

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
ПРОЦЕССОВ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ОБРАБОТКИ ОВОЩЕЙ**

G.F. Sakhabutdinova

**PILOT AND ANALYTICAL STUDY OF PROCESSES OF LOW-TEMPERATURE  
TREATMENT OF VEGETABLES**

**Сахабутдинова Г.Ф.** – ст. преп. каф. технологического проектирования пищевых производств Кемеровского технологического института пищевой промышленности (университета), г. Кемерово. E-mail: 89235202979@yandex.ru

**Sakhabutdinova G.F.** – Asst, Chair of Technological Designing of Food Productions, Kemerovo Institute of Technology of Food Industry (University), Kemerovo. E-mail: 89235202979@yandex.ru

Низкотемпературная обработка как способ длительного хранения растительного сырья является наиболее распространенным и экономичным способом, позволяющим уменьшить потери сырья, сохранить потребительские свойства и качество продукции. Исследовались следующие процессы низкотемпературной обработки расфасованной в пакет порции овощной смеси: конвекционное замораживание в потоке восходящего воздуха на металлической сетке, кондуктивное замораживание на металлической плите, комбинированный способ, сочетающий в себе преимущества первых двух способов. Комбинированный способ позволяет избежать примерзания пакета с продуктом к металлической плите за счет предварительного подмораживания на сетке в потоке восходящего воздуха. Подмораживание позволяет получить на поверхности продукта замерзший слой толщиной 2–3 мм, а также удалить свободную влагу с поверхности упаковки. Температурные режимы низкотемпературной обработки: при -30 °С и при -40 °С в камере холодильной машины. Определялись продолжительность замораживания и скорость каждого из процессов, при этом замораживание длилось до достижения в центре продукта температуры -22 °С, так как при достижении этой температуры в смеси вся свободная влага кристаллизуется. Построены графики изменения температуры в термическом центре продукта и на его поверхности в ходе замораживания. Установлено, что наиболее приемлемым способом является комбини-

рованный, так как скорость замораживания высока и при нем отсутствует повреждение упаковки при отделении замороженной порции от плиты. Предложен тепловой расчет комбинированного способа, позволяющий определить с высокой точностью толщину слоев, замерзших в потоке воздуха и вследствие отдачи теплоты металлической плите. Продолжительность замораживания, полученная в ходе теплового расчета, полностью совпадает с экспериментальными данными, что говорит об адекватности применяемой методики.

**Ключевые слова:** овощные полуфабрикаты, низкотемпературная обработка, скорость замораживания, кривые замораживания, тепловой расчет.

Low-temperature processing as a way of long storage of vegetable raw materials is the most widespread and economic allowing reducing the losses of raw materials, to keep consumer properties and the quality of production. The following processes of low-temperature processing of the mixed vegetables packed in the package of a portion were investigated: convection freezing in the stream of ascending air on the metal gauze, conductive freezing on metal plate and combined way having the advantages of the first two ways. The combined way allows avoiding freezing of the package with the product to metal plate at the expense of preliminary freezing on the grid in the stream of the ascending air. Freezing allows to receive the frozen layer 2–3 mm thick on the product surface, and also to remove free moisture from

packing surface. Temperature conditions of low-temperature processing: at - 30 °C and at -40 °C in a refrigerator chamber. The duration of freezing and the speed of each of processes were defined, thus freezing lasted before the achievement in the center of the product the temperature of -22 °C as at the achievement of this temperature in mix all free moisture crystallizes. The schedules of change of temperature in the thermal center of the product and on its surface are constructed during freezing. It is established that the most acceptable way is combined as the speed of freezing is high and as there is no damage of packing at separation of the frozen portion from the plate. The thermal calculation of the combined way allowing determining the thickness of the layers which froze in the stream of air and owing to warmth return to metal plate with high precision is offered. The freezing duration received during thermal calculation completely coincides with experimental data that testifies about adequacy of the applied technique.

**Keywords:** vegetable semi-finished products, low-temperature processing, freezing speed, freezing curves, thermal calculation.

