаминов в печени, мкг/г	
	А	Е
после I периода выращивания		
1-контроль-рассыпной комбикорм	84,03	0,58
2-опытная – экспандированный комбикорм при T = 95 °C	86,2	0,63
3-опытная – экспандированный комбикорм при T = 115 °C	57,32	0,17
Нормативное значение витаминов, мкг/г	70-80	0,1-0,9
после II периода выращивания		
1-контроль-рассыпной комбикорм	167,81	1,27
2-опытная – экспандированный комбикорм при T = 95 °C	163,24	1,33
3б-опытная – экспандированный комбикорм при T = 115 °C – I период, смешанный комбикорм с 1,5 % дипроанемина- II период	128,3	1,08
3в-опытная – экспандированный комбикорм при T = 115 °C – I период, смешанный комбикорм с 3,0 % дипроанемина-II пер.	119,51	0,98
Нормативное значение витаминов, мкг/г	100-150	1,0-1,4

Данные (табл. 12.22) показывают, что в печени цыплят, которым скармливали комбикорм рассыпной (контрольная группа) и экспандированный при 95 °С (2 опытная группа), содержание витаминов было в нормативных пределах, поэтому цыплята развивались согласно возрастным особенностям, падеж был незначительным.

У цыплят 3 группы I периода содержание витаминов А, особенно витамина Е было снижено по сравнению с контрольной группой на 32 и на 71 % соответственно. Цыплята I периода имели все признаки энцефаломалации: загибание головы вбок, нарушение координации движений, при вскрытии черепной коробки выявлялось размягчение мозжечка.

Во II периоде больший отход цыплят со сходной патологией был в 3а группе. В 3б группе пал 1 цыпленок, а в 3 в группе отходов во II периоде не наблюдалось.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аброськина Л. Е., Кириллова В. В. Изучение переваримости протеина комбикормов методом *in Vitro* // Труды ВНИИКП. – 1975. – Вып. 10.
2. Авраменко В. Н., Есельсон М. П., Заика А. А. Инфракрасные спектры пищевых продуктов. – М.: Пищ. пром-сть, 1974.
3. Авраменко П. С. и др. Электротехническая обработка зерна // Животноводство. – 1985. – № 1. – С. 53.
4. Азарскова А. В. Термовлажностная обработка пшеницы и ее текстурные свойства: Дис. ... канд. техн. наук. – М., 1995.
5. Адрианов В. Н. Основы радиационного и сложного теплообмена. – М.: Энергия, 1972.
6. Анисимова Л. В. Исследование особенностей взаимодействия анатомических частей зерна пшеницы при гидротермической обработке: Дис. ... канд. техн. наук. – М., 1977.
7. Анискин Л. А., Губиев Ю. К., Еркинбаева Р. К. Особенности микроволновой термообработки зерна тритикале перед конвективной сушкой. – М.: РАСХН, НТВ ВИМ, 1993. – Вып. 867.
8. Анискин В. К., Рыборук В. А. Теория и технология сушки и временной консервации зерна активным вентилированием. – М.: Колос, 1972.
9. Афанасьев В. А. Исследования тепловой обработки ячменя с применением ИК-нагрева при производстве комбикормов: Дис. ... канд. техн. наук. – М., 1972.
10. Афанасьев В. А. Тепловая обработка зерна с применением ИК-нагрева при производстве комбикормов // Труды ВНИИКП. – 1978. – № 14.
11. Афанасьев В. А. Линия плющения зерна // Мукомольно-элеват. пром. – 1991. – № 1.
12. Афанасьев В. А. Система технологических процессов комбикормового производства. – Воронеж, 1999.
13. Афанасьев В. А., Воробьева А. С., Соколов В. В. Детоксикация пшеницы, зараженной афлатоксинообразующим штаммом *Aspergillus flavus* // Труды ВНИИКП. – 1978. – № 14.
14. Афанасьев В. А., Воробьева А. С. Влияние тепловой обработки по обеззараживанию зерна, зараженного афлатоксинообразующими грибами // Труды ВНИИКП. – 1984. – № 24.
15. Афанасьев В. А., Дьяков И. П., Орлов А. И. и др. Экструдирование зерна при производстве комбикорма для поросят // Мук.-элев. и комб. пром. – 1984. – № 6.
16. Афанасьев В. А., Егоров Г. А. Влияние инфракрасного нагрева на микроструктуру зерна ячменя // Труды ВНИИКП. – 1983. – № 28.

17. **Афанасьев В. А., Егоров Г. А., Лисицына Н. В.** и др. Исследование влияния тепловой обработки при поджаривании на декстринизацию крахмала. – ЦНИИТЭИ Минзага СССР, 1979. – № 2.

18. **Афанасьев В. А., Ильясов С. Г.** и др. Исследование термодинамических и оптических характеристик зерна ячменя // Труды ВНИИКП. – 1984. – № 24.

19. **Афанасьев В. А., Кокин В. К., Лисицына Н. В.** Способ обработки зерна для корма: А. с. № 707560.

20. **Афанасьев В. А., Марков А. И.** Применение конвейерно-ленточных сушилок Г4-КСК-45 в линиях плющения зерна // Труды ВНИИКП. – 1990. – № 36.

21. **Афанасьев В. А., Орлов А. И.** Влияние пропаривания и экструдирования на микроструктуру зерна ячменя // Труды ВНИИКП. – 1984. – № 6.

22. **Афанасьев В. А., Орлов А. И.** Углубленная переработка сырья при производстве комбикормов // Комбикорма. – 1999. – № 4.

