

Исследование технологических и теплофизических условий замораживания крупных блочных сыров

Д-р техн. наук О.Н.БУЯНОВ, канд. техн. наук И.В.БУЯНОВА

Are investigated technological and thermophysical of a condition of freezing of cheeses in blocks with use of a freezing plate. The data on change of a temperature field, density of a thermal flow, average speed of freezing and factor heat transfers of cheeses received. The laws of course of process of freezing of water in a product are described and the technological rules of organization of process of freezing is established.

Замораживание крупных блочных сыров проводили с помощью плиточных морозильных аппаратов. В данном случае продолжительность замораживания головок сыра с различной толщиной поперечного сечения определяется рациональной температурой рабочей плиты морозильного аппарата. Скорость фронта кристаллизации зависит от условий теплообмена продукта с контактной поверхностью морозильной плиты и температуры начала льдообразования.

Определение технологических условий замораживания головок сыра сводится к установлению наиболее эффективной температуры морозильной плиты, при которой продолжительность замораживания объектов с различной толщиной поперечного сечения будет оптимальна или в крайнем случае рациональна.

В связи с тем что толщина блока продукта — величина, установленная ГОСТом в некоторых пределах, оценивать температурные условия холодильной обработки следует по динамике изменения продолжительности и скорости замораживания, зная характер изменения данных параметров в зависимости от толщины блока сыра.

Критерием эффективности является продолжительность замораживания до достижения заданной конечной температуры в центре блока Y (ч).

В ходе экспериментальных исследований при разработке технологического регламента по замораживанию объектов исследования реализован композиционный план ортогонального двухуровневого эксперимента.

Характеристика объектов замораживания — крупных и мелких сыров — по геометрическим размерам, форме и массе приведена в табл. 1.

Таблица 1
Геометрические размеры, форма и масса твердых сыров

Наименование сыра	Форма	Размеры, м			Масса, кг
		Длина	Ширина	Высота	
Швейцарский	Блочный	0,60...0,65	0,36...0,42	0,15...0,20	35...55
Швейцарский	Цилиндр	—	0,70...0,80	0,12...0,18	50...100
Советский	Брусковый	0,48...0,50	0,18...0,20	0,12...0,17	12...16
Алтайский	Цилиндр	—	0,30...0,40	0,10...0,13	12...20
Горный	Брусковый	0,36...0,39	0,16...0,17	0,12...0,13	7,5...9
Голландский	»	0,28...0,30	0,14...0,15	0,10...0,12	5...6
Российский	Цилиндр	—	0,34...0,36	0,16...0,18	11...13
Ламбер	Шар	0,12...0,13	0,12...0,13	0,10...0,11	1,04...1,1

При замораживании блоков сыра выделено два основных фактора, в большей степени определяющих продолжительность замораживания, — температура морозильной плиты X_1 и толщина блока сыра X_2 .

Очевидно, что в результате понижения температуры плиты и уменьшения размера поперечного сечения объекта продолжительность замораживания будет иметь тенденцию к сокращению. Поэтому в исследуемой области факторного пространства экстремума функция иметь не может.

В этой связи при выборе центра эксперимента преследовали цель обеспечения симметричности плана, а сам план использовали для минимизации

Таблица 2
Уровни и интервалы варьирования факторов

Фактор	Нижний уровень (-)	Нулевой уровень (0)	Верхний уровень (+)	Интервал варьирования
Температура плиты X_1 , °C	-50	-40	-30	10
Толщина блока сыра X_2 , м	0,08	0,14	0,2	0,06

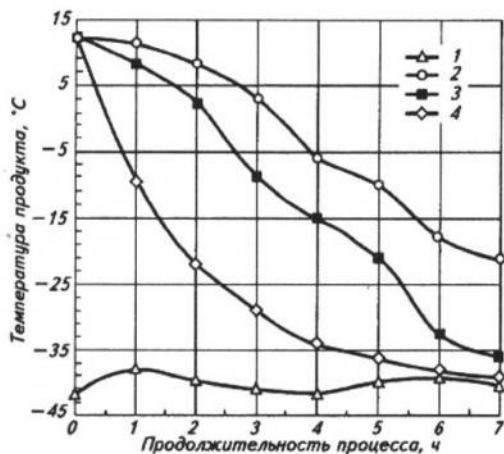


Рис. 1. Термограмма замораживания блока советского сыра

числа опытов, статистической обработки результатов и получения графической интерпретации изменения функции отклика.

