

БИОХИМИЧЕСКИЕ И БИОФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЗАМОРАЖИВАНИЯ

*Карел Кулыг (Karel Kulp)
Манхеттен, Канзас 66502*

Охлаждение и замораживание расширяет функциональность дрожжевого и бездрожжевого теста за счет использования пониженных температур хранения. Охлаждение применяется для кратковременного хранения, а замораживание — для продолжительного. Очевидное требование, предъявляемое к замороженному и охлажденному тесту, заключается в том, что по функциональным свойствам оно должно быть сопоставимо со свежемешанным тестом. Естественно ожидается, что качество готовых изделий из замороженного или охлажденного теста аналогично качеству изделий, произведенных без использования процедур охлаждения. Срок хранения замороженного дрожжевого и бездрожжевого теста обычно составляет несколько недель, а охлажденного — только несколько дней. В работе [42] сообщается, что производитель будет гарантировать хорошие свойства замороженного теста до 16 недель, а некоторые экспериментальные исследования показали высокую стабильность теста после 24 недель хранения — стабильность, которая еще не достигнута в обычных производственных условиях.

Замороженное тесто

Дрожжевое тесто для выпечки хлеба

Тесто для выпечки хлеба — типичный продукт, который используется в замороженном состоянии. Оно приготавливается по существу таким же способом, как и при производстве традиционного хлеба. В его рецептуру входят мука, шортенинг (жировой продукт), соль, улучшители, хлебопекарные дрожжи и вода. Самый простой и наиболее распространенный метод приготовления теста — одностадийный, при котором все ингредиенты смешиваются одновременно. Полностью замешанное тесто для хлеба имеет определенные реологические свойства: оно пластично и растяжимо, а его консистенция соответствует требованиям дальнейшей механической обработки. Структура и газоудерживающая способность теста преимущественно зависят от свойств клейковины — гидратирован-

ных белков пшеничной муки. Уникальные упругоэластичные свойства клейковины формируются при замесе в результате взаимодействия с белками муки. В приготовлении замораживаемого теста особенно важны стадия замеса и последующие механические операции (разделка, округление, резка, формование), которые, возможно, более важны, чем при традиционном приготовлении хлеба, поскольку образование и изменение клейковины происходит только во время этих операций. В отличие от традиционных способов хлебопекарного производства при использовании замораживания отсутствует возможность исправить реологические дефекты теста последующей механической переработкой после замораживания тестовых заготовок. Короче говоря, приготовленные к замораживанию полуфабрикаты должны обладать оптимальными реологическими свойствами (консистенцией и растяжимостью), а также иметь полностью сформированную клейковину. Эти свойства позднее отразятся на продолжительности созревания теста и показателях качества конечного изделия — главным образом на удельном объеме, структуре и текстуре мякиша, а также внешнем виде хлеба. В этом отношении требования к свойствам теста для замораживания выше, чем к другим видам теста хлебобулочных изделий. Оно должно быстро сбраживаться, что выражается в относительно короткой длительности созревания (расстойки), и производимый из него конечный продукт (хлеб) должен обладать большим удельным объемом.

Сила муки зависит не только от количества, но и от качества содержащихся в ней белков. Эти факторы в свою очередь зависят от сорта и внешних условий (среды) выращивания пшеницы, из которой была произведена мука, мукомольного процесса и сорта муки (степени ее очистки). Для замораживаемого дрожжевого теста используется мука высокого качества из пшеницы твердых сортов с высоким содержанием белков 12-13% [N5, 1] и зольностью 0,4-0,5%, с содержанием влаги 14% и низким уровнем повреждения крахмальных зерен и невысокой ферментативной активностью. Технологические схемы производства с этапом охлаждения не предъявляют к спецификации муки специальных требований по сравнению с традиционным производством. В этом случае приемлемы наиболее распространенное содержание белков, средние уровни повреждения крахмала и традиционная ферментативная активность. Этап охлаждения не требует муки с характеристиками смешивания и стабильности, отличными от тех, которые используются в традиционном производстве.

С другой стороны, длительность замеса для замораживаемого теста не должна быть слишком продолжительной, поскольку чрезмерная дополнительная механическая обработка теста генерирует теплоту и усиливает брожение, которые должны быть минимизированы при приготовлении замораживаемого теста. Как отмечалось в главе 2, чем интенсивнее брожение на стадии приготовления теста, тем чувствительнее становятся дрожжи к повреждающему воздействию замораживания. Мука с высоким содержанием белков из хороших сортов пшеницы является сильной и позволяет получать замороженное тесто с хорошей стабильностью [22]. Тем не менее мука такого типа может иметь не оптимальные свойства при промышленном производстве, так как она может потребовать слишком длительного замеса, который, как отмечалось выше, приводит к интенсификации брожения. Эти условия не так важны для лабораторных экспериментов, как для массового производства, при котором температуру теста значительно труднее контролировать.

Обычно считается, что свойства белков. К сожалению, в этой области до сих пор не удавалось выявить этот фактор.

Основные белковые компоненты формируются очень сложными процессами. Состав теста состоит по меньшей мере из 100 белков, причисленных к шести классам. Более 100 белков, причисленных к шести классам, являются полимерами. Каждый сорт пшеницы содержит глютелины, что позволяет анализировать их методами аналитической химии. Подробное описание их свойств в литературе [6], и с его помощью можно объединить с желатинами. Этот метод «отпечатков» муки при различных условиях используются технологи.

Хотя метод «отпечатков» пшеничной муки, в какой-то мере качества производимой муки, качества хлебопекарной муки все еще ненадежна. Связь между присутствием белков в тестовой массе, определяемыми свойствами муки [37, 38]. И ранжированы по их величине могут быть полезны для североамериканских производителей.

При определении состава пшеничных белков, молекулярное соотношение сульфгидрильных групп.

Недостаток этих методов вечающим специфичность производства замораживаемого теста, что ключевым фактором является состав и присутствие клейковинный комплекс. Прогнозированию качества управления исследований структуры в замороженном тесте могут улучшить свойства пшеницы для производства или генной инженерии.

Обычно считается, что при выборе муки важным фактором является качество белков. К сожалению, вопреки интенсивным усилиям различных ученых и лабораторий до сих пор не удалось получить точного определения и полного понимания этого фактора.

Основные белковые компоненты клейковины (глиадин и глютелин) характеризуются очень сложной структурой и являются гетерогенными [5, 48]. Глиадин состоит по меньшей мере из трех подклассов, которые кодируются комплексными локусами на шести хромосомах. Жестко связанные гены в этих локусах кодируют более 100 белков, причем глютелин еще сложнее глиадин. Его компоненты, кодируемые шестью комплексными локусами, взаимодействуют, образуя длинные полимеры. Каждый сорт пшеницы имеет постоянный состав компонентов глиадина и глютелина, что позволяет обнаруживать и идентифицировать различные сорта аналитическими методами (например, с помощью гель-электрофореза, жидкостной хроматографии под высоким давлением и их комбинаций) и получать однозначное описание их структуры. Такой процесс напоминает снятие отпечатков пальцев [6], и с его помощью можно обнаружить присутствие в сортах белковых субъединиц с желательными функциональными свойствами. К сожалению, подобный метод «отпечатков пальцев» не позволяет прогнозировать поведение муки при различных технологических хлебопекарных операциях, в чем так нуждаются технологи.

Хотя метод «отпечатков пальцев» позволяет обнаружить конкретные сорта пшеничной муки, в какой-то степени позволяя дифференцировать их для повышения качества производимой и поставляемой муки, для повседневного прогнозирования качества хлебопекарной муки для пшеницы североамериканских сортов эта процедура все еще ненадежна. С другой стороны, экспериментально наблюдается корреляция между присутствием определенных компонентов глютенина с высокой молекулярной массой, определяемых с помощью гель-электрофореза, и хлебопекарными свойствами муки [37,38]. Различные компоненты с высокой молекулярной массой были ранжированы по их влиянию на хлебопекарные свойства муки [36]. Эти результаты могут быть полезны для английских сортов пшеницы и муки, но мало достоверны для североамериканских и австралийских сортов пшеницы.

При определении качества пшеничных белков, кроме профиля компонентов (состава) пшеничных белков, необходимо учитывать и другие факторы, например, состав белков, молекулярные размеры белковых скоплений (агрегатов) и расположение сульфгидрильных групп в молекулах белка.

Недостаток этих знаний препятствует отбору подходящих сортов пшеницы, отвечающим специфическим технологическим и хлебопекарным требованиям, включая производство замороженного теста. Имеющиеся научные данные свидетельствуют, что ключевым фактором в определении качества белков является распределение, состав и присутствие определенных белковых компонентов, образующих клейковинный комплекс. Хотя в настоящее время отсутствует единый подход к прогнозированию качества, определенные результаты говорят в пользу этого направления исследований. Важно понять механизм стабильности клейковинной структуры в замороженном тесте и идентифицировать белковые компоненты, которые могут улучшать это свойство. Эти знания позволят получить улучшенные сорта пшеницы для производства замороженного теста, используя методы селекции и/или генной инженерии.

Образование и стабильность клейковины

При формировании теста необходимо преобразовать мелкие частицы клейковины в крупную когезионную систему, обладающую вязкоупругими и когезионными свойствами. На первой стадии замеса белки гидратируются и при последующем перемешивании взаимодействуют друг с другом. В образовании клейковинного каркаса наряду с взаимодействующими белками участвуют и другие компоненты муки — липиды, соли, некрахмальные полисахариды и крахмал.

Вязкоупругие свойства теста в основном определяются сплошной белковой фазой, которая обволакивает зерна крахмала в полностью сформированном тесте [48]. Реологическое поведение клейковинной структуры зависит от молекулярных свойств взаимодействующих компонентов и типа связей, вовлеченных в полимерную клейковинную матрицу. Согласно [10], прочность полимерной цепи определяется концентрацией и силой поперечных межмолекулярных связей, молекулярной массой областей с взаимно пересекающимися связями, а также средней молекулярной массой и распределением молекулярной массы образующих полимеров. Данные, приведенные в работах [22, 33], позволяют сделать вывод о том, что высокий уровень содержания компонентов глютелина с высокой молекулярной массой повышает силу муки.

Значение типа муки и свойств клейковины со всей очевидностью подтверждаются молекулярными характеристиками муки. Химические связи, стабилизирующие полностью сформированные белки клейковины в тесте, являются вторичными и ковалентными. Участвующие в этом ковалентные связи — дисульфидные, которые в ходе формирования теста посредством сульфид-дисульфидного взаимодействия образуют внутри- и межмолекулярные поперечные связи [48], а вторичные связи — это водородные, гидрофобные и ионные связи и полярные взаимодействия [8,9, 49, 50]. Хотя вторичные связи довольно слабы, их значением не следует пренебрегать, поскольку в виду их многочисленности они образуют прочные ассоциации. Некоторые исследователи считают вторичные связи даже более важными, чем поперечные дисульфидные связи.

Небелковые ассоциации, которые могут воздействовать на реологию и стабильность клейковины, изучены слабо. К ним относятся нековалентные белково-липидные комплексы; ковалентные связи с гемицеллюлозами муки и, возможно, с олигосахаридами, а также вторичные связи с поверхностью зерен крахмала [14, 34]. В работах [11,13] сообщается об ассоциации между углеводами и некоторыми компонентами глютелина с высокой молекулярной массой.