**Введение.** Для замораживания овощей используются различные способы, классифицируемые по методам отвода теплоты от продукта. Замораживание охлажденным воздухом происходит вследствие переноса теплоты от продукта к циркулирующему хладагенту холодильной машины. Значительный недостаток способа при замораживании неупакованных овощей – большая степень усушки. Третья часть общего расхода энергии на замораживание приходится на работу вентиляторов. Несмотря на это, воздушная среда как среда для переноса теплоты продукта получила наибольшее распространение.

Замораживание в охлажденном растворе протекает путем погружения или орошения продукта, несомненное преимущество – быстрота замораживания. Но применяемый охлаждаемый раствор оказывает сильное коррозионное действие, вызывает скорый износ аппаратов. Описанный способ требует поддержания постоянными следующих величин: концентрация и температура раствора.

Способ контактного замораживания включает в себя сжимание продукта между двух металлических плит с циркулируемым хладагентом. Продукт, подвергаемый заморозке, должен иметь правильную форму и не деформироваться под воздействием плит.

Замораживание в жидком хладагенте (азот, диоксид углерода) отличается высокой скоростью протекания процесса. Недостатками являются значительные производственные расходы, что не дало распространиться способу в широких масштабах производства [1–3].

При выборе способа низкотемпературной обработки следует учитывать соотношение экономической составляющей процесса, длительность замораживания, качество получаемой овощной продукции.

**Цель работы.** Исследование процесса низкотемпературной обработки овощной продукции в упаковке и подбор рационального способа замораживания.

**Задачи:** провести экспериментальное исследование процесса низкотемпературной обработки овощной продукции в упаковке; определить скорость замораживания каждого из используемых способов; провести тепловой расчет наиболее рационального способа низкотемпературной обработки.

**Материал и методы исследований.** Исследованию подвергалась овощная смесь «Гарнир с тыквой». Состав смеси приведен в таблице 1.

Таблица 1

Состав смеси «Гарнир с тыквой»

Овощи	Расчетная норма закладки, кг/т
Картофель	250
Тыква	250
Перец болгарский	230
Морковь	210
Лук репчатый	50
Зелень (укроп)	10

Смесь готовится по стандартной технологической схеме, после мойки и очистки овощей проводится резка компонентов смеси кубиками со стороной 20 мм, перец и лук шинкуется пластинками 20×5 мм, чеснок и укроп измельчаются. Компоненты смешиваются и фасуются по 400 г вакуумным способом в упаковочный пакет. Полученная порция продукта имеет толщину около 25 мм.

Нами был смоделирован конвекционный способ замораживания порции овощной смеси в упаковке в потоке восходящего воздуха. Скорость движения воздуха составила 1,5 м/с. Продукт помещался на металлическую сетчатую подложку. При кондуктивном способе замораживания применялась металлическая плита, расположенная горизонтально. Предварительно плита выдерживалась при низкой температуре в течение нескольких часов для аккумуляции холода. При замораживании смеси на металлической плите и между двух плит произошло примерзание пакета к их поверхности, при отделении поверхность упаковки была повреждена, нарушилась целостность пакета. Чтобы исклю-

чить примерзание упаковки при наличии на его поверхности влаги, использовали предварительное конвекционное подмораживание. Замораживание проводили в двух температурных режимах: при  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  и при  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  в камере [3].

**Результаты исследований.** На первом этапе экспериментальным путем определяли изменение температуры в различных точках продукта и продолжительность всего процесса. На кривые замораживания графически наносили изменения во времени и температуры в определенных точках продуктов. Поскольку температуру измеряли в различных точках продукта – на его поверхности и в центре, вид кривой зависел от места измерения и интенсивности отбора тепла. Быстрее всего температура снижалась на поверхности тела, наиболее медленно – в его термической средней точке. Низкотемпературная обработка смеси длилась до достижения в центре продукта температуры  $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$ , так как при достижении этой температуры в смеси вся свободная влага кристаллизуется [1, 2, 4]. На рисунках 1–4 представлены графики изменения температуры в ходе замораживания смеси.