Областью изменения фактора X_1 назначен диапазон температур морозильной плиты от -30 до -50 °C, так как, по литературным данным [1, 3], плиточные морозильные аппараты работают с использованием холодильных агентов, которые обеспечивают температуру морозильных плит именно в этом диапазоне. Обоснование выбора области варьирования фактора X_2 осуществлялось на основании нормативной документации на производство твердых сычужных сыров [4]. Уровни и интервалы варьирования факторов представлены в табл. 2.

На первом этапе экспериментального исследования получены закономерности изменения температурного поля продукта и плотности теплового потока при замораживании. На рис. 1 представлена термограмма замораживания блока советского сыра, а на рис. 2 — кинетика теплоотвода. По термограмме изучали закономерности распределения температуры в различных сечениях блока сыра, определяли конечную температуру в центре

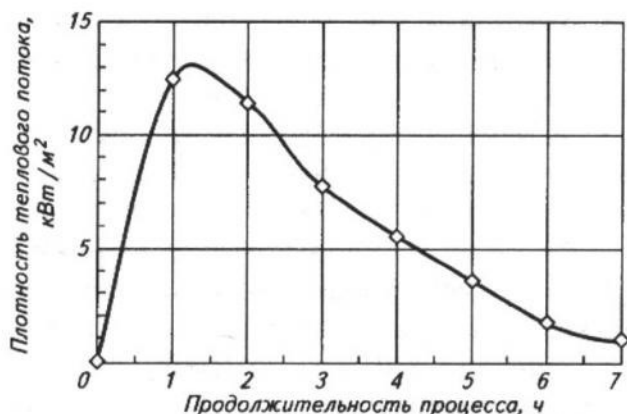


Рис. 2. Кинетика теплоотвода при замораживании блока советского сыра

блока и продолжительность замораживания объекта до этой температуры.

Кроме того, проводили определение количества тепла, отводимого от объекта замораживания, для дальнейшего расчета продолжительности процесса по математической модели.

Принято считать, что при замораживании тел с большим размером поперечного сечения (например, головка сыра) в зоне прохождения криоскопической температуры наблюдается характерная горизонтальная изотермическая площадка, которая практически не изменяет своего направления, пока не закончится период кристаллизации.

Тем не менее, несмотря на относительно большой размер поперечного сечения блока советского сыра, характерная горизонтальная площадка в период прохождения криоскопической температуры и массовой кристаллизации воды выражена не так ярко, как у других продуктов. По-видимому, объясняется это тем, что твердые сыры имеют относительно низкое содержание влаги и высокую энергию связи ее с компонентами. Кроме того, переохлажденное состояние влаги в макро- и микрокапиллярах малого диаметра сглаживает характер кристаллизации в этой температурной области.

Анализ термограмм замораживания сыров в блоках показал, что снижение температуры в периферийном (4), среднем (3) и центральном (2) слоях проходило неравномерно во времени, но имело одинаковую направленность и плавность линий без резких скачков в изменении температуры. Самое низкое значение на поверхности сыра к концу замораживания приближалось к температуре морозильной плиты аппарата (-40 °C).

Разность снижения температуры по толщине блока сыра особенно выразительно проявлялась между периферийным и центральным слоями. В периферийных слоях кристаллообразование началось значительно быстрее (через 0,8 ч), чем в центральных, и при максимальной скорости процесса ($8,7 \cdot 10^{-6}$ м/с). Интенсивный теплоотвод обеспечивался низкими температурами морозильной плиты. Такие условия теплообмена на расстоянии приблизительно 1...1,5 см от поверхности сыра вглубь способствовали естественному расположению влаги и образованию мельчайших кристалликов льда, равномерно размещенных в структуре продукта (макро- и микрокапиллярах, микропустотках).