23. **Афанасьев В. А., Орлов А. И.** Технология производства комбикормов для животноводческих комплексов. – М.: Изд-во ЦНИИТЭИ Минзага СССР, 1984. – С. 134.

24. **Афанасьев В. А., Орлов А. И., Лисицына Н. В.** Тепловая обработка зерна при производстве комбикормов // Мук.-злев. и комб. пром. – 1976. – № 2.

25. **Афанасьев В. А., Орлов А. И., Черепнина Е. Г.** Экструдирование бобов сои // Труды ВНИИКП. – 1982. – № 20.

26. **Афанасьев В. А., Соколов В. В., Воробьева А. С.** Обеззараживание зернового сырья для комбикормов с помощью инфракрасных лучей. – М.: ЦНИИТЭИ Минзага СССР, 1979. – Вып. 1.

27. **Афанасьев В. А., Старотиторов С., Зоткин В. И.** Микронизатор в действии // Мук.-злев. и комб. пром. – 1990. – № 6.

28. **Афанасьев В. А., Ульченко В. А.** Особенности развития комбикормовой промышленности США. – М.: ЦНИИТЭИ Хлебопродуктов, 1990.

29. **Бобиченко Л. В.** Исследование крахмала взорванных зерен с помощью сканирующего электронного микроскопа // Известия вузов СССР: Пищ. технология. – 1979. – № 6.

30. **Байболов К. Б.** Исследование технологического процесса производства овсяных хлопьев "Геркулес": Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 1977.

31. **Беркутова Н. С., Швецова И. А.** Микроструктура пшеницы. – М.: Колос, 1977.

32. **Богатырев А. Н., Юрьев В. П.** Термопластическая экструзия: научные основы, технология, оборудование. – М.: Ступень, 1994.

33. **Бойков Ю. И., Нелюбин В. П., Рейвизовский М. А.** Исследование режимов обеззараживания сырья животного происхождения при производстве кормовой муки скоростным методом // Труды ВНИИВС. – М., 1975.

34. **Брагинец И., Рабштына В.** Микронизация зерна // Комбикорм. пром-сть. – 1989. – С. 4, 15-16.

35. Брагинцев Н. В. Микронизация зерна для кормовых целей // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1989. – С. 1, 29-31.
36. Борхерт Р., Юбиц В. Техника инфракрасного нагрева // ГЭИ. – М.-Л., 1963.
37. Брамсон М. А. Инфракрасное излучение нагретых тел. – М.: Наука, 1965.
38. Бурделев Т. Е., Демидова Н. В. Влияние пораженного токсическим грибом и обеззараженного корма на состояние поросят // Докл. ТСХА: Зоотехния, 1962.
39. Вертяков Ф. Н. Исследование кинетики разрыхления эндосперма зерна пшеницы при гидротермической обработке: Дис. ... канд. техн. наук. – М., 1978.
40. Владимирова А. А. Эффективность рационов, содержащих зерно, обработанное различными способами // Инф. бюлл. Серия: Животноводство и ветеринария. – М., 1973. – Вып. 3.
41. Гамыгин Е. А. и др. Комбикорма для рыб. – М.: Агропромиздат, 1989.
42. Галин Н. М. Исследование терморadiационной сушки измельченного хлеба: Дис. ... канд. техн. наук. – М., 1976.
43. Гинзбург А. С. Инфракрасная техника в пищевой промышленности. – М.: Пищ. пром., 1966.
44. Гинзбург А. С., Дубровский В. П., Казаков Е. Д. Влага в зерне. – М.: Колос, 1970.
45. Гинзбург А. С., Громов М. А., Красовская Г. И. Теплофизические характеристики пищевых продуктов. – М.: Пищ. пром., 1980.
46. Глебов Л. А. Интенсификация измельчения зерна в производстве комбикормов: Дис. ... д-ра техн. наук. – М., 1990. – С. 504.
47. Грибкова Г. Н. Исследование оптических свойств зерна и продуктов его переработки: Дис. ... канд. техн. наук. – М., 1973.
48. Губиев Ю. К. Научно-практические основы теплотехнических процессов пищевых производств в электромагнитном слое СВЧ: Дис. ... д-ра техн. наук. – М., 1990.
49. Губиев Ю. К., Пунков С. П., Еркинбаева Р. К. Термообработка зерна микроволновым полем // Изв. вузов: Пищ. технология, 1995. – С. 1-2, 86-90.
50. Гулюк Н. Г., Лазур Т. А., Штыркова Т. А. Крахмал и крахмалопродукты. – М.: Агропромиздат, 1985.
51. Гушькин В. А. Оптимизация режимов ИК-обработки зерна ржи по комплексу биохимических показателей: Дис. ... канд. биол. наук. – М., 1992.
52. Гуревич В. З. Электрические инфракрасные излучатели. – М.: ГЭИ, 1963.
53. Гурии А. А. Управление ударными воздушными волнами при взрывных работах. – М.: Недра, 1978.
54. Дамман Б. В. Исследование процесса сушки пшеницы инфракрасными лучами: Дис. ... канд. техн. наук. – М., 1953.