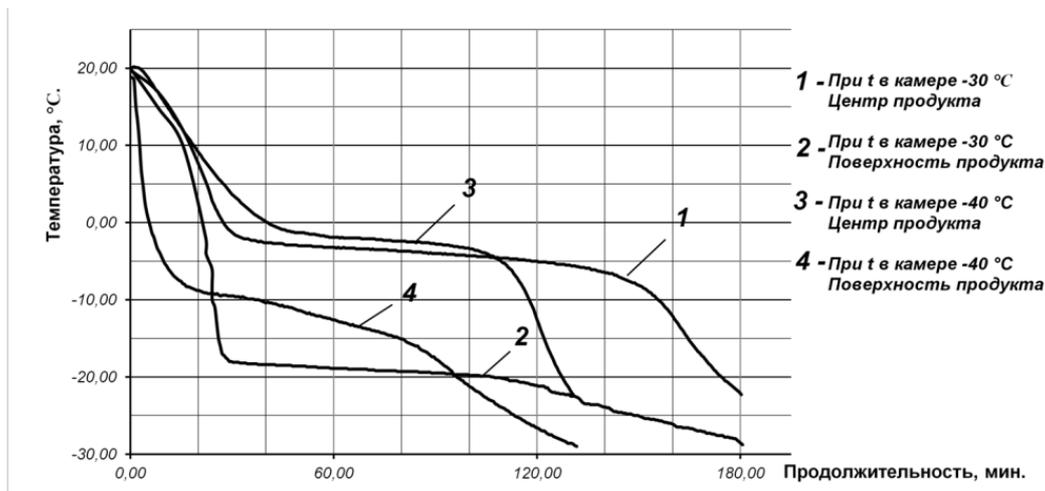


Рис. 1. Кривые замораживания овощной смеси в потоке восходящего воздуха

Характер кривых схож с типичным графиком замораживания: начало процесса отражается на рисунке 1 участком переохлаждения; после температура выравнивается, что видно по плоскому участку, из смеси начинается перенос

скрытой теплоты, активно формируются кристаллы льда; процесс заканчивается постепенным снижением температуры – участком выравнивания.

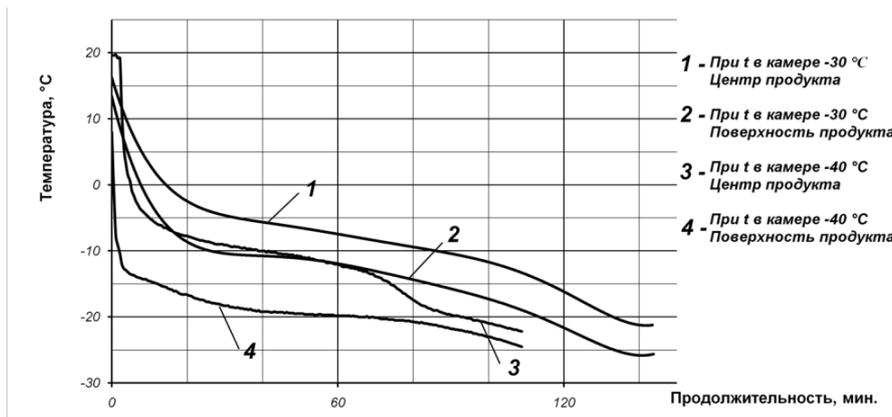


Рис. 2. Кривые замораживания овощной смеси на металлической плите

При анализе кривых замораживания, полученных при размещении продукта на металлической плите, можно сделать вывод: процесс характеризуется резким снижением температуры на участке переохлаждения; участок плато почти не просматривается; после переохлаждения начинается постепенное снижение температуры, напоминающее участок выравнивания.

При анализе кривых на рисунке 3 можно выделить следующее: участок плато слабо про-

сматривается, представляет единое целое с участком выравнивания. Имеется резкий, небольшой по времени скачок температуры поверхности плиты, который объясняется перемещением продукта с сетчатой подложки на металлическую плиту.