На стабильность замороженного теста может оказывать влияние возможное разрушение и преобразование ковалентных и вторичных связей. Физические и химические реакции, протекающие при замораживании и хранении в замороженном состоянии, происходят в результате образования льда и взаимодействия «дрожжи— тесто». Физическое разрушение вторичных связей в тесте и дрожжах в основном вызывается образованием льда, и утрата вторичных связей, по-видимому, изменяет упорядоченность белковых молекул и вследствие этого оказывает неблагоприятное воздействие на их свойства. Химические вещества, разрывающие ковалентные связи (например, дисульфиды посредством восстанавливающего действия глутатиона), образуются в результате взаимодействия между мигрирующими из дрожжей веществами и окружающей клейковинной структурой теста. При

производстве замороженных изделий с помощью химии имеет целью сохранение полной регидратации и в этих целях используются комплексы с белками и дисульфидов белка в более об этом см. главу 5. Соединением в сульфид-дисульфидное соединение молекулярной массы глютелином). Броматная реакция — не главный элемент хлебобулочных изделий и другая реакция, при которой низкой молекулярной пептидов из белков клейковины.

Хотя физические реакции в тестах хлебобулочного производства являются важной частью свойств теста, стабильность теста устанавливается после замораживания.

Измерение

Стабильность свойств теста, который показывает стабильность, отражает растяжимость и эластичность теста. Характеристика теста при замораживаемом тесте, необходимая для изучения влияния различных условий, не можем разморозить. Наиболее подходящей методикой экстенсографический метод, вавшийся также в работе [1] для изучения реологии и размораживания.

Достоверно установлено, что в хлебобулочных изделиях происходит уменьшение газовой пористости вследствие высвобождения

Клейковины

... частицы клейко-
... и когезионны-
... при последующем
... клейковинного
... и другие компоненты

... белковой фа-
... сформировавшемся
... зависит от молеку-
... связей, вовлеченных в
... полимерной цепи
... связей, моле-
... а также средней
... образующих поли-
... вывод о том, что
... молекулярной

... подтвержде-
... стабилизирую-
... являются вторичными
... дисульфидные, кото-
... взаимодей-
... [48], а вторичные
... взаимодействия
... не следует пре-
... прочные ассоциа-
... более важными, чем

... реологию и стабиль-
... белково-липид-
... возможно, с олиго-
... крахмала [14, 34].
... и некоторыми ком-

... влияние возможное
... связей. Физические и хи-
... в замороженном
... взаимодействия «дрож-
... и дрожжах в основ-
... связей, по-видимому, из-
... оказывает неблаго-
... вещества, разрывающие
... восстанавливающего дей-
... между мигрирующи-
... структурой теста. При

производстве замороженного теста эти изменения лимитируются технологически или с помощью химических добавок. Оптимизация производства в этом случае имеет целью сохранение структуры теста, а для этого нужно обеспечить максимальную регидратацию и восстановление его структуры в процессе размораживания. В этих целях используются поверхностно-активные вещества (ПАВ), которые в комплексе с белками клейковины стабилизируют ее структуру, и преобразование дисульфидов белка в клейковину под действием добавляемых окислителей (подробнее об этом см. главу 5). Как показало исследование [35], броматы, наряду с участием в сульфид-дисульфидном взаимодействии, изменяют кажущееся распределение молекулярной массы и экстрагируемость липидов белками клейковины (или глютелином). Броматы увеличивают долю агрегированного глютелина (Р₂). Эта реакция — не главный элемент способности окислителя (броматов) повышать объем хлебобулочных изделий. С позитивным влиянием броматов на их объем связывается и другая реакция, происходящая в результате нековалентной агрегации белков с низкой молекулярной массой параллельно с пониженной экстрагируемостью липидов из белков клейковины (или глютелина).

Хотя физические реакции не являются полностью обратимыми, реальная практика хлебопекарного производства показывает, что при оптимальных условиях значительная часть свойств теста с помощью замораживания сохраняется и затем восстанавливается после размораживания.

Измерение свойств замораживаемого теста

Стабильность свойств традиционного теста определяется на фаринографе, который показывает стабильность теста в процессе замеса, на экстенсографе, который отражает растяжимость и сопротивление растяжению, и на миксографе, дающем характеристики теста при замесе. Эти же приборы могут использоваться при оценке замораживаемого теста после использования соответствующих приемов. Информация, необходимая для оценки замораживаемого теста, включает его стабильность и влияние различных улучшителей. Чтобы получить достоверную информацию, мы не можем разморозить и заново осуществить процесс замеса испытываемого теста. Наиболее подходящей процедурой для оценки замораживаемого теста оказывается экстенсографический метод в модификации, описанной в работе [45] и использовавшийся также в работах [46, 47]. Более новый метод, использующий релаксацию напряжений и осциллографический анализ небольших деформаций, был применен в [1] для изучения реологических изменений в тесте, подвергнутому замораживанию и размораживанию.

Реологические исследования замороженного теста

Достоверно установлено, что при хранении замороженного теста для хлебобулочных изделий происходит постепенная потеря им качества, связываемая с уменьшением газодерживающей способности. Это изменение обычно объясняется высвобождением из дрожжевых клеток восстанавливающих веществ (в основ-

влияние может стать заметным, вследствие чего использование таких ингредиентов при производстве теста с продолжительным холодильным хранением не рекомендуется.

ВЛИЯНИЕ МЕТАБОЛИТОВ СПИРТОВОГО БРОЖЕНИЯ

Общепризнанно, что брожение теста перед замораживанием снижает его стабильность и качество хлеба. Данный эффект обычно приписывается повреждению дрожжей вследствие замораживания, выделению из дрожжевых клеток глутатиона и возможно других восстановителей.

Влияние продуктов брожения дрожжей изучалось в работе [19] с использованием жидкой системы ферментов [31]. Суспензия дрожжей, смешанная с буферной жидкой питательной средой, включавшей сахар, выращивалась в течение 3 ч при температуре 30 °С. Дрожжи после брожения (ниже мы будем называть их «адаптированными дрожжами») отделялись с помощью центрифуги. Центрифугат содержал все водорастворимые метаболиты брожения, которые разделялись на летучую и нелетучую фракции. Адаптированные дрожжи по сравнению с неактивированными были несколько более чувствительны к повреждающему воздействию замораживания и, как уже отмечалось, пониженной способностью к газообразованию.

Если центрифугат, содержащий все продукты брожения, добавляется к дрожжам и замораживается, он повреждает дрожжи. При этом летучая фракция характеризуется большим повреждающим действием, чем нелетучая. Вместе с тем добавление фракций совместно является менее повреждающим, поэтому можно предположить, что некоторые очень летучие компоненты теряются в процессе разделения фракций. Эти результаты показывают, что дрожжи в замороженном тесте могут терять часть бродильной способности из-за физиологического воздействия на дрожжевые клетки, которое усиливается брожением перед замораживанием и/или действия некоторых метаболитов. Хотя метаболиты в этом исследовании специально не изучались, было показано, что добавление основного продукта, этанола, в количестве 2,5% вызывает значительную потерю дрожжами газообразующей способности. Возможно, авторы недооценили роль этанола в замороженном тесте, не приняв в расчет его возрастающую концентрацию в остаточной незамерзшей жидкости в замороженном тесте. Это воздействие все же трудно предсказать из-за низких температур среды, в которой этанол мог бы иметь функциональное действие. Тем не менее вполне возможно, что метаболиты дрожжей могут являться важным фактором стабильности замороженных дрожжей с последующим влиянием на свойства теста (например, они могут обуславливать более высокую «миграцию» жидкости из дрожжевых клеток).

ВЛИЯНИЕ НА СТРУКТУРУ ТЕСТА ОБРАЗОВАНИЯ ЛЬДА

В работе [45] для наблюдения за изменениями клейковинного каркаса в тесте, подвергнутому замораживанию и размораживанию, использовалась электронная микроскопия. На основании этих наблюдений авторы пришли к заключению, что изменения клейковинного каркаса частично вызваны вторичной кристаллизацией льда, которая проявляется в увеличении размеров его кристаллов. Известно, что вторичная кристаллизация вызывает отделение молекул воды от макромолекул, к которым они прикреплены.

Эти свидетельства были дополнены данными реологических исследований свойств теста и их изменений в ходе хранения в замороженном состоянии. Использовалась модифицированная экстенсографическая методика, описанная в статьях [19, 20]. Готовили куски теста цилиндрической формы по ускоренному способу [19], сбразивали в течение 40 мин, формовали в экстенсографе, заворачивали в алюминиевую фольгу, замораживали при температуре -18°C , и затем при этой температуре хранили в течение двух месяцев. Перед испытанием замороженное тесто размораживалось (все еще завернутое в фольгу) в камере с постоянной температурой 30°C и относительной влажностью 90%. Когда температура теста достигала $28 \pm 1,5^{\circ}\text{C}$, оно испытывалось на растяжимость и сопротивление растяжению (на 5 см) на экстенсографе Брабендера. Экстенсограммы бездрожжевого и дрожжевого (рис. *АЛ, аи б*) теста показывают воздействие холодильного хранения на две пробы типа теста и трех циклов замораживания-размораживания на свойства теста, приготовленного по разным рецептурам. Сравнение этих рисунков свидетельствует о воздействии дрожжей, которые очевидно влияют на свойства теста.

С другой стороны, наблюдался эффект укрепления теста (в замороженном и тесте после замораживания-размораживания). Вероятнее всего, изменение реологических свойств теста связано с окислительным действием бромата калия, входившего в рецептуру. Хотя оно наблюдалось и в бездрожжевом, и в дрожжевом тесте,

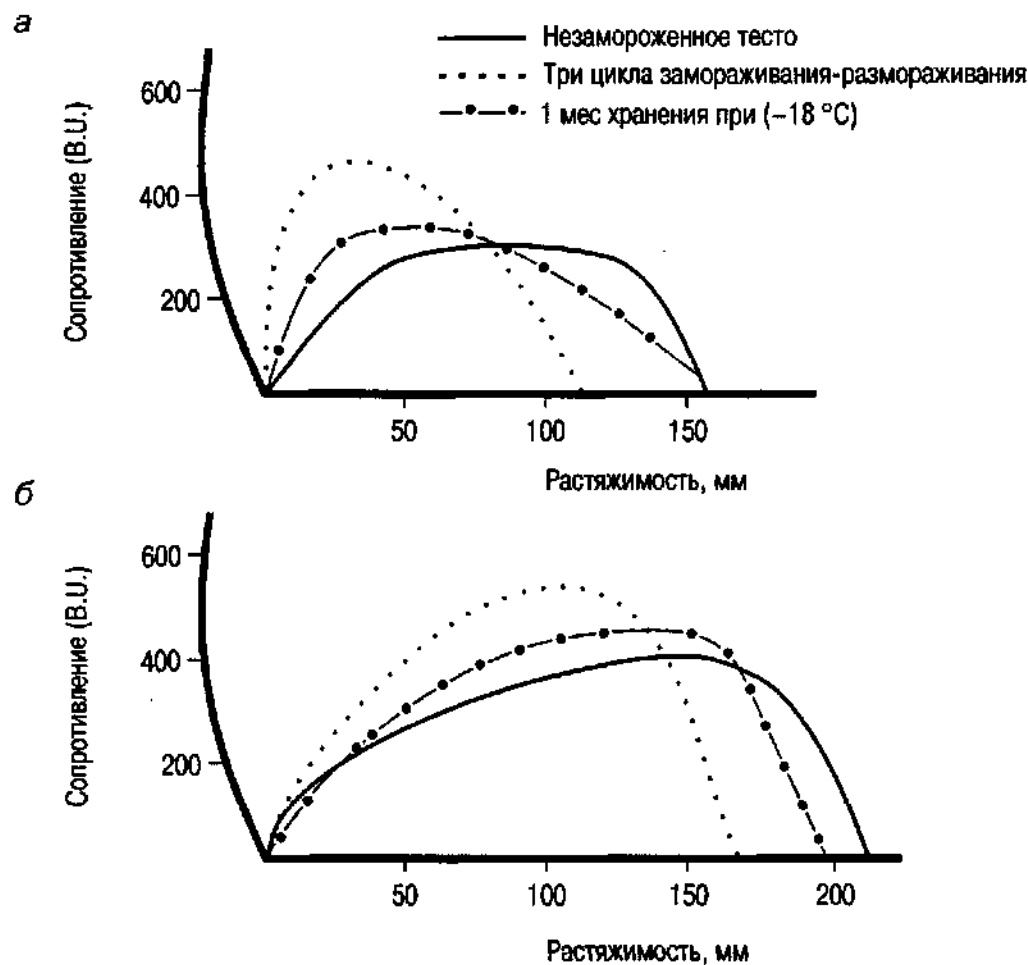


Рис. 4.1. Экстенсограммы теста, содержащего 20 ppm (частей на миллион) бромата калия (а) и бездрожжевого теста (б) при различных условиях. (По [45])

в последнем оно выражено в виде окислителя было частыми дрожжевыми клетками.