55. Дашевский В. И. Экспандер для кондиционирования комбикормов // Комбик. пром-сть, 1992. – № 5.
56. Делор-Лаваль Ж., Борджива Л. П. Оценка биохимических и питательных качеств зерновых при различных обработках // Les Industries de l'alimentation animale. – 1975. – № 10.
57. Демидов А. Р., Чирков С. Е. Способы измельчения и методы оценки их эффективности. – ЦНИИТЭИ Госкомзага СССР, 1969.
58. Демидович С. Гидротермические коэффициенты и возможность использования их // Мук.-злев. и комб. пром-сть. – 1972. – № 12.
59. Денисов Р. Р., Елизаров Е. П., Калниньш И. Я. Способы обработки кормового зерна // Обзорн. инф. – М., 1980.
60. Джозеф П. Комбикорма для рыб. Преимущества сварочной экструзии // Комбик. пром-сть. – 1993. – № 2.
61. Дианова В. Т. Комбинированные продукты для функционального питания // Пища, экология, человек: Материалы междунаучно-технич. конф. – М., 1995.
62. Доронин А. Ф. Исследование процесса термической обработки кукурузных хлопьев ИК-лучами: Дис. ... канд. техн. наук – М., 1975.
63. Дьяков И. П., Орлов А. И. Экструдирование зерна при производстве комбикормов для поросят // Мук.-злев. и комбик. пром-сть. – 1980. – № 6.
64. Евдокимова Г. И. Влияние гидротермической обработки зерна кукурузы на биохимические и товарные свойства крупы: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Одесса, 1972.
65. Егоров Г. А. Влияние тепла и влаги на процессы хранения и переработки зерна. – М.: Колос, 1973.
66. Егоров Г. А. Технологические свойства зерна. – М.: Агропромиздат, 1985.
67. Егоров Г. А., Мартыненко Я. Ф., Петренко Т. П. Технология оборудования мукомольной, крупяной и комбикормовой промышленности. – М., 1996.
68. Егоров Г. А., Петренко Т. П. Технология муки и крупы. – М.: РИО МГУПП, 1999.
69. Езерская А. В., Мальцев В. С. Углеводное питание сельхозптицы и энергетическая оценка кормов. – М.: Обзорная информация, 1979.
70. Елисеев В. А. Теоретическое и экспериментальное обоснование методов повышения эффективности процесса измельчения зерновых кормов на животноводческих фермах: Автореф. дис. ... д-ра наук. – Воронеж, 1970.
71. Еремекбаев С. Б. Повышение эффективности послеуборочной обработки проросшего зерна пшеницы на хлебоприемных предприятиях Северного Казахстана: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 1993.
72. Жидко В. И. О допустимых температурах нагрева зерна пшеницы в псевдосжиженном слое // Изв. вузов: Пищев. техн. – 1959. – № 3.

73. Жильцов В. Г. Физические методы обеззараживания зерновых кормов, пораженных токсическими грибами: Докл. ТСХА // Зоотехния, 1962. – С. 78, 208.
74. Жуковский В. С. Основы теории теплопередачи. – Л.: Энергия, 1969. – С. 224.
75. Жушман А. И., Коптелева Е. А., Карпов В. Г. Экструзионная обработка крахмала и крахмалосодержащего сырья // Обз. инф. Серия: Крахм.-паточ. пром-сть, 1980. – Вып. 3.
76. Забродина Е. В. Термическая и гидротермическая обработка зерна и др. ингредиентов комбикормов в СССР и за рубежом // Указатель № 7-78 за период 1975-78 г. – М.: ЦНИИТЭИ Минзага СССР, 1978.
77. Запевалов П. П. Научные основы технологии приготовления дисперсных систем в сельскохозяйственных машинах и процессах: Дис. ... д-ра техн. наук. – СибирМЭ.
78. Зверев С. В. Повышение эффективности измельчения ИК-обработанного зерна. – Дис. ... д-ра техн. наук. – М., 1995.
79. Иванов Л. Борьба с микотоксинами. – Комбик. пром-сть, 1990. – № 4.
80. Ильясов С. Г. Термические основы инфракрасного излучения пищевых производств: Дис. ... д-ра техн. наук. – М., 1979.
81. Ильясов С. Г., Красников В. В. Методы определения оптических и терморadiационных характеристик пищевых продуктов. – М.: Пищ. пром-сть, 1978.
82. Ильясов С. Г., Красников В. В. Физические основы инфракрасного облучения пищевых продуктов. – М.: Пищ. пром-сть, 1978.
83. Исследование in Vitro усвояемости собаками экструдированных пищевых концентратов. – Э.П. – Комбикорм. пром-сть. – № 7.
84. Ионов В. М., Селиванов В. В. Динамика разрушения деформируемого тела. – М.: Машиностроение, 1987.
85. Исакова Э. А. Использование ИК-излучения для улучшения хлебопекарных свойств зерна и муки: Дис. ... канд. техн. наук. – Киев, 1961.
86. Казаков Е. Д. Основные сведения о зерне. – М.: Зерновой союз, 1997.
87. Казаков Е. Д., Кретович В. Л. Биохимия зерна и продуктов его переработки. – М.: Агропромиздат, 1989.
88. Карпов В. Г. Получение набухающих крахмалопродуктов экструзионным методом. – Дис. ... канд. техн. наук. – 1981.
89. Карпов В. Г., Витюк Л. А., Юрьев В. П. Некоторые представления о механизме образования экструзионных продуктов пористой микроструктуры, полученных термической обработкой пеллет // Хран. и перер. с.-х. сырья, 1998. – С. 9.
90. Карчик С. Н. Исследование процесса гидротермической обработки зерна овса: Автореф. ... канд. техн. наук. – 1975.