Полученные значения продолжительности замораживания различными способами сведены в таблицу 2.

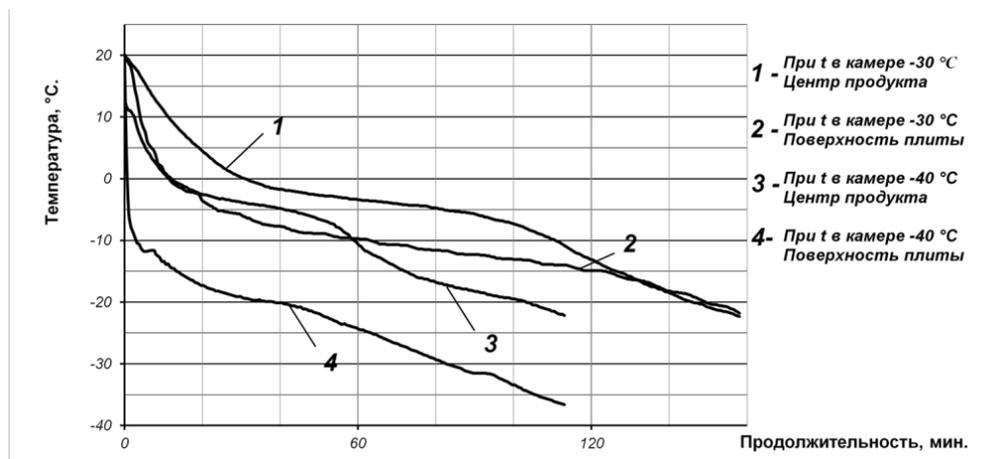


Рис. 3. Кривые конвекционного подмораживания и домораживания овощной смеси на металлической плите

Таблица 2

**Продолжительность замораживания овощной смеси**

Способ	Время, мин	
	$t_{\text{кам.}} = -30\text{ }^{\circ}\text{C}$	$t_{\text{кам.}} = -40\text{ }^{\circ}\text{C}$
Конвекционный	179	131
Контактный на металлической плите	143	108
Комбинированный	158	113

Наименьшая длительность процесса замораживания наблюдается при помещении продукта на металлическую плиту, но при данном способе упаковка смеси примерзает к плите. Применение комбинированного способа полностью исключает проблему, так как влага на поверхности пакета затвердевает на этапе предварительного подмораживания, порция легко отделяется от сетчатой подложки и не примерзает к плите.

Определим скорость замораживания для каждого из используемых способов как отноше-

ние минимального расстояния между поверхностью и термическим центром, равного 1,25 см, ко времени  $(t_2 - t_1)$  между моментами достижения на поверхности 0 °С и температуры в термическом центре на 10 °С ниже криоскопической для данной смеси [3]. Криоскопическая температура для «Гарнира с тыквой» составила -1,17 °С [2]. Время между моментами достижения на поверхности 0 °С и температуры в термическом центре -11,7 °С вычисляли по данным, полученным в ходе эксперимента (табл. 3).

Таблица 3

**Данные для расчета скорости замораживания**

Способ	$t_2$ , МИН	$t_1$ , МИН	$t_2 - t_1$ , Ч	$t_2$ , МИН	$t_1$ , МИН	$t_2 - t_1$ , Ч
	$t_{кам.} = -30\text{ }^{\circ}\text{C}$			$t_{кам.} = -40\text{ }^{\circ}\text{C}$		
Конвекционный	158,4	20	2,3	118,9	5,5	1,9
Контактный	100,6	7	1,6	53,3	0,5	0,9
Комбинированный	115,5	11	1,7	61	1	1

Для конвекционного способа при  $t_{кам.} -30\text{ }^{\circ}\text{C}$  скорость замораживания составила

$$v = \frac{l}{(\tau_2 - \tau_1)}, \quad (1)$$

$$v = \frac{1,25}{2,3} = 0,5.$$

Для остальных способов расчеты проводились аналогично (табл. 4).