В работе [47] оценивали кулярной массой, выделяемой, на стабильность теста структуру. Используя методичную применявшейся в табл. 4.1. Из них следует, что с увеличением срока хранения увеличивается на усиление свойств связано с окислительным результаты хорошо согласуются.

Таблица 4.1. Влияние хранения на хлебопекарские характеристики дрожжевого теста

Продолжительность хранения полуфабрикатов

Незамороженное тесто

1 сутки

2 суток

4 суток

6 недель

8 недель

10 недель

¹ Отношение сопротивления растяжению к растяжимости

Укрепление теста и отмеченное в этих двух случаях изменение структуры клейковины в результате действия от кристаллов сахара, такое ослабление является следствием, вызванных либо дозировкой, либо другими факторами, являющимися природными факторами.

Данные о воздействии на свойства теста и дрожжей, менее важны, чем механические свойства теста и дрожжей, оценили концентрацию дрожжевых клеток, которые в течение хранения и расстойки могут изменяться.

Проведенные в 1990 г. исследования [46], подтвердили ослабление теста в последующих циклах замораживания-размораживания, но в экспериментах 1991 г.

в последнем оно выражено меньше, в связи с чем можно предположить, что действие окислителя было частично нейтрализовано восстановителями, выделенными дрожжевыми клетками.

В работе [47] оценивалось влияние компонентов сульфгидрида с низкой молекулярной массой, выделенных из поврежденных замораживанием дрожжевых клеток, на стабильность теста и воздействие физического повреждения льдом на его структуру. Используя модифицированную экстенсографическую методику, аналогичную применявшейся в исследовании [45], были получены данные, приведенные в табл. 4.1. Из них следует, что в бездрожжевом и дрожжевом тесте с увеличением срока хранения увеличивается отношение сопротивления к растяжимости, указывающее на усиление свойств теста в процессе хранения, которое, вероятнее всего, связано с окислительным действием бромата калия, входившего в рецептуру. Эти результаты хорошо согласуются с ранее полученными данными [45].

Таблица 4.1. Влияние хранения замороженных полуфабрикатов на экстенсографические характеристики дрожжевого и бездрожжевого теста. По [46]

Продолжительность хранения полуфабрикатов	Отношение сопротивления к растяжимости ¹	
	Дрожжевое тесто	Бездрожжевое тесто
Незамороженное тесто	0,278	0,212
1 сутки	0,280	0,181
2 суток	0,283	0,210
4 суток	0,290	0,239
6 недель	0,305	0,283
8 недель	0,311	0,312
10 недель	0,376	0,412

¹ Отношение сопротивления к растяжимости после размораживания до 25 °С.

Укрепление теста и повышение силы клейковины при холодильном хранении, отмеченное в этих двух исследованиях, похоже, противоречит выводу, что ослабление структуры клейковины в замороженном тесте вызывается физическим повреждением от кристаллов льда. Правдоподобным объяснением может быть то, что такое ослабление является результатом происходящих в тесте окислительных реакций, вызванных либо добавленным броматом калия, либо некоторыми присутствующими природными окислителями.

Данные о воздействии восстановителей, выделенных замораживанием из поврежденных дрожжевых клеток [47], показывают, что по влиянию на реологические свойства теста и чрезмерное увеличение длительности расстойки эти вещества менее важны, чем механическое повреждение льдом. Возможно, что авторы недооценили концентрацию восстановителей в замороженном тесте в среде дрожжевых клеток, которые в течение хранения замороженных полуфабрикатов, размораживания и расстойки могут быть активными.

Проведенные в 1990 и 1994 гг. исследования экстенсографических характеристик замороженного теста [21, 23] по методике, использовавшейся в работах [45, 46], подтвердили ослабление дрожжевого теста, при хранении замороженного теста и последующих циклов его замораживания-размораживания, что было установлено в экспериментах 1980 г. [45]. Согласно результатам последних исследований, ос-

лабление свойств теста может происходить в результате действия на клейковинный каркас восстановителей, выделяемых дрожжевыми клетками, а также перераспределения воды, вызванного изменением способности компонентов муки связывать воду, или комбинации обоих факторов. Предыдущие экстенсографические исследования [45,46] указывали на то, что дрожжевое и недрожжевое тесто при хранении замороженных полуфабрикатов становится сильнее (рис. 4.2). Как видно из табл. 4.2, это заключение противоречит данным 1994 г. [23], что может быть объяснено различным действием окислителей: в этом исследовании использовалась аскорбиновая кислота, а предыдущие исследователи применяли бромат калия.

Таблица 4.2. Экстенсографические характеристики и газообразующая способность свежего и размороженного теста. По [23]¹²

Продолжительность холодильного хранения, сут.	Показатель			
	Максимальное сопротивление ² , BU	Растяжимость ² , мм	Газообразующая способность ³	
			мм рт. ст.	%
0 (контроль)	627 ± 6 a	121 ± 3 a	459 ± 6 a	100
1	530 ± 10 b	122 ± 3 a	447 ± 7 a	97
7	523 ± 12 b	123 ± 4 a	451 ± 16 a	98
7 ⁴	407 ± 6 c	121 ± 4 a	378 ± 9 b	82
70	360 ± 20 d	136 ± 4 b	254 ± 10 c	55

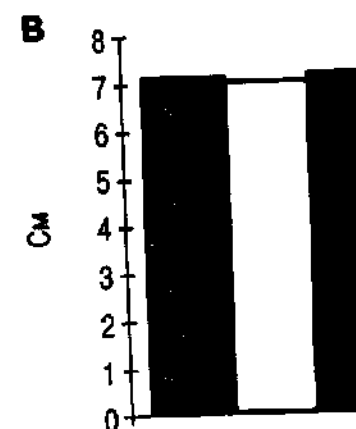
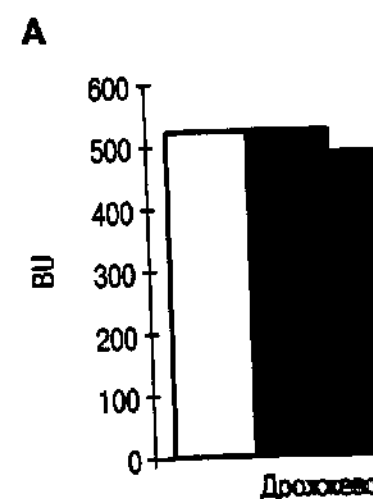
¹ В таблице приведены средние значения ± стандартные отклонения. Средние значения в столбце с разными буквами достоверно различаются ($P < 0,05$).

² Средние значения ± стандартные отклонения для трех повторностей.

³ Средние значения ± стандартные отклонения для двух повторностей.

⁴ Проведено три цикла замораживания-размораживания.

В этом же исследовании [23] было показано, что механизм ослабления теста в процессе хранения замороженных полуфабрикатов и вследствие повторяющихся циклов замораживания-размораживания может быть различным. Изменения в процессе холодильного хранения связаны с активностью дрожжей и сопутствующим ее воздействием на растяжимость теста (табл. 4.2). С другой стороны, снижение консистенции теста вследствие повторяющихся циклов замораживания-размораживания связано с растворимостью белков и связано с другим механизмом — кристаллизацией льда, высвобождением диоксида углерода или некоторыми другими неизвестными факторами. При замораживании также наблюдалась потеря белками теста некоторых олигомеров глютеина. Данные, приведенные в работе [43], указывают, что бромат калия является как раз тем веществом, которое влияет на укрепление свойств теста (рис. 4.2). Экстенсографические характеристики были получены на тесте для пиццы, приготовленном без добавления окислителей. При этом наблюдалось, что дрожжевое тесто без окислителей становится слабее после холодильного хранения предположительно из-за частичной деградации клейковины, а это указывает на то, что эффект увеличения консистенции теста, о котором шла речь выше, вызывался, вероятно, действием бромата калия. Наблюдались также минимальные изменения экстенсографических показателей бездрожжевого теста. Для подтверждения этого наблюдения и прояснения действия других окислителей необходимы дополнительные углубленные исследования.



■ Не замор

Рис. 4.2. Экстенсографические характеристики теста для пиццы. А — значения BU свежего теста. Б — значения BU размороженного теста.

Условия эксперимента: температура хранения — 4 °С, замораживание — морозильная камера.

ВОЗДЕЙСТВИЕ

В исследовании [47] было показано, что замораживание теста приводит к снижению его консистенции. Это связано с тем, что при замораживании происходит разрушение структуры теста, что приводит к снижению его эластичности. Кроме того, замораживание приводит к образованию льда, который разрушает структуру теста. Это приводит к снижению его эластичности и к тому, что тесто становится более жестким. Вместе с тем замораживание приводит к тому, что тесто становится более жестким. Вместе с тем замораживание приводит к тому, что тесто становится более жестким.

...действия на клейковинный... а также перераспре... компонентов муки связывать... экстенсографические исслед... дрожжевое тесто при хранении... (рис. 4.2). Как видно из... это может быть объяс... вании использовалась ас... бромат калия.

газообразующая способность

Газообразующая способность	
мм рт. ст.	%
459 ± 6 а	100
447 ± 7 а	97
451 ± 16 а	98
378 ± 9 б	82
254 ± 10 с	55

Средние значения в столбце

...ослабления теста в... повторяющихся... Изменения в... дрожжей и сопутствующ... другой стороны, сниже... замораживания-размо... другим механизмом —... некоторыми дру... наблюдалась потеря... приведенные в рабо... воздействием, которое влия... эстетические характеристики... окислителей. ...становится слабее по... деградации клей... стенности теста, о кото... калия. Наблюдалось... бездрожжевого... действия других окис...