91. Касьянова Л. А. Исследование гидросепарирования и гидротермической обработки проса: Автореф. дис. ... канд. наук. – М., 1972.
92. Кафаров В. В., Дорохов И. Н., Арутюнов С. Ю. Системный анализ процессов химической технологии. – М.: Наука, 1985.
93. Керр Р. В. Химия и технология крахмала. – М.: Пищепромиздат, 1956.
94. Коваленок В. А. Сушка и термическая обработка крахмала ИК-лучами: Дис. ... канд. техн. наук. – М., 1977.
95. Козьмина Н. П. Биохимия зерна и продуктов его переработки. – М.: Колос, 1976.
96. Коданев М. М. Повышение качества зерна. – М.: Колос, 1976.
97. Комиссар В. В., Зелинский Г. С. Обработка зерна пшеницы инфракрасными лучами // Хлебопродукты. – 1990. – № 8.
98. Кочетов В. М. и др. Использование экструдированных и гранулированных кормов в рационах телят // Тр. Кубан. СХИ. – Краснодар, 1984. – Вып. 239 (267).
99. Кириллов М. П., Калинин В. В., Клейменов В. И. Эффективность использования экструдированного ячменя в комбикорме-стартере для телят // Корма и кормление с.-х. животных. – 1986. – № 1.
100. Красников В. В. Термодинамические характеристики массопереноса некоторых зерновых культур // Изв. вузов: Пищ. технол. – 1964. – № 3.
101. Кретович В. Л. Основы биохимии растений. – М.: Высшая школа, 1971.
102. Кретович В. Л., Токарева Р. Р. и др. Об участии белков в мелаидинообразовании при выпечке хлеба // Прикл. биохимия и микробиология: В 5 т. – 1974.
103. Крикунов Л. З. Справочник по основам инфракрасной техники. – М.: Сов. радио, 1978.
104. Ключников А. Д., Иванцов Г. П. Теплопередача излучением в огне-технических установках (инженерные решения задач). – М.: Энергия, 1970.
105. Крохина В. А. и др. Ячмень различной обработки в комбикормах-стартерах // Животноводство. – 1985. – № 4.
106. Кукта Г. М., Демко А. Плющение и гидротермическая обработка зерна // Корма. – 1972. – № 4.
107. Курманов И. А. К вопросу об обеззараживании зернофуража, пораженного токсичными грибами // Проблема ветеринарной санитарии. – 1963. – Т. 22.
108. Лебедев П. Р. Сушка инфракрасными лучами. – М.: ГЭИ, 1955.
109. Левин А. М., Ганкинульян П. И. Исследование терморadiационной сушки зерна горелками инфракрасного излучения // Сушка и аг. вентилирование: Сб. – М., 1964.
110. Леконт Ж. Инфракрасное излучение. – М.: Физматгиз, 1958.

111. Ленарский К. И. Денатурация белков и изменения свойств зерна при сушке и тепловой обработке: Дис. ... канд. техн. наук. – Одесса, 1971.

112. Лесниченко В. Г. Исследование влияния основных процессов производства на качество овсяной крупы: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 1970.

113. Лисицына Н. В. Исследование способов термической и гидротермической обработки ячменя при производстве комбикормов: Дис. ... канд. техн. наук. – 1978.

114. Литвинов В. С., Рохлин Г. Н. Тепловые источники оптического излучения. – М.: Энергия, 1975.

115. Лыков А. В., Михайлов Ю. М. Теория переноса энергии и вещества. – Минск: АН БССР, 1969.

116. Лыков А. В. Явления переноса в капиллярно-пористых телах. – М.-Л.: ГИТТЛ, 1954.

117. Лыков А. В. Теория сушки. – М.: Энергия, 1968.

118. Любушкин В. Г., Марченко Н. В. Аминокислоты в кукурузных хлопьях, обработанных разными способами // Конс. и овощесуш. пром-сть. – 1973. – № 8.

119. Лухт Г. В. Влияние различных видов влаготепловой обработки на качество комбикормов // Комбикорма. – 1999. – № 4.

120. Магопец А. С., Кочетова А. А., Шмат К. И. Изменение углеводного комплекса зерна пшеницы при экструдировании // Хранение и переработка зерна, сер.: Комбикормовая пром-сть, 1980. – № 2.

121. Магопец А. С., Кочетова А. А., Левицкий А. П., Шмат К. И., Чайка П. К. Влияние экструзии на белковый комплекс зерна // Хранение и переработка зерна: Науч.-техн. реф. сб. Сер. Комбикорм. пром-сть, 1980. – Вып. 4.

122. Максаков В. Я., Дюкарев В. В. Организация производства комбикормов в колхозах и совхозах. – М.: Знание, 1975.

123. Максаков В. Я., Дюкарев В. В. Оценка качества комбикормов. – М.: Колос, 1977.

124. Марков М. Н. Приемники инфракрасного излучения. – М.: Наука, 1968.

125. Маслиева О. И. Витамины в кормлении птицы. – М.: Колос, 1975.

126. Макэлхيني Р. Р. Технология производства комбикормов. – США, 1985.

127. Манукян К. Г., Акумян Л. А. Установка для электротермической обработки кормов: А. с. 11012117 СССР, МКИ А 23 № 17/00.

128. Мельник Б. Е., Лебедев В. Д., Винников Г. А. Технология приема, хранения и переработки зерна. – М.: Агропромиздат, 1990.

129. Мельников Е. М. Интенсификация технологических эффектов крупяного производства: Дис. ... д-ра техн. наук. – М., 1980.

