

УДК 637.52.001.8

Оценка эффективности организации комбинированного способа быстрого замораживания биологических объектов

Д-р техн. наук О. Н. БУЯНОВ¹, д-р техн. наук И. В. БУЯНОВА²

¹onb@kemtipp.ru, ²milk@kemtipp.ru

Кемеровский технологический институт пищевой промышленности (университет)
650056, г. Кемерово, б-р Строителей, 47

Рассматривается принцип технологического оформления комбинированного способа быстрого замораживания биологических объектов. Комбинированный способ предусматривает регулируемый теплоотвод по принципу программного замораживания. В качестве основного звена комбинированной системы хладоснабжения принят скороморозильный аппарат производительностью: 100; 250; 500 и 800 кг/ч. Скороморозильный аппарат представляет собой систему модулей, в каждом из которых можно независимо обеспечивать необходимые для технологического процесса условия теплоотвода для осуществления процесса быстрого замораживания. Технологическим принципом комбинированной системы хладоснабжения является полное использование холодильного потенциала газообразного азота в первом модуле скороморозильного аппарата при поддержании рациональной температуры воздуха (–30 град. С) во втором модуле. Проведена термoeкономическая оценка условий работы комбинированной системы хладоснабжения. Термoeкономическая модель позволила получить результаты, свидетельствующие о том, что понижать температуру воздуха в первом модуле ниже –70 град. С, а во втором ниже –30 град. С нецелесообразно с энергетической точки зрения.

Ключевые слова: комбинированный способ, замораживание, молочные продукты, скороморозильный аппарат, модуль, температура, зона.

Organization efficiency estimation of biological objects fast freezing combined method

D. Sc. O. N. BUAYNOV¹, D. Sc. I. V. BUAYNOVA²

¹onb@kemtipp.ru, ²milk@kemtipp.ru

Kemerovo Institute of Food Science and Technology
47 Boulevard Stroiteley, Kemerovo, 650056, Russia

The principle of technological registration of biological objects fast freezing combined method is considered. The combined method provides adjustable tap of heat according to program freezing principle. Fast-freezing device with the output of 100, 250, 500 and 800 kg/h is the main part of combined cooling system. Thus the device is a system of modules in each of which it is possible to provide conditions, necessary for technological process, of tap of heat for realization of fast freezing process independently. The main technological idea of combined cooling system is to use full gaseous nitrogen refrigeration potential in the first module when the temperature of –30 deg C is maintained in the second module. The power and economic estimation of the combined cooling system working conditions is carried out. The results of the thermoeconomic model application show that it is economically unreasonable to low air temperature below –70 deg C in the first module and below –30 deg C in the second one.

Keywords: combined way, freezing, dairy products, freezing device, module, temperature, zone.

Введение

Совершенствование холодильной техники и технологии производства быстрозамороженной продукции предполагает переход с камерного на аппаратное замораживание с помощью скороморозильной техники. Использование азотных скороморозильных аппаратов дает возможность создавать непрерывные поточные технологические линии, сократить потери продукта от усушки, снизить температуру холодильной обработки,

значительно сократить продолжительность процесса, использовать экологически безопасный хладагент.

На сегодняшний день наибольшее применение имеют воздушные скороморозильные аппараты, в которых замораживают продукты любой формы, размеров, в упаковке и без упаковки. Создание новых аппаратов на базе газообразного и жидкого азота определяет криогенный метод замораживания для получения высоких скоростей процесса и высокого качества продукта. Бы-

строзамороженные продукты сохраняют до 95–98% исходных свойств, они порционированны и готовы для употребления [1, 2].

Для организации быстрого замораживания с оптимальными условиями вызывает интерес совмещение этих двух способов и создание новой технологии замораживания на базе комбинированной азотной и воздушной системы холодильной обработки биологических объектов.

Сравнительный анализ комбинированного метода с воздушным, по продолжительности процесса и средней линейной скорости замораживания, показал, что нет существенной разницы в значениях продолжительности замораживания при рассматриваемых вариантах комбинированного метода. Однако значение скорости процесса при комбинации «азот + воздух» в 4...5 раз выше по сравнению с «воздух + азот». Анализ также показал, что комбинированный метод по сравнению с воздушным практически в 2...3 раза сокращает продолжительность процесса. Время замораживания в пределах часа можно обеспечить при комбинированном методе температурой воздуха на уровне $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$, тогда как при воздушном $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ [1].

Исследования показали, что вариант замораживания «азот + воздух» практически исключает потери массы продукта за счет усушки, так как моментально образуется замерзший слой, препятствующий испарению влаги с поверхности продукта. При варианте «воздух + азот» усушка продукта не исключена, однако она меньше, чем при воздушном методе в силу сокращения продолжительности замораживания.