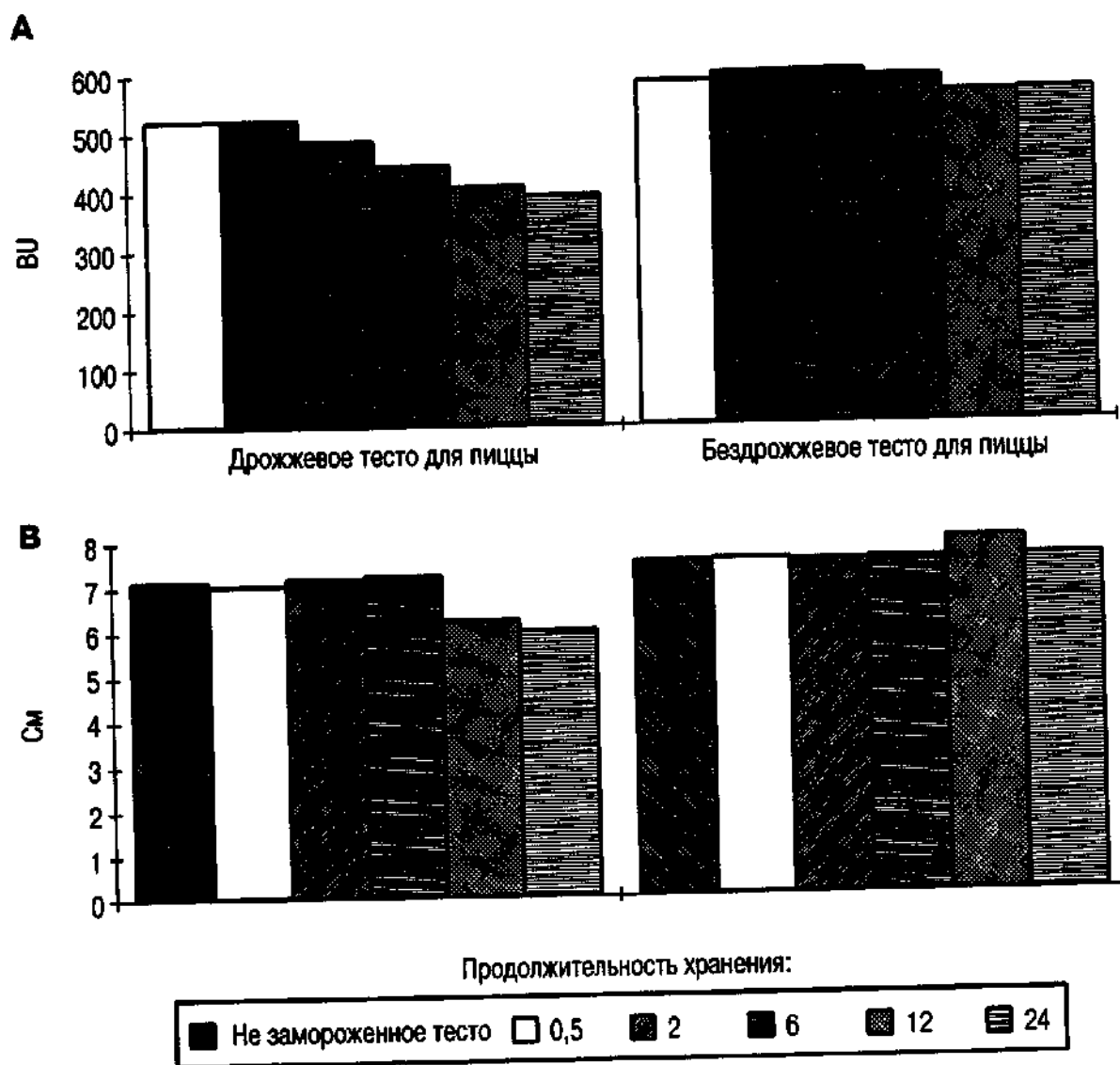


Рис. 4.2. Экстенсографические характеристики теста без окислителей для пиццы. А — значения сопротивления растяжению дрожжевого и бездрожжевого теста; В — значения растяжимости для этих видов теста.

Условия эксперимента: изменение длительности хранения (от 0,5 до 24 ч при $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$) замороженного теста, хранившегося при $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 4 нед. и размороженного при $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 16 ч (По [43])

ВОЗДЕЙСТВИЕ ЗАМОРАЖИВАНИЯ ТЕСТА НА КРАХМАЛ МУКИ

В исследовании [47] также изучались изменения крахмала в выпекаемом из замороженного теста хлебе, и в качестве контроля использовался хлеб, выпеченный из незамороженного теста. Согласно полученным данным, характеристики крахмала в мякише хлеба, произведенном из замороженного теста, изменялись вследствие хранения замороженных полуфабрикатов. Эти изменения аналогичны тем, которые сопровождают черствение традиционного хлеба. Были выявлены значимые положительные корреляции между отношением амилоза/амилопектин, продолжительностью расстойки и объемом хлеба. Амилозо-амилопектиновое отношение имеет отрицательную корреляцию с продолжительностью холодильного хранения (табл. 4.3). Вместе с тем до сих пор не ясно, отражает ли эта взаимосвязь некий фундаментальный функциональный эффект или просто свидетельствует о высокой степени разложения растворимых полимеров крахмала в замороженном тесте.

Таблица 4.3. Влияние пищевых добавок на количество растворимого крахмала, амилозы и амилопектина, выделенных из мякиша хлеба, приготовленного из замороженного теста. По [47]

Добавка	Продолжительность хранения			
	1 сут	4 нед.	8 нед.	12 нед.
Контроль, %				
Растворимый крахмал	2,73	2,18	2,10	2,24
Амилоза	0,49	0,37	0,32	0,32
Амилопектин	2,24	1,81	1,78	1,92
Отношение амилоза/амилопектин	0,21	0,20	0,18	0,16
SSL¹, %				
Растворимый крахмал	2,13	2,23	1,77	1,64
Амилоза	0,31	0,38	0,18	0,15
Амилопектин	1,82	1,85	1,59	1,49
Отношение амилоза/амилопектин	0,17	0,20	0,11	0,10
DATA², %				
Растворимый крахмал	2,00	2,17	1,96	1,95
Амилоза	0,32	0,37	0,27	0,19
Амилопектин	1,68	1,80	1,69	1,76
Отношение амилоза/амилопектин	0,19	0,20	0,16	0,11
СМС³, %				
Растворимый крахмал	2,53	1,72	2,24	2,44
Амилоза	0,43	0,37	0,43	0,46
Амилопектин	2,10	1,35	1,81	1,98
Отношение амилоза/амилопектин	0,20	0,27	0,24	0,23

¹ Стеароиллактат натрия.

² Диацетилвинная кислота.

³ Карбоксиметилцеллюлоза.

Измерения упругопластичных свойств в исследовании [1] показали определенные изменения вследствие замораживания и размораживания. Во-первых, уменьшение модуля хранения S_u и увеличение t_u в замороженном и размороженном тесте связывается со снижением полимерных поперечных связей. Во-вторых, модуль релаксации напряжений и полупериод релаксации в замороженном тесте уменьшается. Уменьшение полупериода релаксации приписывается ослаблению клейковинного каркаса. Наконец, добавление мертвых дрожжевых клеток не оказывает влияния на реологические свойства теста, свидетельствуя о том, что высвобождение из дрожжей восстановителей из дрожжей не связано с ослаблением теста. Эти данные в целом соответствуют выводам, сделанным в [47].

В [1] отмечается, что замораживание и последующее размораживание при 4 °С увеличивает начальную температуру клейстеризации крахмала (табл. 4.4). Увели-

чение продолжительности. Авторы дают следующие рекомендации по стерилизации, измеряем (ДСК), зависит от распределения влаги и ее распределения в тесте. Свидетельством являются исследования в области (о) действенной стерилизации крахмала. Скорости диффузии во влажной среде.

Таблица 4.4. Влияние стерилизации крахмала

Виды тест
Незамороженное
Замороженное
Размороженное

Отмеченное влияние является незначительным. В ингредиентах. Отмечены влияния с крахмалом, кот

Замораживание разной предварительной замораживание вызывает изменения. Чтобы избежать замораживанием обычно инактивируется ферментативной активности на свойства теста. Выбор муки с низкими температурами ферментации заинтересованы в поддержании целостности. Замораживание и размораживание

чение продолжительности хранения теста при температуре 4 °С ведет к ее возрастанию. Авторы дают следующее объяснение: в нативном крахмале температура клейстеризации, измеряемая дифференциальными сканирующими калориметрами (ДСК), зависит от протяженности и типа упорядочивания зерен крахмала, содержания влаги и ее распределения [30]. Рост кристаллов в процессе хранения замороженного теста свидетельствует о том, что вода в тесте распределена по довольно большим областям (объемам) [3], в связи с чем повышение температуры начала клейстеризации крахмала в замороженном тесте может вызываться замедлением скорости диффузии воды в зерна крахмала или повышенной степенью кристалличности зерен.

Таблица 4.4. Влияние замораживания и размораживания на начальную температуру клейстеризации крахмала. По [1]

Виды тест	Условия эксперимента	Начальная температура, °С
Незамороженное	—	62,5 ± 0,5
Замороженное	30 °С в течение 2,5 ч	63,5 ± 0,5
Размороженное	4 °С в течение 17 ч	63,5 ± 0,5
	4 °С в течение 19,5 ч	63,5 ± 0,5
	4 °С в течение 23 ч	63,6 ± 0,5
	4 °С в течение 41ч	64,1 ± 0,5

Отмеченное влияние крахмала на свойства замороженного теста, похоже, является незначительным, указывая на то, что имеет место перемещение влаги в муке и ингредиентах. Отмеченное явление предполагает разрушение ассоциации клейковины с крахмалом, которое может быть частью процесса деградации теста.

Процесс замораживания

ПОДГОТОВКА ТЕСТА К ЗАМОРАЖИВАНИЮ

Замораживание различных растительных тканей зачастую требует специальной предварительной их обработки. Например, во многих растительных тканях замораживание вызывает вредные дефекты, вызванные ферментативными процессами. Чтобы избежать этих нежелательных реакций, ферменты перед замораживанием обычно инактивируют путем нагревания (бланширования). К счастью, в замороженном тесте эти проблемы не возникают из-за отсутствия негативной ферментативной активности. Ферменты, которые могут оказать отрицательное действие на свойства теста (например, протеазы и амилазы) можно исключить путем выбора муки с низкой активностью этих ферментов и отказа от использования в рецептуре ферментных препаратов. При производстве замороженного теста мы заинтересованы в полной ферментативной активности дрожжей и их физиологической целостности, а эта цель в значительной степени достигается путем использования соответствующих методов приготовления теста и условий замораживания и размораживания.

показали определен-
Во-первых, умень-
размороженном тесте
Во-вторых, модуль ре-
ном тесте уменьшает-
слаблению клейковин-
не оказывает влия-
это высвобождение из
тестом теста. Эти данные
замораживание при 4 °С
табл. 4.4). Увели-

ТЕМПЕРАТУРА ОХЛАЖДЕНИЯ И ЗАМОРАЖИВАНИЯ

Охлаждение теста требует снижения температуры лишь до 4 °С (температуры, поддерживаемой в обычном холодильнике), а замораживание требует, чтобы температура продукта была понижена до уровня, при котором происходит образование льда. В обоих случаях консервация пищевой системы (продукта, рассматриваемого в качестве системы) производится путем снижения скорости физических и химических реакций (изменений), которые происходили бы при комнатной температуре.