130. Микронизация зерна // Экспресс-инф. ЦНИИТЭИ МХП СССР, 1989. – Вып. 1, 13.

131. **Микронизация** компонентов комбикормов: Проспект фирмы Микро-найзин. – Великобритания.
132. **Начайченко Л. И.** Исследование изменений биохимических свойств пшеница при тепловой кулинарной обработке и производстве воздушных зерен: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 1973.
133. **Наумов И. А.** Совершенствование кондиционирования и измельчения пшеницы и ржи. – М.: Колос, 1975.
134. **Некрашевич В. Ф.** Научно-техническое обоснование технологии и средств механизации приготовления кормовых гранул и брикетов с заданными физико-механическими свойствами. 105.20.01 в Лен. СХИ. Пушкин Ленингр. ш. 2.
135. **Нечаев А. П., Сандлер Ж. Я.** Липиды зерна. – М.: Колос, 1975.
136. **Никитина Л. М.** Термодинамические параметры и коэффициенты мас-сопереноса во влажных материалах. – М.: Энергия, 1968.
137. **Никитушкина М. Ю.** Высокотемпературная микронизация зерна сорго: Дис. ... канд. техн. наук. – М., 1998.
138. **Овсяные хлопья.** Информация по технике кормления. – Фирма Бюлер. – Швейцария: Уцвиль, 1972.
139. **Озолин И. Н.** Методы химического анализа зерна и продуктов его переработки. – М.: Заготиздат, 1961.
140. **Орлов А. И.** Основные результаты исследований по разработке способов повышения питательной ценности сырья при производстве комбикормов // Материалы IV международной симпозиума по научно-техническим проблемам комбикормовой промышленности. – М., 1963.
141. **Орлов А. И., Афанасьев В. А.** Микронизация зерна при производстве комбикормов // Электрофизические методы обработки пищевых продуктов. Конференция. – ВТИ, 1977.
142. **Орлов А. И., Афанасьев В. А.** и др. Влияние инфракрасного нагрева на изменение белка ячменя // Труды ВНИИКП. – Вып. 18.
143. **Орлов А. И., Афанасьев В. А.** Влияние тепловой обработки на качество некоторых видов сырья и комбикормов // Мук.-элев. и комб. пром-сть, 1992. – № 3.
144. **Орлов А. И., Афанасьев В. А.** Влияние процесса экструдирования на сохранность витаминов в зерне ячменя и пшеничных отрубях // Труды ВНИИКП. – 1983. – Вып. 23.
145. **Орлов А.И., Афанасьев В. А.** и др. Комбикорма для животноводческих комплексов // Мук.-элев. и комб. пром-сть, 1984. – № 2.
146. **Орлов А. И., Афанасьев В. А., Лисицына Н. В.** Тепловая обработка зерна с применением барабанных обжарочных агрегатов. – М.: Труды ВНИИКП. – 1983. – № 22.

147. Орлов А. И., Афанасьев В. А., Лисицына Н. В. Тепловая обработка зерна с применением барабанных обжарочных агрегатов // Труды ВНИИКП, 1978. – Вып. 22.
148. Орлов А. И., Подгорнова Н. М. Производство комбикормов с применением экструзионной технологии // Обз. инф.: Серия Комб. пром. ЦНИИТЭИ. – 1990. – № 12.
149. Орлов А. И., Афанасьев В. А., Черепнина Е. Г. Экструдирование бобов сои // Труды ВНИИКП. – 1982. – № 20.
150. Орлов А. И., Смашко А. Г., Афанасьев В. А. и др. Обеззараживание фуражного зерна в сушилках // Мук.-элев. и комб. пром. – 1979. – № 8.
151. Отчет ВНИИКП. Изучение методов тепловой обработки зернового сырья при производстве комбикормов. – Воронеж, 1975.
152. Отчет ВНИИКП. Изучение санитарного состояния сырья и готовой продукции. – Воронеж, 1975.
153. Отчет ВНИИКП. Тепловая обработка зерна с применением барабанных обжарочных агрегатов. – Воронеж, 1982.
154. Отчет ВНИИКП. Совершенствование технологического процесса производства комбикормов для животноводческих комплексов. – Воронеж, 1978. – Р. II.
155. Павловский О. Е. Разработка технологического режима получения модифицированного крахмала и определение его свойств: Дис. ... канд. техн. наук. – М., 1984.
156. Панфилов В. А. Системное исследование механизированных поточных линий пищевой промышленности с целью оптимизации процессов и конструкций машин и аппаратов: Дис. ... д-ра техн. наук.
157. Патент 2004969 Россия, МКИ А 23 К 1/14, А 23 17/100, А 23 L 1/00, F 23 L 1/00, F 26 В 3/30 // Способ обработки зерна и устройство для его осуществления / Е. П. Тюрев, О. В. Цыгулев, С. В. Зверев.
158. Патент 2020833 Россия, МПК А 23 L 1/164. Способ изготовления хлопьев из круп / Е. П. Тюрев, О. В. Цыгулев, С. В. Зверев.
159. Патент 4939346 США, МКИ F 27 В 7/18, F 26 В 23/04 // Аппарат для тепловой обработки пищевых продуктов / Бэйли и др.
160. Патент 4945215 США, МКИ F 27 Д 11/00 // Терморadiационное устройство.
161. Переработка тритикале на экструдере в США // Экспресс-инф. – Серия: Муком.-круп. пром-сть. № 4. – 1976.
162. Песто Н. Е. Физико-химические свойства зернистых и порошкообразных химических продуктов. – М.-Л.: Госхимиздат, 1977.
163. Плаксин Ю. М. Исследование выпечки мучных кондитерских изделий в печах с ИК-излучением: Дис. ... канд. техн. наук. – М., 1972.