С помощью термозкономического анализа, в котором основным критерием являются приведенные затраты, как правило, дается окончательная оценка исследуемых вариантов организации комбинированного метода замораживания.

Кроме того, решаются задачи по оптимизации морозильных аппаратов по технико-экономическим критериям: максимуму производительности, минимуму приведенных затрат. В том случае, когда потребительский рынок не насыщен быстрозамороженными продуктами, спрос превышает предложения, то работа морозильных аппаратов на верхнем пределе их производительности является экономически оправданной.

Быстрое замораживание отличается энергоемкой структурой себестоимости. Поэтому при разработке новых моделей практический интерес представляет выбор оптимального значения установленной энергетической мощности, которая обеспечивала бы минимум приведенных затрат. Используя эксергический метод можно количественно оценить энергетическую эффективность предлагаемой системы хладоснабжения и обосновать рациональный вариант ее организации.

Основным критерием термозкономической оценки являются затраты, приведенные к единице продукта. Кроме затрат на создание низких температур и организацию движения охлаждающей среды включают затраты, связанные с потерями массы продукта от усушки. Использование данного метода для проточных систем хладоснабжения требует введения новых данных по расходу и цене жидкого азота. Полученные результаты могут быть использованы в инженерных расчетах криогенного

оборудования и для обоснования рациональных вариантов его эксплуатации.

Целью настоящего исследования является технологическое оформление быстрого замораживания биологических объектов в двухзонном скороморозильном аппарате комбинированного типа «азот + воздух» с регулируемым теплоотводом.

Объекты и методы исследований

Объектом замораживания являлись натуральные полутвердые сыры различных видовых групп с массовой долей жира в сухом веществе от 45 до 50% и творог нежирный, выработанный кислотнo-сычужным способом.

Для исследования процесса замораживания был создан экспериментальный стенд, конструкция которого позволяла изменять и поддерживать температуру хладагента в рабочих камерах.

В исследуемой комбинированной системе замораживания были определены следующие температурные уровни газообразного азота и потока охлажденного воздуха:

I уровень: температура газообразного азота, поступающего в первую зону аппарата, $t_{t1} = -70...-60\text{ }^{\circ}\text{C}$;

II уровень: температура входящего газообразного азота во вторую зону в процессе замораживания и перехода во вторую модуль $t_{t2} = -40...-35\text{ }^{\circ}\text{C}$;

III уровень: температура потока воздуха, устанавливаемая во второй зоне $t_{t3} = -20...-40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Результаты и их обсуждение

За методическую основу принципа оформления исследуемого способа быстрого замораживания принята методика аппаратурного оформления проточной азотной системы, разработанная А. А. Антоновым и К. П. Венгер [3, 4].

Рассматриваемая ситуация для теплообмена при быстром замораживании творога представлена как система модулей, в каждом из которых можно независимо обеспечивать необходимые для технологического процесса условия теплоотвода. При этом учитываются особенности многозонной комбинированной системы хладоснабжения, т. е.:

— в первой зоне (модуле) за счет воздействия паров азота продукт замораживается до среднеобъемной температуры равной криоскопической температуре продукта;

— во второй зоне (которая может состоять из нескольких модулей) — холодным воздухом, охлажденным выходящими парами азота из первого модуля (частично), и машинной системой охлаждения (основной) — до заданной конечной температуры продукта.

Основным принципом технологического оформления комбинированной системы хладоснабжения является полное использование холодильного потенциала газообразного азота в первом модуле скороморозильного аппарата при поддержании рациональной температуры воздуха во втором модуле.

В качестве основного звена комбинированной системы хладоснабжения принят скороморозильный аппарат производительностью: 100; 250; 500 и 800 кг/ч.

Таким образом, рассматривается система хладоснабжения, в которой продукт замораживается в два этапа:

— парами азота от начальной температуры продукта $t_{\text{н}} = 15$ °С до среднеобъемной, равной криоскопической температуре $t_{\text{в}} = t_{\text{кр}}$ (I уровень системы);

— в потоке воздуха и газообразным азотом, отходящим из первой зоны аппарата от $t_{\text{в}} = t_{\text{кр}}$ до конечной среднеобъемной $t_{\text{вк}} = -20$ °С (II и III температурные уровни).

Для проведения сравнительного анализа приведенных затрат при комбинированном и воздушном замораживании объектов исследования применен термозкономический метод. Этот метод исследования находит все большее применение для комплексной оценки холодильной обработки продуктов [5].