В термическом центре температура изменяется по более сложному закону. Поскольку скорость снижения температуры была невысокой в средних

и центральных слоях, то начало замерзания в них сдвинуто на 3...4 ч с момента охлаждения. Пока температура в центре не снизилась до криоскопической, водная фаза сыров находилась в охлажденном состоянии. Кристаллизация влаги в них началась, когда фронт кристаллизации с периферии достиг этой области.

Таким образом, длительный по времени процесс замораживания не означает медленное проведение замораживания блока сыра и свойственные ему диффузионные процессы.

Это очень важное для холодильной технологии свойство сыров — находиться в охлажденном состоянии при низких температурах — способствует сохранению структуры. Оно обусловлено мелкокапиллярным распределением влаги, в малых объемах которых кристаллообразование затруднено. Чем больше размер капилляров, тем в меньшей степени он препятствует замерзанию жидкости, находящейся в них.

Замерзание в средних и центральных слоях начинается, когда в периферийных слоях вымерзает значительное количество воды и уменьшается выделение теплоты льдообразования (по термограмме около 3 ч). Когда наступает период значительно медленного снижения температуры в периферийных слоях (всего 5 °С за 3 ч), то очень интенсивно идет процесс замораживания в средних и центральных слоях (−20...−32 °С в течение 3 ч).

После достижения границей раздела фаз центра продукта температурный градиент по толщине блока выравнивался и к концу замораживания он отличался по всей толщине на определенную величину (например, при температуре −20 °С в центральном слое температура на поверхности продукта составляла −38 °С).

Процесс вымерзания влаги послойный и ему соответствует определенная динамика выделения теплоты фазового перехода воды. Как видно из рис. 2, наиболее активно выделялось фазовое тепло на отрезке времени от 0,5 до 2,5 ч. Эта удельная теплота — разница между внутренней энергией жидкой и твердой фазами вещества — имела максимальное значение 12,5 кВт/м² через 1 — 1,5 ч после начала замораживания.

Снижение количества отводимого тепла было отмечено после достижения в периферийных слоях продукта значения температуры −20 °С. Видимо, до температуры −20 °С основной рост кристаллов завершился, и выделение теплоты начало уменьшаться. Падение интенсивности теплоотвода продолжалось и далее в процессе заморажива-

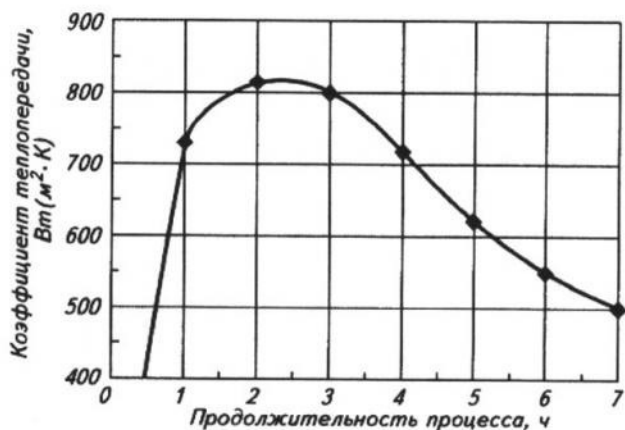


Рис. 3. Изменение коэффициента теплопередачи при замораживании блока советского сыра

ния средних и центральных слоев блока. Незначительная скорость кристаллизации охлажденной водной фазы по толщине сыра указывает на плавный темп снижения теплоотвода до конца процесса замораживания.

Даже достижение криоскопической температуры в среднем и центральных слоях не повлияло на протекание снижения отвода тепла. Не было зафиксировано скачка в количестве выделяемой теплоты, свойственного фазовому переходу воды. Следовательно, кристаллизация воды в средних и центральных слоях блока сыра не обуславливалась выделением большого количества теплоты ее фазового перехода по сравнению с периферийными участками. Видимо, здесь протекал слаботекущий рост кристаллов.

Спад выделения теплоты в среднем слое продолжался и стал более выраженным после достижения температуры −20 °С. Снижение же температуры до −20 °С в центральных слоях не повлияло на характер выделения теплоты.