164. **Плаксин Ю. М.** Научно-практические основы пищевой технологии при ИК-энергоподводе: Дис. ... д-ра техн. наук. – М., 1995.
165. **Попов Н. В., Буй-Дык-Хой.** Изменение количества декстринов в зерне при гидротермической обработке. Совершенствование производства крупы. – М.: ЦНИИТЭИ, 1972.
166. **Правила организации и ведения технологических процессов производства продукции комбикормовой промышленности.** ОАО Росхлебопродукт, АООТ ВНИИКП. – Воронеж, 1997.
167. **Пятков И. Ф.** Исследование физического воздействия инфракрасного излучения на зерно: Дис. ... канд. техн. наук. – М., 1967.
168. **Рошак М. В., Роменский Н. В.** Влияние тепловой обработки на углеводно-аминокислотный комплекс кукурузы // Изв. вузов: Пищев. технол. – 1968. – № 5.
169. **Радчиков В. Г., Чиков А. С.** Соевые бобы и шрот тепловой обработки в рационах телят // Вестник с.-х. науки. – 1979. – № 8.
170. **Разработать технологию производства комбикормов для товарных рыб ценных видов способом экструдирования** // Отчет Рижского филиала ВНИИКП. Тема 1.02.22. – 1981.
171. **Резчиков В. А.** Теплофизические и технологические методы повышения эффективности сушки зерна: Дис. ... д-ра техн. наук. – М., 1988.
172. **Результаты экструзионной обработки кукурузы различных сортов, выращиваемых в ФРГ** // Химия и технол. пищ. прод. – 1976. – С. 2.
173. **Рогов И. А.** Электронно-физические методы обработки пищевых продуктов. – М.: Агропромиздат, 1988.
174. **Рогов И. А., Адаменко В.Я., Некрутман С. В.** и др. Электрофизические, оптические и акустические характеристики пищевых продуктов. – М.-Л.: Пищ. пром-сть, 1981. – С. 288.
175. **Рогов И. А., Горбатов А. В.** Физические методы обработки пищевых продуктов. – М.: Пищ. пром-сть, 1974.
176. **Розенберг М., Калниньш И.** Микронизация. Комбик. промышленность. – 1988. – С. 3, 31.
177. **Рейклейтис, Рейвиндран А., Рэгдел К.** Оптимизация в технике. – М.: Мир, 1986.
178. **Розловский А. И.** Основы техники взрывобезопасности при работе с горючими газами и парами. – М.: Химия, 1980.
179. **Севастьянов А. А.** Экструдирование комбикормов для рыб // Экспресс-инф.: Сер. Комбик. пром-сть, ЦНИИТЭИ Минзага СССР. – 1983. – Вып. 8.
180. **Семенов Я. И., Теслер Л. А.** Взрывобезопасность элеваторов, мукомольных и комбикормовых заводов. – М.: Агропромиздат, 1991.
181. **Спесивцева Н. А., Хмелевский С. Н.** Санитария кормов. – М.: Колос, 1975.

182. **Смекалова Н. А., Зелькер В. Р.** Повышение питательной ценности злаковых культур путем обработки // Животноводство, 1970. – № 8.
183. **Силич С.** Экструдирование // Комбик. пром-сть. – 1988. – № 4.
184. **Спандиаров В. К.** Разработка и совершенствование процессов и оборудования производства комбикормов: Дис. ... д-ра техн. наук. – М., 1994.
185. **Сыроватка В. И.** Методика расчета технологических схем комбикормовых предприятий // Мук.-элев. и комбик. пром-сть. – 1980. – № 5.
186. **Способ приготовления зерновых завтраков.** Патент Швеции 3746440.
187. **Талонов П. А.** Влияние гидротермической и кулинарной обработки на белки и аминокислотный состав зерна и крупы гороха и фасоли: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Одесса, 1973.
188. **Тарутин В. П.** Исследование процесса и создание аппарата для обработки зерна пшеницы паром: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 1974.
189. **Термообработка зерна для производства комбикормов** // Комбик. пром-сть. – 1985. – № 4.
190. **Техника и технология микронизации зернового сырья при производстве комбикормов** // Инф. матер. системы ДОР: Справка. ЦНИИТЭИ ХП.
191. **Технологическая линия по микронизации зернофуража (научно-практический опыт в агропромышленном производстве)** // Инф. ВАСХНИЛ. – Белор. филиал: ВНИИТЭИ агропрома. – 1990. – № 208.
192. **Технология производства комбикормов: основы, кормление, компоненты, оборудование, опыт, контроль качества, производство:** Справочник Ruttloff С. Technologie... – Leipzig, 1981. – С. х. Указ. ин. лит., 1984. – № 4.
193. **Токарев В. Ф.** Обработка зерна с целью сохранения и повышения его питательности // С. х. за рубежом, 1975. – № 3.
194. **Трегубов Н. П., Бычков Б. К., Бекслер Б. А.** и др. Технология крахмала и крахмалопродуктов. – М.: Пищ. техн., 1970.
195. **Трисвятский Л. А.** Хранение зерна. – М.: Агропромиздат, 1986.
196. **Тюрев Е. П.** Терморadiационные характеристики пищевых продуктов и методы их исследования при различных условиях облучения: Дис. ... канд. техн. наук. – М., 1976.
197. **Тюрев Е. П.** Эффективность теплотехнических процессов обработки пищевых продуктов ИК-излучением. – Дис. ... д-ра техн. наук. – М., 1995.
198. **Тюрев Е. П., Зверев С. В.** Инфракрасная термообработка зерна // Комбикорм. пром-сть. – 1993. – № 4.
199. **Улучшение качества комбикорма и повышение эффективности питания животных:** Паспорт фирмы Амандус Каль, 1999.
200. **Федоренко С. Ф.** Исследование влияния различной степени гидротермической обработки на биохимические свойства перловой крупы: Дис. ... канд. техн. наук. – 1974.
201. **Фимер Э.** Экструзия пластических масс. – М.: Химия, 1970.