В зоне замораживания происходит целый ряд изменений [40, 41]. Во-первых, это фазовый переход воды в лед. В пищевой системе это изменение имеет более сложный характер, чем при замораживании чистой воды, включая многие другие изменения, связанные с этим фазовым переходом. В работе [41] указывается на то, что при замораживании разных тканевых систем необходимо принимать во внимание природу и состояние замораживаемого материала, а также вид предварительной обработки (например, бланширование), в ходе которой повреждаются клеточные стенки (оболочки). В необработанной растительной ткани (клеточные стенки в которой не повреждены) возможен осмотический водный обмен; в неповрежденной ткани на перемещение воды влияет скорость замораживания. Если последняя не слишком высока, значительное количество воды может перемещаться из клеток в межклеточную среду. Низкие температуры и образование льда зачастую для клеточных мембран бывает неблагоприятным, и это становится очевидным после размораживания, когда теряется осмотическая целостность и тургор. При ускоренном замораживании образование льда внутри клеток также может вызывать повреждение клеточной структуры и приводить к ферментативно индуцированным реакциям и, в свою очередь, к снижению вкуса и аромата.

Этот общий принцип пищевых технологий можно распространять для поведения свойств теста для хлеба. При замораживании теста для сохранения осмотического механизма перемещения воды важно поддерживать целостность оболочек дрожжевых клеток. Если это условие выполняется, в процессе замораживания-размораживания происходит водный обмен между дрожжевыми клетками и структурой теста (дегидратация вследствие образования льда и регидратация), и поддерживается обычная скорость брожения при созревании. Остальная часть теста не содержит живых микроорганизмов, которые необходимо сохранить, однако клейковинная матрица, являющаяся высокофункциональным компонентом теста, должна сохранить свои реологические свойства. Чтобы замороженная клейковина могла восстановить свое исходное состояние, которое она имела в незамороженном тесте, его физико-химические свойства должны оставаться неизменными. Очевидно, что для этого при переходе из замороженного состояния в процессе размораживания требуется регидратация и минимальные повреждения от химических реакций и физического повреждения льдом в течение замораживания и низкотемпературного (холодильного) хранения.

В работе [41] отмечается, что если пищевая система может храниться при очень низких температурах в переохлажденном состоянии без образования льда, ее качество сохраняется. Вместе с тем с образованием льда, который влияет на физические свойства теста, процесс замораживания усложняется. Хотя вода является основным компонентом теста и многих других пищевых систем, она не обязательно замерзает при обычной температуре замерзания, так как растворенные в ней вещества снижают точку замерзания. Кроме того, в этих системах не происходит быстрого

фазового перехода воды, но создает повышенную концентрацию процесса концентрации. Таким обстоятельством, является состояние воды, часть воды связана с белками.

Типичные кривые замораживания температуры в тесте (содержащем дрожжи и пищевой соли) и регистру кривой, замораживания температурных кривых в системе полностью замороженной (около -12 °С) — одна около -35 °С на кривой при —

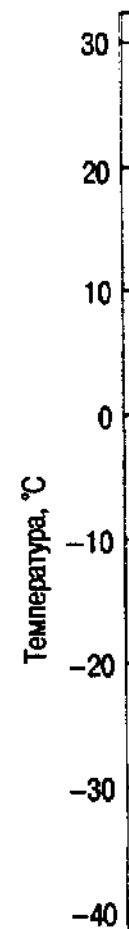


Рис. 4
ного в
турой.

ЗАМОРАЖИВАНИЯ

до 4°C (температуры, не требует, чтобы температура происходит образование льда, рассматриваемого физических и химических температур. [40, 41]. Во-первых, изменение имеет более включая многие другие [41] указывается на то, принимать во внимание вид предваритель повреждаются клеточные стенки в неповрежденной Если последняя не перемещаться из клеток в льда зачастую для клеточным после разрыв. При ускоренном вызывать поврежденным реакци-

странять для поведения хранения осмотическую целостность оболочек замораживания-разморожения (структурная деградация), и поддержать часть теста не потерять, однако клейковина компонентом теста, поврежденная клейковина льда в незамороженном неизменными. Очевидно, в процессе размораживания от химических реакций и низкотемпера-

храниться при очень образовании льда, ее качество влияет на физические свойства льда является основным не обязательно задержанные в ней вещества происходит быстрого

фазового перехода воды в лед, поскольку образование льда в водной фазе постепенно создает повышенную концентрацию растворимых веществ. В результате этого процесса концентрации точка замерзания постепенно понижается. Дополнительным обстоятельством, затрудняющим понимание процесса замораживания теста, является состояние воды в данной системе — кроме свободной воды, значительная часть воды связана с белками, углеводами и пентозанами [41].

КРИВЫЕ ЗАМОРАЖИВАНИЯ

Типичные кривые замораживания, приведенные на рис. 4.4 [20], описывают изменение температуры в процессе замораживания теста. По рецептуре в исследованном тесте содержалось 3% сахара, 1,5% от массы муки хлористого натрия (поваренной пищевой соли) и другие дополнительные виды сырья. Судя по первому перегибу кривой, замораживание начинается при температуре около -4°C . На температурных кривых видны две эвтектические точки — температуры, при которых в системе полностью завершается образование льда (они обозначены стрелками) — одна около -12°C на кривой для замораживания при -20°C , а другая около -35°C на кривой при -40°C . Замораживание при -10°C никогда не достигает эв-

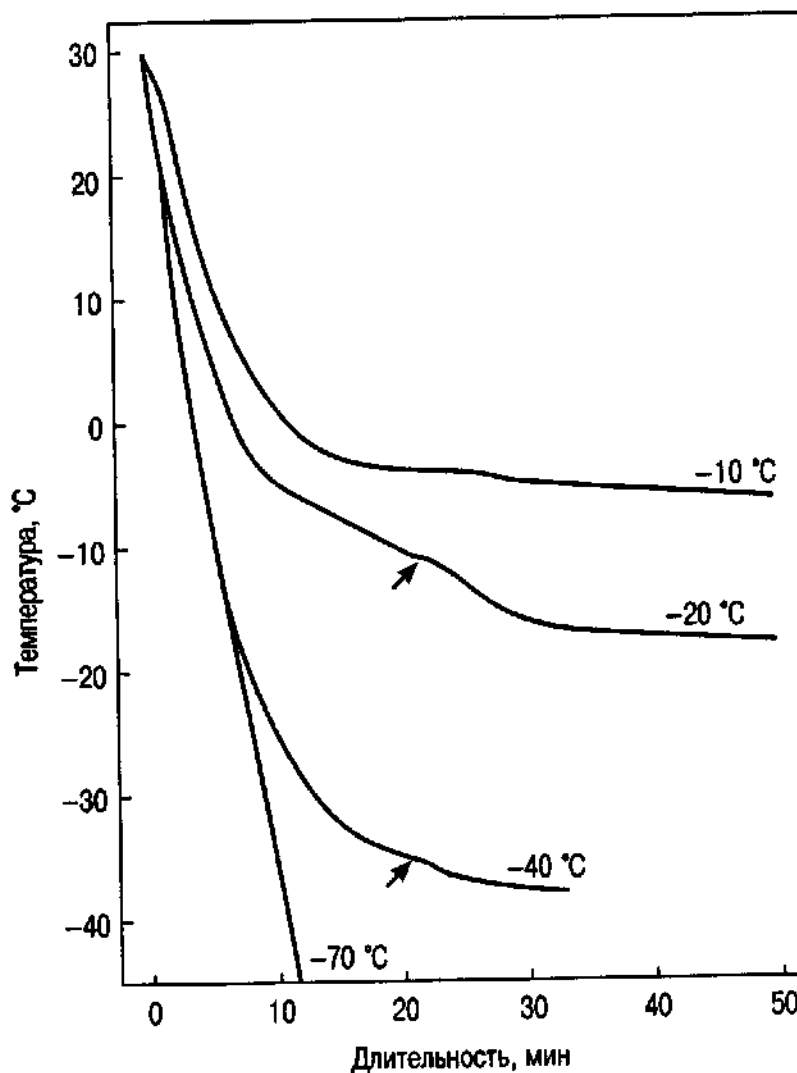


Рис. 4.4. Кривые замораживания теста, погруженного в ванну с контролируемой указанной температурой. Стрелками отмечены эвтектические точки около -12 и -35°C . По [20]

тектической точки, а при -40°C эвтектическая точка едва заметна из-за быстрого процесса замораживания. При замораживании при температуре -78°C эвтектическая точка не фиксируется.

Кривая замораживания для дрожжевой суспензии, приведенная на рис. 4.5, показывает, что суспензия дрожжевых клеток не имеет отчетливой начальной точки замерзания, но по наклону кривой можно предположить, что большая часть воды замерзает при температуре около -8°C . Процесс замораживания не завершается, пока температура не опустится ниже -35°C . Эти данные свидетельствуют о различии характеристик замораживания бездрожжевого теста и дрожжевой суспензии (ср. кривую при -78°C на рис. 4.5 с кривыми при -40°C и -78°C на рис. 4.4).

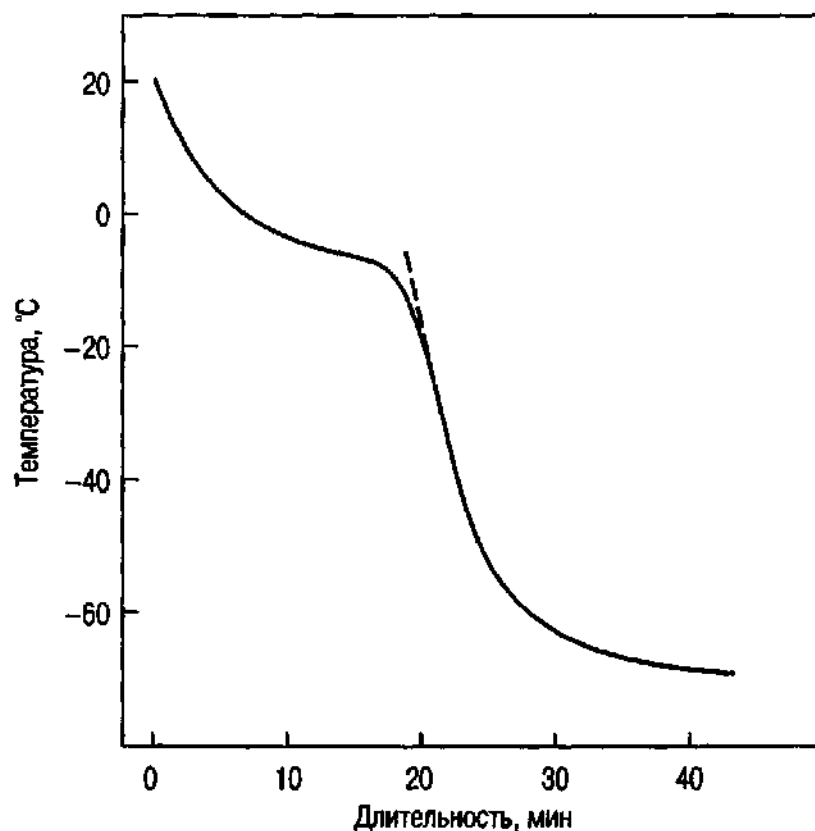


Рис. 4.5. Кривая замораживания дрожжевой суспензии (100 г прессованных дрожжей и 27 г воды, помещенные в стеклянный сосуд, погруженный в ванну с контролируемой температурой -78°C). По [20]

ТЕРМИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ В ХОДЕ ПРОЦЕССА ЗАМОРАЖИВАНИЯ

Процесс замораживания теста проходит три фазы: охлаждение при температурах выше зоны замораживания продукта, охлаждение в зоне замораживания и охлаждение при температурах ниже зоны замораживания. Как видно по поведению кривых замораживания (рис. 4.4), охлаждение сначала происходит быстро, а затем оно замедляется на протяжении интервала замораживания. При увеличении количества образовавшегося льда скорость охлаждения возрастает. Эти изменения происходят при условии, что производительность холодильной установки достаточна для отвода теплоты от продукта. Скорость охлаждения (выше точки замерзания) зависит от теплопроводности теста. Поскольку на характеристики теплопроводности влияют состав, структура и размеры охлаждаемого материала, внешняя область

продукта характеризует скорость отбора теплоты среды. В ходе охлаждения охлаждение является причиной различия в скорости охлаждения хранения теста посредством

Когда температура необходимо (помимо от изменения предьявляет по ки, и обычно скорость охлаждения. Длина этого плато и температурой холодильной температуры последнего понижению степени образования заметен на рис. 4.4.