Полученные значения плотности теплового потока позволили определить зависимость изменения во времени коэффициента теплопередачи морозильной плиты и путем графического интегрирования рассчитать среднее значение этой величины за весь период замораживания (рис. 3).

Анализ изменения коэффициента теплопередачи во время замораживания советского сыра показал, что наибольшее снижение температуры по толщине блока проходило на отрезке времени от 1 до 4 ч. В этот период коэффициент теплопередачи от поверхности к охлаждающей среде имел максимальные значения 720...810 Вт/(м²·К). На последнем этапе замораживания (от 4 до 6 ч) коэффициент убывал до значения 550 Вт/(м²·К) в связи с тем, что в центре блока достигнута криоскопическая

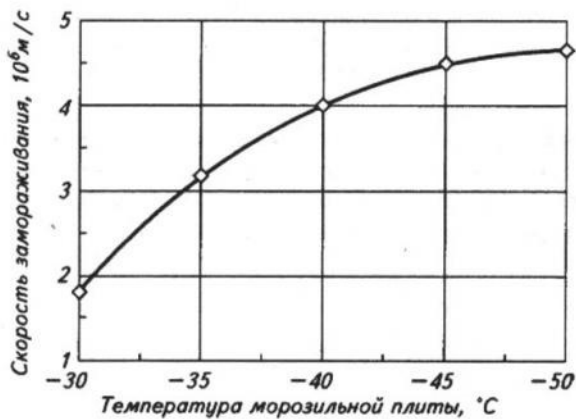


Рис. 4. Влияние температуры морозильной плиты на скорость замораживания блока советского сыра толщиной 0,14 м

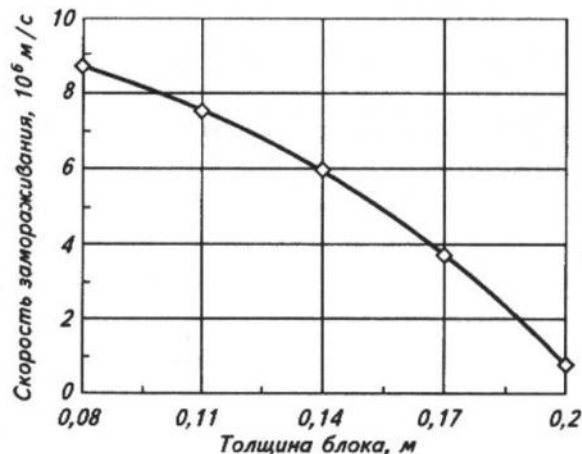


Рис. 5. Влияние толщины блока на скорость замораживания сыра при температуре плиты $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$

точка и снижение температуры по всей толщине шло плавно и постепенно, без скачков.

После реализации плана эксперимента была составлена экспериментально-статистическая модель в виде полинома второй степени, которая имела вид

$$Y = 6,45 + 1,78X_1 + 2,15X_2 + 0,475X_1X_2 + 0,47X_1^2 + 1,07X_2^2.$$

Анализ экспериментальных данных позволил сделать вывод, что на продолжительность замораживания твердых блочных сыров влияет каждый из изучаемых факторов (температура морозильной плиты X_1 и толщина блока сыра X_2). Однако наиболее существенное влияние на продолжительность замораживания оказывает толщина блока сыра (удлиняет процесс).

Для максимального сохранения исходных свойств продукта в процессе хранения важно обеспечить высокую скорость предварительного замораживания. Линейная скорость замораживания не является постоянной величиной, а меняется при движении фронта кристаллизации. Как ранее уже отмечалось, коэффициент теплопередачи существенно влияет на скорость замораживания только поверхностного слоя, и это влияние резко уменьшается по мере продвижения в глубь продукта. При толщине слоя 50 мм 100-кратное увеличение коэффициента теплопередачи [с 11,6 до 1163 Вт/(м²·К)] вызывает всего лишь трехкратное увеличение линейной скорости процесса, тогда как при толщине 200 мм — в 1,6 раза [5].