202. Фридрих В. Термическая обработка сырья и кормовых смесей и ее влияние на качество корма и животных // Les Industries de l'alimentation animale. – 1975. – № 12.

203. Худоногов А. М. Обработка продуктов концентрированным электроинфракрасным нагревом // Механиз. и электриф. с. х. – 1987. – № 9.

204. Черняев Н. П. Технология комбикормового производства. – М.: Колос, 1992.

205. Шабетов Н. Экструдирование комбикормов – достижения и задачи // Комбикорма. – 1995. – № 5.

206. Шаззо А. Ю. Интенсификация крупяного производства на основе моделирования технологических процессов. – Дис. ... д-ра техн. наук. – Краснодар, 1996.

207. Швец В. Я., Мальцев П. Н., Великая Е. И. Химические изменения при поджаривании свежего ячменного солода // Изв. вузов: Пищ. техн. – 1966. – № 4.

208. Эглайс В. О. Алгоритм интуитивного поиска для оптимизации сложных систем // Вопросы динамики и прочности: Сб. – Рига: Зинанте, 1980. – С. 36.

209. Эглайс В. О. Синтез одномерного уравнения регрессии на основе экспериментальных данных // Изв. АН Латв. ССР: Серия физ. и техн. наук. – Рига, 1981. – С. 3.

210. Экструзионная варка пищевых продуктов // Экспресс-инф.: Пищ. пром-сть, 1973. – 19.

211. Экструзионная обработка пищевых продуктов // Экспресс-инф.: Пищ. пром-сть. – 1976. – № 46.

212. Юрьев В. П., Богатырев А. Н. Физико-химические представления о получении экструзионных продуктов питания на основе растительного сырья // Вестник с.х. науки, 1991, 12.

213. Яковенко В. И., Таланов П. А. Влияние гидротермической обработки на аминокислотный и фракционный состав белков зерна и круп гороха и фасоли // Изв. вузов: Пищ. технол. – 1976. – С. 1.

214. Яковенко В. А., Евдокимова Г. И. Влияние гидротермической обработки зерна на физико-химические свойства обработанного зерна и крахмала кукурузной крупы // Изв. вузов: Пищ. технол. – 1971. – № 6.

215. Яковенко В. А., Исарова Л. Ю. Аминокислотный состав кукурузы в связи с ее тепловой обработкой // Изв. вузов: Пищ. технол. – 1970. – № 2.

216. Яковенко В. А., Каминский В. Д. и др. Влияние режимов хранения и влаготепловой обработки на белковый комплекс подсолнечного шрота // Хранение и переработка зерна: сер. комбикормовая промышленность. – 1981. – Вып. 6.

217. Яковенко В. А., Каминский В. Д. и др. Влияние влаготепловой обработки на стойкость подсолнечного шрота при различных условиях хранения //

Хранение и переработка зерна: сер. комбикормовая промышленность. – 1981, – Вып. 4.

218. **Altschul A. M.** Processed plant protein foodstuffs. – Academic press, 1959. – P. 87–89.

219. **Alvares-Marting L., Konduru K. P., Haspes J. M.** A general model for expansion of extruded products J. Food Sci., 1988. – P. 2, 609.

220. **Andersson R. A., Conway H. F., Peplinski A. D.** – Gelatinization of corn grits by roll cooking, extrusion cooking and steaming. – Die Starke, 1970. – P. 3, 41.

221. **Booher L. E., Behan L., McMean E.** Biological utilization of unmodified and modified starches. J. Natr., 1951. – 75, 75.

222. **Brautlect C. A.** Starch, its sources, production and uses. – Reinhold Publ. Corp. – 1953. – Noj.

223. **Bruce K.** Boun Ektrusion Today. – General Foods World. – № 23, 4. – 1979.

224. **Burton D. W.** Expanded concentrates, vs. pellets for dirty heifers. – Feedstuffs, 1962. – Dec. 1.

225. **Chardo W. P.** Infrared radiation of seed: Patent USA № 3694220, Sept. 1972.

226. **Costa P., Johnson A.** at all. Effects of roastings and roastings temperature on the nutritive value of highmoisture corn for swine. J. Animal Sci., 1977. – P. 44, 2, 234-241.

227. **Cornett C. D.** at all. Effect of method of processing upon digestibility of a new wheat for sheap and catlles. J. Animal Sci., 1971. – P. 4, 32, 716-720.

228. **Nierle W.** Veranderung der Getreide inahlsstoffe warend der Extrusion nut eintem Doppelschnekenextuder. Getreide Mehl and Brot. – № 3. – v. 34. – 1980.

229. **Deyoe C. W., Tiemer O. W.** Channel catfish feeding researeh. Feedstuffs, 1966. – P. 2.

230. **Expanders.** Milling, flour and feed, 1990. – 183, 9. – P. 17-20.