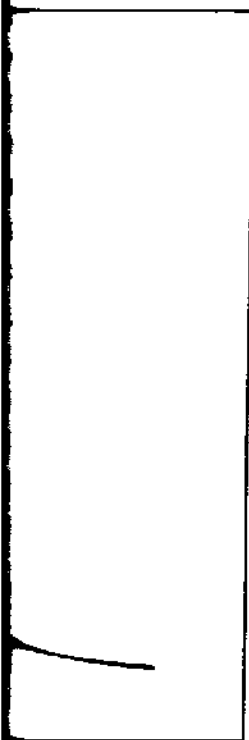
Замерзание — это кри Это фазовое изменение или когда температура п кой фазы. В этой точке в ленность начала образования сталлообразования). Сог раживание без кристалли При этой температуре яд сталлообразования назы частицы жидкой фазы и тельно более высокой, ч кристаллообразованием. сталлов льда. Поскольку переохлаждения, рост кри охлаждения. Интенсивн плоты. Морфология кри направлением потока те

Форма кристаллов т зование льда, представля ложняется в присутстви видно из таблицы 4.5, в к ния льда этанола, глицер щих образование льда ральных продуктах в ви влияют на морозостойк вие в некоторых зернов

Форма и размер кри ния и роста кристаллов. влияния скорости замор живается медленно, то

...заметна из-за быстрого
...температуре -78°C эквектиче-

...веденная на рис. 4.5, по-
...ливой начальной точки
... большая часть воды
...зания не завершается,
...делительствуют о разли-
...дрожжевой суспензии
... -78°C на рис. 4.4).



...ной суспен-
...темпе-
...ванну с
... [20]

ЗАМОРАЖИВАНИЯ

...дение при температу-
...замораживания и охла-
...дно по поведению кри-
...дет быстро, а затем оно
...увеличении количест-
...изменения происхо-
...ановки достаточна для
...точки замерзания) зави-
...теплопроводности
...та. внешняя область

продукта характеризуется более низкой температурой, чем внутренняя. Кроме того, скорость отбора теплоты зависит от разницы температур продукта и охлаждающей среды. В ходе охлаждения удаляется только удельная теплота. Важным последствием охлаждения является повышение вязкости жидкой фазы и сопутствующее снижение скорости различных реакций. Этот эффект благоприятен особенно при сохранении теста посредством охлаждения.

Когда температура продукта достигает зоны замерзания, для фазового перехода необходимо (помимо отбора удельной теплоты) удалить скрытую теплоту. Это изменение предъявляет повышенные требования к мощности холодильной установки, и обычно скорость охлаждения снижается, образуя «плато» вокруг точки замерзания. Длина этого плато сокращается, если разница между температурой продукта и температурой холодильника увеличивается за счет использования более низкой температуры последнего, что ведет к ускоренному замораживанию и, возможно, к понижению степени образования льда (см. следующий раздел). Этот эффект также заметен на рис. 4.4.

ОБРАЗОВАНИЕ ЛЬДА

Замерзание — это кристаллизация жидкой воды в твердую фазу, то есть в лед. Это фазовое изменение происходит, когда температура воды становится ниже 0°C или когда температура пищевой системы опускается ниже точки замерзания жидкой фазы. В этой точке возможно переохлаждение без образования льда. Неопределенность начала образования льда связана с проблемой «ядрообразования» (кристаллообразования). Согласно различным исследованиям (например, [4,27]), замораживание без кристаллообразования может продолжаться до температуры -40°C . При этой температуре ядра возникают спонтанно, и образуется лед. Такой тип кристаллообразования называется гомогенетическим. В пищевых системах различные частицы жидкой фазы инициируют кристаллообразование при температуре значительно более высокой, чем -40°C . Такой переход называется гетерогенетическим кристаллообразованием. С началом образования ядер может начаться рост кристаллов льда. Поскольку для ядрообразования требуется всего несколько градусов переохлаждения, рост кристаллов льда может происходить при минимальном переохлаждении. Интенсивность кристаллообразования зависит от скорости отбора теплоты. Морфология кристаллов определяется как скоростью отбора теплоты, так и направлением потока тепла при ее удалении.

Форма кристаллов также зависит от степени переохлаждения среды [41]. Образование льда, представляющее собой в чистой воде сложный процесс, еще более усложняется в присутствии в жидкой фазе различных растворенных веществ. Это видно из таблицы 4.5, в которой приведены данные о влиянии на скорость образования льда этанола, глицерина, сахарозы и глюкозы [32,41]. Другая группа замедляющих образование льда веществ, так называемые антифризы, встречается в натуральных продуктах в виде протеина/гликопротеина [17]. Во многих случаях они влияют на морозостойкость различных семян, и, возможно, проявляют свое действие в некоторых зерновых продуктах и муке.

Форма и размер кристаллов в тесте зависят от взаимодействия ядрообразования и роста кристаллов. Возможно, эта взаимосвязь является истинной причиной влияния скорости замораживания на характеристики льда. Если продукт замораживается медленно, то ядрообразование также замедляется и это приводит, по

ЭВТЕКТИЧЕСКИЕ ТОЧКИ ЗАМОРАЖИВАЕМОГО ТЕСТА

На рис. 4.4 отмечены эвтектические точки теста, замораживаемого при разных температурах. Теоретически жидкая фаза в этих точках должна полностью затвердеть, но во многих пищевых системах, включая замороженное тесто, полному затвердеванию препятствует присутствие определенных растворенных веществ. Соли (например, поваренная соль) в эвтектических точках находятся в кристаллическом состоянии и поэтому не влияют на затвердевание жидкой фазы. С другой стороны, сахара сопротивляются кристаллизации и остаются в виде сиропов. Согласно [12], при балансе сахара и воды водные растворы сахарозы должны полностью затвердеть при эвтектической температуре $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$, а любые растворы сахарозы, фруктозы и глюкозы должны полностью затвердеть при эвтектической температуре $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Тем не менее на практике выяснилось, что эти сахара могут не образовывать кристаллического сахара и, следовательно, не затвердевают полностью даже тогда, когда температура снижается до $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ [25]. Поскольку жидкая фаза замораживаемого дрожжевого теста содержит глюкозу и фруктозу, это заключение имеет место и для жидкой фазы систем, подобных тестовым полуфабрикатам. Следовательно, эвтектическая система в тесте — это смесь льда, кристаллизовавшихся растворенных веществ и остаточная жидкая фаза, содержащая не кристаллизовавшиеся растворенные вещества.

ДЕГИДРАТАЦИЯ И МИГРАЦИЯ ВЛАГИ В ЗАМОРОЖЕННОМ ТЕСТЕ

Реакции не прекращаются и после помещения продукта на хранение при низкой температуре, при котором скорости физических и химических реакций обычно ниже, чем при обычной температуре окружающей среды. Отмечено ускорение некоторых реакций при температуре, незначительно ниже в точке замерзания [18]. Это явление зачастую связывают с быстрым начальным ростом концентрации не замороженной матрицы между кристаллами льда при понижении температуры. Хотя данное условие присутствует в замораживаемом тесте, но до сих пор эти эффекты не изучались или о них не было сообщений. Отказ от рассмотрения эффектов концентрации в некоторых исследованиях мог привести к недооценке взаимодействия глютамина и метаболитов дрожжей [47]. Снижать значения pH может также концентрация кислот, участвующих в брожении, и кристаллизация солей [44]. Вероятно, эти изменения происходят в локализованных областях структуры теста, влияя тем самым на его стабильность. Твердая фаза льда также изменяется: небольшие кристаллы льда растут, образуя крупные кристаллы.

Температурные градиенты в замороженном тесте, создающиеся из-за неизбежных изменений температур в течение низкотемпературного хранения, вызывают миграцию воды вдоль температурных градиентов.

Эти изменения приводят к тому, что компоненты жидкой фазы замороженного теста находятся в метастабильном равновесии, которое в ходе хранения может меняться вместе с точным составом этой фазы. Изменения в перемещении воды могут приводить к потере влаги в некоторых компонентах теста. Например, если мембраны клеток не повреждены или препятствуют проходу льда, осмотическое давление создает силу, способствующую дегидратации клеток.

В зависимости от скорости охлаждения и проницаемости клеточной мембраны по отношению к воде, содержимое клетки может переохладиться. При недостаточно

быстром охлаждении клетки внутри могут замерзнуть. При медленном охлаждении образуется только внеклеточный лед, и клетка обезвоживается. Если осаждается соль, происходит ряд изменений рН [44]. Разрушение определенных связей в результате дегидратации может влиять на функциональность теста, но, судя по практической эффективности замороженного теста, большинство этих изменений являются обратимыми.

Размораживание

Замороженное тесто перед проведением расстойки необходимо разморозить. Этот процесс может проходить в различных температурно-временных условиях. В исследовании по определению оптимальных условий размораживания [15] сравнивались четыре режима: 16 ч при 5 °С, 24 ч при 5 °С, 1 ч при 22 °С и расстойка при 32 °С сразу после холодильника. Ожидалось, что чем выше температура, тем короче должна быть длительность расстойки до достижения заданной высоты теста. В этих экспериментах после 16 ч хранения тестовых заготовок при температуре -23 °С и последующего размораживания при указанных четырех режимах длительность их расстойки составляла 101, 61, 147, 182 минуты соответственно. Эти данные свидетельствуют, что для повышения эффективности процесса приготовления замороженного теста, размораживание необходимо и что эту операцию надо проводить медленно при оптимальных временных и температурных условиях. Функциональное действие размораживания проявляется в регидратации системы — в основном клейковинного каркаса и дрожжевых клеток. Чтобы минимизировать различные химические, ферментативные и физические реакции, оно должно проводиться при рефрижераторной температуре (температуре хранения охлажденного теста). Исходя из производственной целесообразности и основываясь на общей оценке качества хлеба, рекомендуется размораживание замороженных тестовых заготовок при температуре 5 °С в течение 16 ч.

Важный фактор размораживания — повышенная теплопроводность замороженных продуктов. С термодинамической точки зрения размораживание не является просто обратным процессом по отношению к замораживанию. При размораживании температура продукта, находящегося в теплой среде, быстро повышается, а внутренние температурные градиенты значительно меньше, чем при замораживании. Изолирующий жидкий слой, который образуется на поверхности, замедляет размораживание и способствует деградации продукта. Следовательно, колебания температуры выше зоны замораживания продукта снижают его стабильность и качество, и при транспортировке, обработке и хранении замороженного теста этой ситуации следует избегать.