Таблица 4

**Скорость замораживания  $v$ , см/ч**

Способ	$t_{кам.} = -30\text{ }^{\circ}\text{C}$	$t_{кам.} = -40\text{ }^{\circ}\text{C}$
Конвекционный	0,5	0,66
Контактный	0,8	1,42
Комбинированный	0,72	1,25

Таким образом, согласно классификации процессов замораживания, все рассмотренные процессы низкотемпературной обработки относятся к быстрым (0,5–5 см/ч).

При использовании комбинированного способа нижний слой продукта в пакете будет заморожен за счет отдачи тепла металлической плите, верхний слой за счет вертикального потока холодного воздуха (как в туннеле) со скоростью около 1,5 м/с. Нами предложен тепловой расчет, основанный на представлении о перемещении границы раздела между отвердевшей и жидкой фазами от периферии в глубь тела по

мере отвода теплоты от его поверхности. Примем, что замораживается неограниченное тело с плоской поверхностью. Спустя некоторое время  $t$  от момента начала замораживания граница раздела между замерзшей и незамерзшей частями тела продвинулось на расстояние  $l$  в глубь поверхности тела, т.е. замерз слой толщиной  $l$ . Расчет толщины замороженной части продукта будем вести по следующему алгоритму:

1. Примем, что в начале замораживания  $t=0$ ;  $l=0$ ;  $dt=10\text{ с}$ .

2. Толщина замороженного слоя за  $d\tau=10$  с определим по формуле

$$dl = \frac{d\tau}{\frac{q\rho}{t_{кр}-t_{хл}} \left( \frac{1}{\alpha} \right)}. \quad (2)$$

3. Тогда  $l_1 = dl$ , для последующего приращения  $dl$  воспользуемся формулой

$$dl = \frac{d\tau}{\frac{q\rho}{t_{кр}-t_{хл}} \left( \frac{l_1 + l}{\lambda + \alpha} \right)}. \quad (3)$$

4. Далее  $l_2 = l_1 + dl$ . Аналогично продолжаем расчет толщины замороженного продукта: нижнего слоя  $l_{конт.}$  с учетом контактного замораживания, верхнего  $l_{конвекц.}$  – конвекционного замораживания.

5. Расчет останавливаем в тот момент, когда продукт полностью замерзнет, т.е. суммарная

толщина замороженных слоев продукта достигнет 25 мм.

$$l_{общ} = l_{конт.} + l_{конвекц.} \quad (4)$$

При этом теплота  $q$ , выделяемая телом при замораживании, определялась как разность энтальпий свежей смеси «Гарнир с тыквой» и замороженной смеси и составила 327,9 кДж/кг. Средняя плотность смеси  $\rho$  составила 897 кг/м<sup>3</sup>, криоскопическая температура смеси  $t_{кр}$  с учетом массовой доли каждого из компонентов, -1,17 °С. Температура хладоносителя  $t_{хл}$  равна температуре воздуха в камере. Теплопроводность смеси  $\lambda$  принимаем равной 1,97 Вт/м·К. По результатам теплового расчета был построен график продолжительности замораживания, представленные на рисунке 4.