При проведении термозкономического анализа сделаны следующие допущения:

— процесс замораживания осуществляется в локальной системе (охлаждающая среда — продукт);

— холодильная установка поддерживает заданную температуру на уровне испаритель — воздух при оптимальных условиях эксплуатации, как самой системы, так и испарителя;

— разность между температурой кипения хладагента в системе и воздухом в аппарате постоянна при всех температурных режимах;

— режимные параметры изменяются во времени незначительно; в модулях и в теплообменных аппаратах происходят квазистационарные процессы;

— энергетический анализ проводится при стационарном состоянии всех контролируемых поверхностей;

— тепловой поток, направленный в модуль через наружные ограждения, пренебрежимо мал, по сравнению с основным потоком тепла, отводимого от продукта;

— при проведении эксергетического анализа не учитывается влияние ухудшения теплообмена между испарителем и воздухом за счет снеговой шубы на поверхности приборов охлаждения.

При холодильной обработке продуктов термозкономическое совершенство процесса выражено через затраты на замораживание, приведенные к 1 ч работы аппарата, руб/ (кг·ч):

— для I зоны

$$\Pi_{\text{пр}} = (\Pi_{\text{кр}} e_{\text{x}} G_{\text{кр}} \eta_{\text{аз}} + \frac{\Pi_{\text{эл}}}{3600} e_{\text{в}} + \Pi_{\text{м}} G_{\text{м}}) \tau,$$

где $\Pi_{\text{м}}$ — цена замораживаемого продукта, руб/кг;

$\Pi_{\text{эл}}$ — цена единицы электроэнергии, руб/ (кВт·ч);

$\Pi_{\text{кр}}$ — цена криоагента, руб/кг;

$e_{\text{x}}, e_{\text{в}}$ — эксергия, соответственно, понижения температуры в зонах и организации движения воздуха кДж/кг;

$G_{\text{м}}$ — потери массы продукта при усушке, кг;

$G_{\text{кр}}$ — расход криоагента для заданной производительности, кг/кг;

$\eta_{\text{аз}}$ — коэффициент использования холодильного потенциала паров азота в первой зоне, $\eta_{\text{аз}} = 0,6$;

τ — общая продолжительность замораживания, включая время выхода скороморозильного аппарата на заданный режим, час.

— для II зоны и воздушного туннельного скороморозильного аппарата

$$\Pi_{\text{пр}} = \left[\frac{\Pi_{\text{эл}}}{3600} (e_{\text{x}} + e_{\text{в}}) + \Pi_{\text{м}} G_{\text{м}} \right] \tau. \quad (2)$$

Каждая составляющая модели, как в комплексе, так и внутри комплекса, имеет принципиальное значение и свое место в развитии общего представления о возможности и эффективности того или иного температурного режима.

Приведенные затраты на технологический процесс здесь представлены в виде трех составляющих.

Первая составляющая учитывает стоимость объекта замораживания и потери массы продукта при холодильной обработке.

Вторая составляющая вносит стоимостное выражение работоспособности системы на термодинамическом уровне окружающей среда — охлаждающая среда.

Третья составляющая учитывает стоимость криоагента на замораживание.

При анализе энергетических затрат на производство холода в широком диапазоне температур кипения хладагента довольно сложно определить расход электроэнергии на обеспечение того или иного режима холодильной обработки и, тем более, невозможно учесть конкретные условия протекания процесса. Кроме того, пары азота, выходящие из I зоны, имеют температуру значительно ниже, чем температура во второй зоне. Поэтому учесть этот «дополнительный» холодильный потенциал для условий работы холодильной машины, обслуживающей второй модуль, довольно сложно, даже экспериментальным путем.

Наиболее удобным, в этой связи, является эксергетический анализ, основанный на аддитивности эксергии, который позволяет свести все потоки тепла объекта исследования к общему количественному и качественному показателю [6–8].

Важным аргументом здесь является общая продолжительность технологического процесса, учитывающая весь период времени активного теплоотвода на рассматриваемых температурных уровнях.

Чтобы использовать полученную величину в динамике, очевидно было бы правильно, если затраты, связанные с выходом аппарата на режим, рассматривать в зависимости от непрерывной продолжительности его работы, а τ учитывать в общей продолжительности как часть, приходящуюся на время одного цикла замораживания.

Для использования исходных данных определились основные эксергетические величины по методике [9].

Результаты расчета составляющих термозкономического анализа представлены в табл. 1. В табл. 2 показаны результаты расчета приведенных затрат для двух вариантов сравнения: 1 — двухзонный скороморозильный аппарат, работающий по комбинированному способу; 2 — туннельный воздушный скороморозильный аппарат.