Расстойка замороженного теста

Продолжительность расстойки замороженных тестовых заготовок после размораживания существенно больше, чем у традиционного теста, что связано с двумя факторами: более низкой температурой размороженных заготовок, помещаемых в расстойный шкаф, и определенным снижением газодерживающей способности теста и активности дрожжей под влиянием процесса замораживания. Чтобы ком-

пенсировать их влияние, 32 °С для хлеба и до 42 °С относительной влажности этого — перерасстоявшаяся часть, может быть бо- ных изделий. Применен- сравнению с традиционн- ных изделий пузырей и с

Примене

В работе [28] к струк- применены принципы х- щена в [29]. «Наука о пн- вивает методы унифика- функциональных момент- ных веществ. Важной че- влияющие на стабильно- замораживанию для объ- ских свойств жидкой фаз- жидкой структуре (матр-

Как отмечалось выше- ция и вязкость жидкой ф- нии температуры жидко- движение молекул стан- дает до минимума. В так- ствие этого кристаллы л-

Температура, при к- стеклования T_g , поскольку- ная система переходит в-

Значение T_g являетс- быстрее происходит пер- морозивания свойства м- ческим уравнением Вил- са (при этом первое урав- нию со вторым).

Что дает этот подход- температуру максима- ния. Оно может измерят- метра (ДСК), фиксирую- к фазе стекла. Чтобы опр- ся уровне наших знаний- хранения, а знание T_g яз- Стабильность системы- зависеть от величины T_g

при медленном охлаждении не является. Если осаждаются неравнораспределенных связей в результате теста, но, судя по практическим данным, эти изменения являются следствием замедленного охлаждения. Если осаждаются неравнораспределенных связей в результате теста, но, судя по практическим данным, эти изменения являются следствием замедленного охлаждения.

Применение понятий химии полимеров к замораживанию

В работе [28] к структурным проблемам технологии пищевых продуктов были применены принципы химии полимеров. Наиболее полно эта проблематика освещена в [29]. «Наука о пищевых полимерах» — термин, предложенный в [28] — развивает методы унификации структурных аспектов пищевых веществ при помощи функциональных моментов, описываемых гидродинамикой и динамикой аморфных веществ. Важной чертой этого подхода является новый взгляд на факторы, влияющие на стабильность замороженных пищевых продуктов. По отношению к замораживанию для объяснения стабильности поведения теста в терминах физических свойств жидкой фазы этот подход акцентирует внимание на не замороженной жидкой структуре (матрице), присутствующей между кристаллами льда.

Как отмечалось выше, при традиционной трактовке замораживания концентрация и вязкость жидкой фазы с понижением температуры возрастает. При понижении температуры жидкость в некоторой точке становится настолько вязкой, что движение молекул становится кинетически ограниченным и скорость реакций падает до минимума. В таких условиях молекулы воды не могут мигрировать, и вследствие этого кристаллы льда не образуются.

Температура, при которой возникает это условие, называется температурой стеклования T_g , поскольку при дальнейшем снижении температуры жидкая аморфная система переходит в фазу «застеклованного вещества» («стекла»).

Значение T_g является важным показателем свойств системы. Чем выше T_g , тем быстрее происходит переход системы в фазу стекла. При температурах в области замораживания свойства матрицы лучше описываются свойствами резины и кинетическим уравнением Вильямса-Ландела-Ферри (ВЛФ), чем уравнением Аррениуса (при этом первое уравнение предсказывает более медленные реакции по сравнению со вторым).

Что дает этот подход для понимания стабильности теста? Значение T_g показывает температуру максимальной стабильности замороженной системы в процессе хранения. Оно может измеряться с помощью дифференциального сканирующего калориметра (ДСК), фиксирующего изменение теплоемкости при переходе от жидкой фазы к фазе стекла. Чтобы определить стабильность различных продуктов (при имеющемся уровне наших знаний) мы все еще зависим от исследований фактических условий хранения, а знание T_g является параметром прогнозирования стабильности свойств. Стабильность системы (по крайней мере, это относится к водным системам) должна зависеть от величины T_g : если система замораживается и хранится при температуре

то теста

заготовок после размораживания. Это связано с двумя факторами: во-первых, размораживание, помещаемых в морозильную камеру, способностью замораживания. Чтобы ком-

выше T_g , можно ожидать, что стабильность продукта будет ниже, чем при замораживании и хранении продукта при температуре ниже T_g . Следовательно, чем выше T_g , тем более стабильным должен быть продукт при низкотемпературном хранении, и наоборот. Поскольку T_g зависит от состава системы, это предоставляет нам две полезные возможности: T_g позволяет определить более стабильные при замораживании рецептуры, и для улучшения стабильности замороженного продукта T_g можно повысить за счет изменения рецептуры. Когда это невозможно, для повышения T_g можно добавить или заменить ингредиенты. В табл. 4.6 в качестве примера приведены значения T_g для некоторых Сахаров и олигосахаридов [24].

Таблица 4.6. Температура стеклования T_g' для максимально концентрированных растворов (измерения производились с помощью ДСК). По [24]

	В воде	В буферном растворе
Глюкоза	-43,5	-42,5
Фруктоза	-42,0	-42,1
Мальтоза	-31,6	-30,5
Сахароза	-33,5	-33,0
Сорбит	-44,0	-38,0
Полидекстроза	-27,4	-29,0
M365	-22,1	-23,5
M250	-18,5	-19,0
M200	-15,3	-17,5
M150	-13,0	-15,0

Хотя до сих пор не проводились специальные исследования по оценке роли T_g в замороженном тесте, определенный интерес представляет интерпретация данных, приведенных в [16]. Влияние Сахаров на продолжительность брожения тестовых заготовок после замораживания в процессе расстойки показано на рис. 4.6. Из всех изученных Сахаров, использовавшихся в рецептуре замораживаемого теста для хлебобулочных изделий, только кукурузный сироп с декстрозным эквивалентом (ДЭ), равным 62, повысил стабильность теста при низкотемпературном хранении (судя по продолжительности расстойки). Как ожидалось, этот сахарид повысил T_g системы и стабильность замороженного теста. Эта взаимосвязь поддерживает гипотезу, предложенную в работе [29].

Интересный пример ограничения ферментативной активности путем изменения T_g приведен в [28]. В этом экспериментальном исследовании применялись глюкозооксидаза, метиловый красный, раствор глюкозы *Mores 1910* (мальтодекстрин с ДЭ 10) и их смеси, которые обеспечивали использовавшийся диапазон значений T_g (T_g обозначает точку перехода на ДСК-термограмме, в которой замерзание «замерзаемой воды» завершается) [29]. Кислота, образующаяся в результате ферментативного окисления, изменяет цвет реагирующей смеси с желтого на розовый. Образцы с T_g в диапазоне от -9,5 до -32 °С хранились при температурах 25, 3, -15 и -23 °С. Образцы при температуре 25 и 3 °С были жидкими; а при -15 и -23 °С — твердыми и выглядели как окрашенный лед. При этом только образцы со значениями T_g выше температуры хранения стали розовыми, что указывало на образование кислоты с помощью фермента. Даже после хранения при -23 °С в течение 2-х

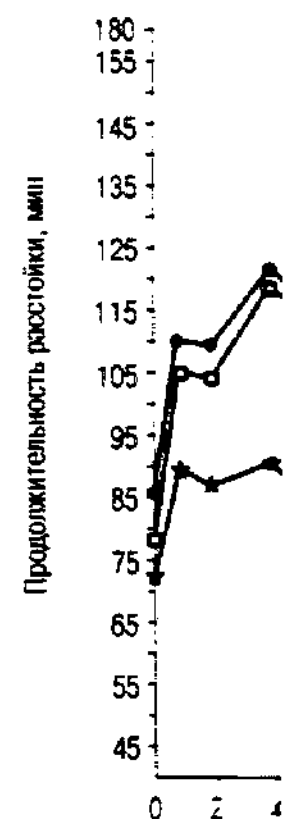


Рис. 4.6. Влияние температуры хранения на продолжительность расстойки замороженного теста

образцы с $T_g >$ реакция не происходила при температуре выше T_g . Образцы, содержащие концентрат глюкозы, имели меньшую продолжительность расстойки, что указывает на «ледяную» матрицу, которая снижает стабильность фермента. Это может быть связано с тем, что фермент не инактивировался, а просто не активировался, о чем свидетельствует отсутствие реакции. Подобный план экспериментального исследования ферментативной активности в замороженном тесте в зависимости от температуры хранения, но при ее приращении, важно помнить о том, что фермент (муку и другие компоненты) может быть поврежден при замораживании. Взаимосвязь между температурой хранения и стабильностью систем приготовления теста требует дальнейшего исследования.

ниже, чем при замораживании. Следовательно, чем выше T_g при температурном хранении, и тем больше представляет нам две полезные стороны при замораживании продукта T_g можно повысить. Для повышения T_g можно использовать приведенные значе-

концентрированных рас-

в буферном растворе

- 42,5
- 42,1
- 30,5
- 33,0
- 38,0
- 29,0
- 23,5
- 19,0
- 17,5
- 15,0

по оценке роли T_g в интерпретация данных, брожения тестовых дано на рис. 4.6. Из всех теста для хле- эквивалентом (ДЭ), хранения (судя шарид повысил T_g систе- поддерживает гипотезу,

ности путем измене- ни применялись глю- 10 (мальтодекстрин с диапазон значений T_g срой замерзание «замер- результате фермента- желтого на розовый. Об- температурах 25, 3, -15 и а при -15 и -23 °C — образцы со значения- зывало на образование -23 °C в течение 2-х

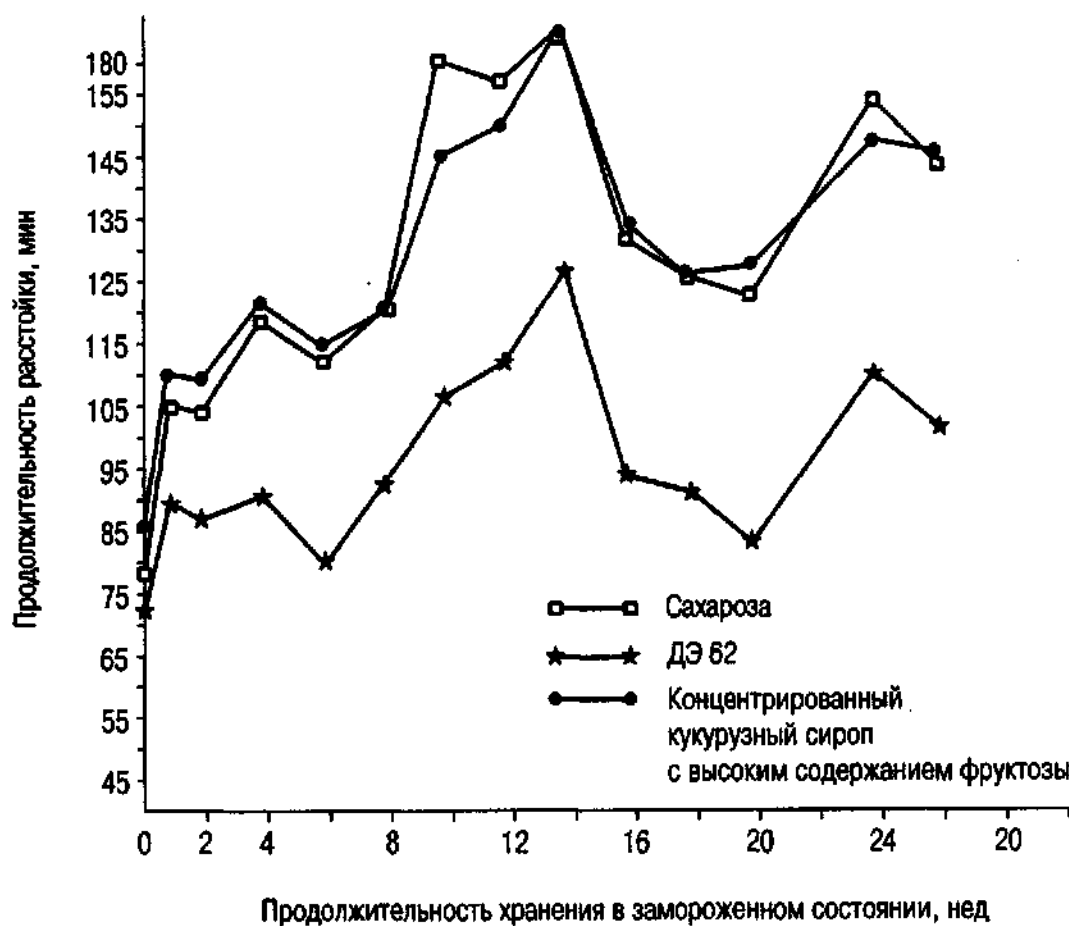


Рис. 4.6. Влияние вида сахара (10% с.в. от массы муки) и продолжительности низкотемпературного хранения на стабильность замороженного теста, характеризующуюся продолжительностью расстойки. По [16]