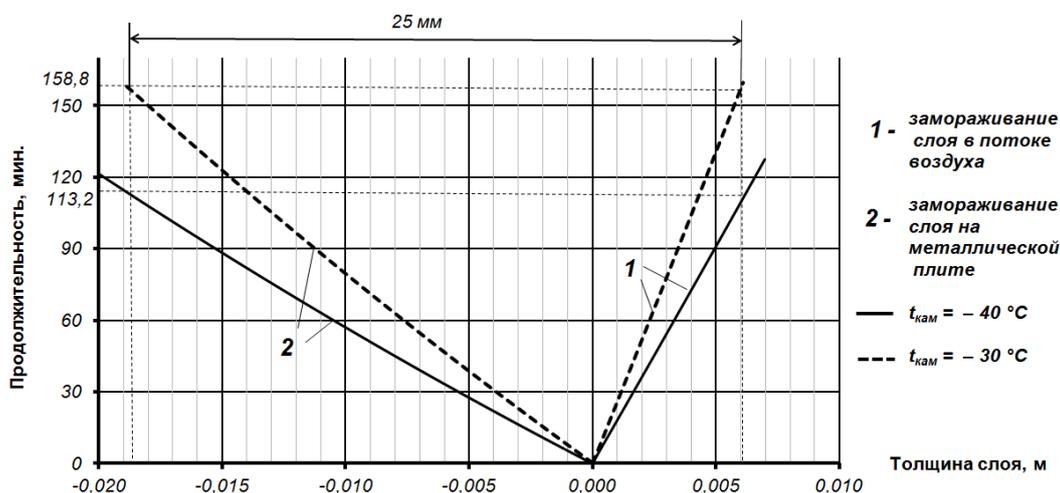


Рис. 4. График определения продолжительности замораживания на охлаждаемой плите при непрерывном обтекании потоком холодного воздуха

Продолжительность замораживания, полученная расчетным методом, составила 113,2 и 158,8 мин для температур в камере -40 °С и -30 °С соответственно. Расчетные данные полностью совпадают с экспериментальными. При этом толщина слоя, замерзшего в результате нахождения в потоке холодного воздуха, составила 0,006 м. Толщина слоя, замерзшего в результате нахождения на металлической плите, равна 0,019 м.

**Выводы.** Исследован процесс низкотемпературной обработки овощной смеси «Гарнир с тыквой»: в ходе экспериментов определена продолжительность замораживания смеси тре-

мя способами, расчетным методом получены скорости замораживания. Все рассмотренные способы относятся к быстрым. Предложен метод теплового расчета продолжительности замораживания комбинированным способом, позволяющий определить толщину слоев, замерзших в результате конвекционного и кондуктивного воздействия. Расчетные данные полностью соответствуют экспериментальным, что говорит об адекватности предложенной методики расчета.

## Литература

1. *Короткий И.А.* Сибирская ягода. Физико-химические основы технологий низкотемпературного консервирования. – Кемерово, 2007. – 146 с.
2. Пат. 2608727 Российская Федерация, МПК А23В 7/04. Способ быстрого замораживания пищевых продуктов из растительного сырья в упаковке / *И.А. Короткий, Г.Ф. Сахабутдинова, В.Г. Лоншаков*; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «КемТИПП». – № 2015116997; заявл. 05.05.15; опубл. 23.01.17. – 8 с.
3. *Korotkiy I.A.* Analysis of the energy efficiency of the fast freezing of blackcurrant berries // *Foods and Raw Materials*. – 2014. – № 2. – P. 3–14.
4. *Короткий И.А., Сахабутдинова Г.Ф., Ибрагимов М.И.* Определение теплофизических свойств компонентов плодовоовощной смеси в процессе замораживания // *Техника и технология пищевых производств*. – 2016. – Т. 40. – № 1. – С. 81–86.

## Literatura

1. *Korotkiy I.A.* Sibirskaja jagoda. Fiziko-himicheskie osnovy tehnologij niskotemperaturnogo konservirovanija. – Kemerovo, 2007. – 146 s.
2. Pat. 2608727 Rossijskaja Federacija, MPK A23B 7/04. Sposob bystrogo zamorazhivaniya pishhevych produktov iz rastitel'nogo syr'ja v upakovke / *I.A. Korotkiy, G.F. Sahabutdinova, V.G. Lonshakov*; zajavitel' i patentoobladatel' FGBOU VO «KemTIPP». – № 2015116997; zajavl. 05.05.15; opubl. 23.01.17. – 8 s.
3. *Korotkiy I.A.* Analysis of the energy efficiency of the fast freezing of blackcurrant berries // *Foods and Raw Materials*. – 2014. – № 2. – P. 3–14.
4. *Korotkiy I.A., Sahabutdinova G.F., Ibragimov M.I.* Opredelenie teplofizicheskikh svojstv komponentov plodoovoshhnoj smesi v processe zamorazhivaniya // *Tehnika i tehnologija pishhevych proizvodstv*. – 2016. – Т. 40. – № 1. – S. 81–86.