На рис. 1 представлены результаты сравнительного анализа приведенных затрат при комбинированном и воздушном замораживании объектов исследования. При комбинированном способе приведенные затраты во второй зоне взяты при рациональной температуре воздуха -30 °С.

Анализ изменения приведенных затрат свидетельствует о том, что они в большей степени возрастают для исследуемой группы продуктов после температуры

Таблица 1

Результаты расчета составляющих термозкономического анализа работы скороморозильных аппаратов

Вариант 1								Вариант 2			
Температура среды, °С	I зона			Температура среды, °С	II зона			Температура среды, °С	Машинная система охлаждения		
	e_n , кДж/кг	e_x , кДж/кг	e_s , кДж/кг		e_n , кДж/кг	e_x , кДж/кг	e_s , кДж/кг		e_n , кДж/кг	e_x , кДж/кг	e_s , кДж/кг
-50	264	87	351	-20	912	885	1797	-30	254	390	644
-70	289	98	387	-30	1089	850	1839	-40	306	449	855
-90	312	125	437	-40	1106	949	2055	-50	467	577	1044

Таблица 2

Результаты расчета приведенных затрат на замораживание продуктов, руб/кг*

Вариант 1						Вариант 2			
Температура среды, °С	I зона		Температура среды, °С	II зона		Температура среды, °С	Машинная система охлаждения		
	Продукты			Продукты			Продукты		
	Творог	Сыр		Творог	Сыр		Творог	Сыр	Сыр
-50	5,70	7,44	-20	0,18	0,21	-20	15,1	16,4	
-70	8,28	10,9	-30	0,15	0,18	-30	12,2	13,2	
-90	15,40	18,46	-40	0,13	0,16	-40	9,4	10,8	

* Затраты рассчитаны на производительность скороморозильного аппарата 500 кг/ч при замораживании продуктов толщиной 50 мм.

в первой зоне -70 °С. Это можно объяснить существенным снижением продолжительности замораживания и динамикой изменения эксергии понижения температуры парами азота в диапазоне температур -60... -70 °С.

Машинный способ охлаждения потока воздуха оказывается конкурентоспособным по энергетическим затратам в сравнении с комбинированным способом при температуре -40 °С. Однако по показателям качества продукты будут существенно уступать, т. к. скорость процесса значительно меньше, а продолжительность замораживания, наоборот, заметно увеличивается. Кроме того, в последнем случае при замораживании продуктов без упаковки появляется дополнительная составляющая термозкономического анализа — потери за счет усушки, что также отражается на качестве продуктов.

Таким образом, термозкономическая модель позволила получить результаты, свидетельствующие о том, что понижать температуру воздуха в первом модуле ниже -70 °С, а во втором -30 °С нецелесообразно с энергетической точки зрения.

Список литературы

1. Буянов В. О. Замораживание твердых сыров в условиях регулируемого теплоотвода // Сыроделие и маслоделие. 2009. № 4. С. 46–48.
2. Буянова И. В. Новые технологии замораживания молочных продуктов // Техника и технология пищевых производств. 2012. № 1. С. 14–17.
3. Венгер К. П. Азотные системы хладоснабжения для производства быстрозамороженных пищевых продуктов / К. П. Венгер, А. А. Антонов. — Рязань: Узоречье, 2002. 207 с.

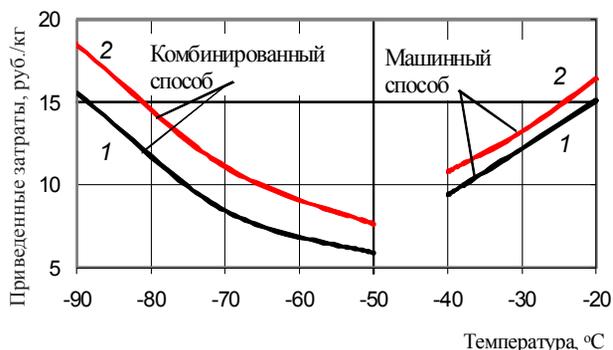


Рис. 1. Приведенные затраты при использовании двух способов замораживания для объектов: творог (1) и полутвердый сыр (2)

4. Венгер К. П., Жильцов И. Б., Носов М. Г., Феськов О. А. Азотная система хладоснабжения с вихревой трубой для туннельного скороморозильного аппарата // Вестник Международной академии холода. 2012. № 4. С. 15–17.
5. Антонов А. А. Техничко-экономическая оценка работы скороморозильных аппаратов / А. А. Антонов, К. П. Венгер // Мясная индустрия. 2002. № 6. С. 40–42.
6. Бродянский В. М. Эксергетический метод и его приложения / В. М. Бродянский, В. Н. Фратшер, К. С. Михалек. — М.: Энергоатомиздат, 1988. 288 с.
7. Brodianski V. M., Alexeev A. Cryogenics in Russia: development of basic cryogenic cycles. Proceedings of the Twentieth International Cryogenic Engineering Conference, ICEC 20 Twentieth International Cryogenic Engineering Conference, ICEC 20. sponsors: International Cryogenic Engineering Committee. Beijing, 2005. p. 11–18.