месяцев образцы с $T_g > -23$ °C, содержавшие мальтодекстрин, оставались желтыми (реакция не происходила). С другой стороны, только образцы, которые хранились при температуре выше T_g стали розовыми. Даже при -23 °C замороженные образцы содержали концентрированную богатую ферментом жидкую фазу, обволакивавшую кристаллы льда, в то время как в тех образцах, что оставались желтыми, «неледовая» матрица была стеклообразной (твердой). В значительной степени активность фермента подавлялась при температуре хранения ниже T_g , но сам фермент не инактивировался. Когда желтые образцы размораживались, фермент быстро активировался, о чем свидетельствовало изменение желтого цвета на розовый.

Подобный план эксперимента может быть полезным при изучении ферментативной активности в замороженном бездрожжевом тесте и изменений кислотности дрожжевого теста в результате брожения. В целом использование T_g в качестве базисной точки структурной фазы в пищевых системах представляется привлекательным, но при ее применении для исследований замороженного дрожжевого теста важно помнить о том, что тесто, помимо воды, содержит по меньшей мере еще два компонента (муку и дрожжи), и каждый из них влияет на значение T_g . Каждый из этих компонентов может иметь свое значение T_g , которое потребует соответствующей настройки. Взаимодействие этих компонентов усложняет унифицированное описание. Применение данного подхода представляется более ясным для однофазных систем приготовления теста, например, бездрожжевого теста для кексов, теста

для печенья и подобных изделий. Короче говоря, теоретические основы данного подхода нуждаются в экспериментальной проверке.

Охлажденное тесто

В США охлаждение теста применяется в промышленном производстве хлеба довольно редко. Оно ограничено используется в крупных пекарнях при производстве подовых видов хлебобулочных изделий (французского и итальянского видов хлеба, рогаликов). С другой стороны, охлаждение теста — обычный технологический этап в крупномасштабном производстве при приготовлении сдобного теста, теста для датской сдобы, бубликов, рогаликов и пиццы.

Мини-пекарни широко применяют охлажденное тесто при производстве многих изделий, включая стандартные виды хлеба. Европейские пекари, ориентированные в основном на розничные продажи, для сохранения (консервации) теста предпочитают его охлаждение, а не замораживание (подробнее об этом см. главу 8).

В большинстве случаев охлажденное тесто полностью сохраняет свою функциональность в течение 48 ч при температуре охлаждения 5-7 °С и относительной влажности около 85%.

Охлаждение теста не накладывает на рецептуру и спецификацию ингредиентов каких-либо особых требований. Тесто обычно готовится безопасным способом. Замес продолжается до полной готовности теста, конечная температура которого составляет 21 °С. После стандартных операций с тестом, его укладки в формы тестовые заготовки помещают в холодильную камеру. После охлаждения они вынимаются, выдерживаются при комнатной температуре и затем помещаются в расстойный шкаф. Иногда может потребоваться охлаждение тестовой массы. В таких случаях для облегчения охлаждения тесто делят на куски массой от 2,3 до 4,5 кг. Если по каким-то производственным причинам охлаждение недостаточно замедляет брожение теста, для коррекции избыточного брожения следует снизить содержание дрожжей по рецептуре. Бледная корка изделия может указывать на то, что было сброжено слишком много сахара, и в этом случае рекомендуется увеличить количество сахара по рецептуре.

При использовании охлаждения в производстве теста для датской сдобы следует изменить следующие параметры:

- уменьшить интенсивность замеса по сравнению с обычным;
- ускорить предварительную расстойку (вплоть до полного отказа от нее) перед охлаждением;
- производить выпечку при температуре 210 °С.

Тесто для датской сдобы можно охлаждать порциями массой от 2,3 до 4,5 кг или (что более предпочтительно) в формованном виде.

Охлаждение сдобного теста не представляет серьезных трудностей. В этом случае следует учитывать содержание в рецептуре теста сахара и дрожжей. Чем выше дозировка сахара в тесте, тем больше нужно дрожжей для обеспечения оптимального брожения. В процессе замеса необходимо поддерживать более низкую, чем для неохлаждаемого теста, температуру, а его брожение перед охлаждением должно

быть минимальным. I
охлаждаемого теста.

Тесто для пиццы
стичным. Тесто для б
ия у конечных издел

Считается, что кр
кий вкус и более ст
без охлаждения.

Примечание. I
информации, полу
анского института х

1. Autio, K., and Smed
Chem. 69:409-413.

2. Bhatt, G. M., Pause
winter wheats: Assessment
Cereal Chem. 58:300-312

3. Berglund, P. T., S
affected by duration of time

4. Bigg, E. K. 1963. The

5. Bietz, J. A. 1987. G
Pages 215-241 in: Wheat
Agronomy, Madison, WI

6. Bietz, J. A. 1992. E
Pages 5-15 in: Cereal C
Bread Congr., Paris. J
Agroalimentaires des Cere

7. Bushuk, W. 1966. D

8. Bushuk, W. 1985a. F
Foods World 30:447-451

9. Bushuk, W. 1985b. F
tures, Pages 147-154 in: C
T. Galliard, eds. R. Soc. C

10. Bushuk, W., and Ma
breadmaking quality. P
and J. W. Finley, eds. Mar

11. Bushuk, W., Khan, K.
and non-covalently linked

12. Chandrasekaran, S.
sugar solutions. J. Food Sc

13. Chen, J., Khan, K., S
carbohydrate-containing pr

14. Chung, O. K., Pome
wheat flours. IV. Effects of
ing quality. Cereal Chem. 5

Биохимические основы данного

СТО

в производстве хлеба
в пекарнях при производ-
стве и итальянского видов
— обычный технологиче-
ский вид сдобного теста,

при производстве мно-
гих пекари, ориентирован-
(консервации) теста пред-
ставлено (см. главу 8).

сохраняет свою функ-
цию в 5–7 °С и относительной

функционацию ингредиентов
парным способом. За-
тем температура которого со-
вклады в формы тесто-
образования они вынимают-
мешаются в расстойный
массы. В таких случаях
от 2,3 до 4,5 кг. Если по-
статочно замедляет бро-
дет снизить содержание
вызывать на то, что было
будет увеличивать количе-

для датской сдобы следу-

обычным;

одного отказа от нее) перед

массой от 2,3 до 4,5 кг или

тех трудностей. В этом слу-
чае и дрожжей. Чем выше
обеспечения оптимально-
более низкую, чем для
перед охлаждением должно

быть минимальным. Консистенция традиционного теста обычно приемлема и для охлаждаемого теста.

Тесто для пиццы обычно охлаждают, и в этом случае оно становится более пластичным. Тесто для бубликов типа «бэйгл» также обычно охлаждают для получения у конечных изделий «пузырчатой поверхности», желательной для бубликов.

Считается, что круассаны, произведенные из охлажденного теста, имеют хороший вкус и более слоистую структуру, что они более нежные, чем произведенные без охлаждения.

Примечание. Раздел об охлажденном тесте составлен на основе работы [33] и информации, полученной автором в личном общении со специалистами Американского института хлебопекарного производства.

Литература

1. Autio, K., and Sinda, E. 1992. Frozen doughs: Rheological changes and yeast viability. *Cereal Chem.* 69:409–413.
2. Bhatt, G. M., Paulsen, G. M., Kulp, K., and Heyne, E. G. 1981. Preharvest sprouting in hard winter wheats: Assessment of methods to detect genotypic and nitrogen effects and interactions. *Cereal Chem.* 58:300–302.
3. Berghlund, P. T., Shelton, D. R., and Freeman, T. P. 1991. Frozen bread dough ultrastructure as affected by duration of frozen storage and freeze-thaw cycles. *Cereal Chem.* 68:105–107.
4. Bigg, E. K. 1963. The supercooling of water. *Proc. Phys. Soc.* B66–688.
5. Bietz, J. A. 1987. Genetic and biochemical studies of nonenzymatic endosperm proteins. Pages 215–241 in: *Wheat and Wheat Improvement*. 2nd ed. E. G. Heyne, ed. American Society of Agronomy, Madison, WI.
6. Bietz, J. A. 1992. How knowledge of proteins is improving cereal quality and utilization. Pages 5–15 in: *Cereal Chemistry and Technology: A Long and Bright Future* (9th Int. Cereal and Bread Congr., Paris, June 1992). P. Feillet, ed. Institut de Recherches Technologiques Agroalimentaires des Cereales (IRTAC), Montpellier, France.
7. Bushuk, W. 1966. Distribution of water in dough and bread. *Baker's Dig.* 40:36–40.
8. Bushuk, W. 1985a. Flour proteins: Structure and functionality in dough and bread. *Cereal Foods World* 30:447–451.
9. Bushuk, W. 1985b. Protein-lipid and protein-carbohydrate interactions in flour-water mixtures. Pages 147–154 in: *Chemistry and Physics of Baking*. J. M. W. Blanshard, P. J. Frazier, and T. Galliard, eds. R. Soc. Chem, London.
10. Bushuk, W., and MacRitchie, F. 1987. Wheat proteins: Aspects of structure that are related to breadmaking quality. Pages 357–361 in: *Protein Quality and Effects of Processing*. R. D. Phillips and J. W. Finley, eds. Marcel Dekker, New York.
11. Bushuk, W., Khan, K., and McMaster, G. 1980. Functional glutenin. A complex of covalently and non-covalently linked components. *Ann. Technol. Agric.* 29:279–294.
12. Chandrasekaran, S. K., and King, C. J. 1971. Solid-liquid phase in multicomponent aqueous sugar solutions. *J. Food Sci.* 36:699–704.
13. Chen, J., Khan, K., Shelton, D. R., and D'Appolonia, B. L. 1992. Isolation and fractionation of carbohydrate-containing proteins from wheat gluten. *Cereal Chem.* 69:475–480.
14. Chung, O. K., Pomeranz, Y., Hwang, E. C., and Dikeman, E. 1979. Defatted and reconstituted wheat flours. IV. Effects of flour lipids on protein extractability from flours that vary in bread-making quality. *Cereal Chem.* 56:220–226.