231. **Herri Pfost.** Extruders: selection and installation. Feedstuffs. – № 52. – 1980.

232. **Feed manufacturing technology**, 1985, v. 3, American feed uss., Inc. – 636 p.

233. **Fernandes J. P.** at all. A note on the use of mironised barley growing pigs. Animal Prod., 1975. – P. 20, 307-310.

234. **Fernandes T. H., Hutten K., Snuth W. C.** A note on the use of mikronized barlei growing pigs. Animal Prodaktion. – № 20. – 1975.

235. **German M. L., Blumenfeld A. J.** at all. Structure formation in systems conditioning amylose, amylopectin and their mixtures. Cortohydr. Polimers, 1992. – Vol. 18. – № 1.

236. **Handot B.** La micronisation un procede simple et Valorisation de traitement des cereales. Economie agricole. – 1976. – № 1.

237. **Heimer J. G., Bartley E. E., Deyoe C. W.** Comparison of statea, urea and soybean meal as protein sources for lactating diary cows. *J. Diary Sci.*, 1970. – P. 53, 883-887.
238. **Heimer J. G., Bartley E. E.** at all. Effect of an expansion – processed mixture of urea (statea) on nitrogen utilisation in Vitro. *J. Diary Sci.*, 1970. – P. 53, 330-335.
239. **Knier H.** at all. Pellet mill operation manual. 1982 – Amer. feed manuf. ass., June.
240. **Kort K.** Micronisation – a new food processing technique. *Milling*, 1973. – 155, 6, 40-41.
241. **Kurs M.** Infrared roasting of seed – kernel. *Food Trade Rev.*, 1987. – P. 57, 2.
242. **La urence J.** Anevaluation of the micronisation process for preparing cereals for growing pig. *Animal prod.*, 1983. – P. 16, 2.
243. **Leaver K. H.** The pelleting process. *Koppers Comp.*, June, 1987.
244. **Tiener J. E.** Toxic constituents of plant foodstuffs. 1969 – Acad. Press., My.
245. **Tiener J. E.** Nutritional significance of natural occuring protease inhibitors. In: Symposium of swedish nutrition foundation II on intestinal enzyme deficiencies and their nutritional implications, 1973.
246. **Maister U., Scheeweid V.** Untersuchung des Einfluses der Extrusienparameter auf Verleisterungsgrad und Viskositat von Reismehle – extrudat, Lebensmittelindustrie, 1984. – P. 1, 27.
247. **Miksir F.** Micronized grain and legume seeds for better stability palatability, digestibility. *Food prod. Develop.*, 1979. – P. 13, 7.
248. **Moore K.** Micronizing process and working out the new food produests. *Food prod. devel.*, 1979. – P. 13, 7, 36-44.
249. **Neue Tendenzion** in Technologie der Mischfutters – Vorbereitung. *Die Muhle and Mischfuttertechnik*. – № 25. – 1979.
250. **Padmanabhan M., Bhattacharija M.** Extrudate expansion during extrusion cooking of foods. *Cer. food world*, 1989. – P. 11, 945.
251. **Pham C. B.** Del Rozario. Studies of the development of texturized vegetable products by the extrusion process. III. Effects of process invariables of thiamin retention. *J. Food Jeehm*, 1986. – P. 21, 569.
252. **Perry F. G.** Guality aspects of adding full fat soybeans and oil in feeds. 1980, B. P. Nutrition.
253. **Putnan M.** Micronizing – a new food processing technique. *Flour and animal feed milliny*. 1973. – P. 155, 6, 40-41.
254. **Salsburg R. J., Hoefer J. A., Jneekc R. W.** Effect of heatiry starch on its digestion by rumen microorganisms. *J. Anim., Sci.*, 1961. – P. 20, 569.
255. **Seib P.** Starch gelatinization – chemical and physical effects. *Foodstuffs*, 1971. – P. 93, 11, 44-45.

256. **Scibel W., Seiler K.** Zusatz extrudieren Weizenmehle bei und der Herstellung von Stäten und Stellen. Gest.n.K., 1986. – P. 6, 190.

257. **Seiler K.** Rohstoffe und Extrusion. Goardian, 1980. – P. 9, 210.

258. **Smith A.** Extruzion cooking – A revin. Food Sci. anl Jech. Today, 1989. – P. 3, 156.

259. **Smith O. B.** Factors in conditioning pellet mash. 1969 – Jranscript, Feed prod. school.

260. **Smith O. B.** Versability of the extrusion cooker – 1974. Petfood industry, May–June.

261. **Splitek K.** Mikronisase novy spůsob upravy Krmiv. Krmivarsti sluzby. 1974. – № 10, 1.

262. **Tester L.** Bestere Futter verwetung durch Mikronisation pflanslicher Futterkomponenten. Gefugelpoduzent 1975. – 11.

263. **Jruax H.** Method of treating soybeans and the line using infrared heat. – Patent USA, № 3343961, Sept. 1987.

264. **Untersuchungen** zum Einsatz von warmbehandelten Weizen in Forellenmichfutter. – Kraftfutter, 1982.

265. **Vaniopaa J.** Modelling and analyses of the extrusion cooking of cereals and cerealbased mixtures using responce surfase methodology. – Finland: VVT Publ., 1994, 183. – P. 1-160.

266. **Die Warmbehandlung** von Getreide eine richtungweisende Technologie fiir der Heistelling proteinreduzierten Fischfutter. – Kraftfutter № 2. – 1982.