8. Голубева Л. В., Долматова О. И., Бандура В. Ф. Творожные продукты функционального назначения // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2015. № 2 (64). С. 98–102.

9. Буянов О. Н. Термоэкономический анализ энергоемкой системы при замораживании пищевых продуктов / О. Н. Буянов, Л. В. Лифенцева // Вестник Международной академии холода. 1998. № 3–4. С. 22–24.

References

1. Buyanov V. O. Freezing of firm cheeses in the conditions of the adjustable heat sink. *Syrodellie i maslodellie*. 2009. No 4. p. 46–48. (in Russian)

2. Buyanova I. V. New technologies of freezing of dairy products. *Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv*. 2012. No 1. p. 14–17. (in Russian)

3. Venger K. P. Nitric systems of cold supply for production of fast-frozen foodstuff. / K. P. Venger, A. A. Antonov. — Ryazan': Uzorech'e, 2002. 207 p. (in Russian)

4. Venger K. P., Zhil'tsov I. B., Nosov M. G., Fes'kov O. A. Азотная система хладоснабжения с вихревой трубой для туннельного скороморозильного аппарата. *Vestnik*

Mezhdunarodnoi akademii kholoda. 2012. No 4. p. 15–17. (in Russian)

5. Antonov A. A. Technical and economic job evaluation skoromorozilnykh of devices. /A. A. Antonov, K. P. Venger. *Myasnaya industriya*. 2002. No 6. p. 40–42. (in Russian)

6. Brodyanskiy V. M. Exergic method and its application. / V. M. Brodyanskiy, V. N. Fratsher, K. S. Mikhalek. — Moscow: Energoatomizdat, 1988. 288 p. (in Russian)

7. Brodianski V. M., Alexeev A. Cryogenics in russia: development of basic cryogenic cycles. Proceedings of the Twentieth International Cryogenic Engineering Conference, ICEC 20 Twentieth International Cryogenic Engineering Conference, ICEC 20. sponsors: International Cryogenic Engineering Committee. Beijing, 2005. p. 11–18.

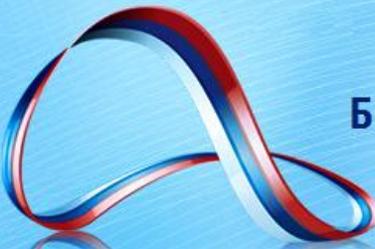
8. Golubeva L. V., Dolmatova O. I., Bandura B. F. Curd products of functional purpose. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta enzhenernih tekhnologiy* [Proceedings the Voronezh state University of engineering technologies]. 2015. No. 2 (64). P. 98–102. (in Russian)

9. Buyanov O. N. The thermoeconomic analysis of power-intensive system when freezing foodstuff / O. N. Buyanov, L. V. Lifentseva. *Vestnik mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 1998. No 3–4. p. 22–24. (in Russian)

Статья поступила в редакцию 26.03.2015

1-4 марта 2016

**12-я МЕЖДУНАРОДНАЯ
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ВЫСТАВКА
МИР КЛИМАТА 2016**



**Бесконечный МИР
технологий КЛИМАТА**

МИР КЛИМАТА 2016
1-4 марта 2016 г.

Основные тематические разделы выставки:

Промышленный и коммерческий холод:

- Промышленный холод: комплектующие, аксессуары, инструмент;
- Промышленный холод – компоненты систем;
- Холодильные шкафы, лари, прилавки, витрины;
- Холодильные комплексы и склады;
- Криогенные техника и технологии.

Климатическое оборудование:

- Системы кондиционирования;
- Вентиляция;
- Отопление и водоснабжение;
- Обработка и очистка воздуха;
- Обогреватели и энергосберегающее оборудование.

Контакты:

Тел/факс: +7 (495) 925-65-61/62, +7 (499) 248-07-34
E-mail: climat@euroexpo.ru

<http://www.climatexpo.ru/>

Другие разделы:

- Системы автоматизации и диспетчеризации зданий;
- Инструменты, расходные материалы, хладагенты, масла;
- Обучение, трудоустройство, консалтинговые услуги на рынке HVAC&R.