Общая оценка интенсивности замораживания блоков сыров также проведена по средней линейной скорости. На рис. 4 представлены зависимости средней скорости замораживания от температуры морозильной плиты.

Анализ данных свидетельствует о том, что с по-

нижением температуры морозильной плиты от $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ скорость замораживания увеличивалась в среднем на 39 %; дальнейшее снижение температуры до $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ приводило к росту скорости процесса всего лишь на 23 %. Полученные результаты показали, что интенсивность нарастания скорости замораживания уменьшается с дальнейшим падением температуры морозильной плиты ниже $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Зависимость между температурой и скоростью процесса такова: понижение температуры рабочей поверхности плиты от -40 до $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ приводит к нарастанию скорости замораживания на 11%, от -45 до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ — лишь на 6 %.

Таким образом, более низкие температуры плиты не дают существенного увеличения скорости процесса и соответственно сокращения его продолжительности, но приводят к значительному повышению энергетических затрат, о чем свидетельствуют результаты термозкономического анализа, проведенного по известной методике [2]. Поэтому с экономической точки зрения для проведения замораживания продукта нецелесообразно снижать температуру морозильной плиты ниже $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Определение технологических условий замораживания головок сыра важно рассмотреть и с учетом толщины поперечного сечения объекта исследования. В ходе эксперимента установлена закономерность влияния геометрического размера сыров на скорость замораживания (рис. 5).

С увеличением толщины блока сыра от 0,08 до 0,11 м наблюдали снижение скорости процесса на 11,4 %. Дальнейшее увеличение толщины блока сыра с 0,11 до 0,14 м привело к снижению скорости замораживания уже на 23 %. Замораживание более крупных сыров, толщиной от 0,14 до 0,17 м (например, голландский, горный) сопровождалось снижением скорости кристаллизации на 39 %, а

блока советского сыра с поперечным сечением от 0,17 до 0,2 м – на 79%.

Таким образом, быстрого замораживания (по общепринятой терминологии) в плиточном скороморозильном аппарате при холодильной обработке сыров в рассматриваемом диапазоне температур морозильной плиты и размера их поперечного сечения достичь не представляется возможным. В данном случае удастся обеспечить процесс замораживания со средней скоростью передвижения фронта кристаллизации применительно к головкам или блокам сыров, имеющим толщину поперечного сечения не более 0,14...0,17 м.

Вышеизложенное позволяет сделать выводы, что в результате проведенных исследований установлены закономерности и технологический регламент замораживания головок твердых сычужных сыров. К основным технологическим факторам относятся: температура морозильной плиты $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, температура в термическом центре головки сыра $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, средняя скорость замораживания $(5,6...6,0)\cdot 10^{-6}\text{ м/с}$, толщина поперечного сечения сыра 0,14...0,17 м, время замораживания 6,2...7 ч.

Для объективной оценки технологических условий замораживания сыров в блоках или головках и условий длительного низкотемпературного хранения необходимо проведение исследований по установлению влияния низких температур на свойства продукта. Важно проследить характер изменения показателей качества в различных сечениях (по толщине блочного сыра), поскольку линейная скорость замораживания в этих сечениях существенно отличается от средней скорости. Поэтому изучение состояния продукта после размораживания целесообразно проводить путем отбора проб для исследований в различных сечениях образца.

Список литературы

1. *Аверин Г.Д., Журавская Н.К., Каухчешвили Э.И.* и др. Физико-технические основы холодильной обработки пищевых продуктов. – М.: Агропромиздат, 1985.
2. *Венгер К.П., Каухчешвили Н.Э., Липень И.М.* Термoeкономическая оценка методов замораживания скоропортящихся продуктов // Холодильная техника. 1990. № 2.
3. *Мазуренко А.Г., Федоров В.Г.* Замораживание пищевых продуктов в блоках. – М.: Агропромиздат, 1988.
4. *Молоко, молочные продукты и консервы молочные.* Технические условия. Ч. 1. – М.: Издательство стандартов, 1998.
5. *Чижов Г.Б.* Теплофизические процессы в холодильной технологии пищевых продуктов. – М.: Пищевая промышленность, 1979.