

УДК 637.52.001.8

Расчет тепловой нагрузки на модули скороморозильного аппарата комбинированного типа

Д-р техн. наук **О. Н. БУЯНОВ**¹, д-р техн. наук **И. В. БУЯНОВА**²

¹onb@kemtipp.ru, ²milk@kemtipp.ru

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

Рассматриваются вопросы по разработке методики и произведен расчет тепловой нагрузки на модули скороморозильного аппарата комбинированного типа. Комбинированный способ замораживания предусмотрен в скороморозильном аппарате, представляющем собой систему модулей, в каждом из которых можно обеспечивать заданные условия теплоотвода процесса быстрого замораживания биологических объектов. Показана установленная тепловая нагрузка на первый модуль аппарата, производительностью соответственно 100, 250, 500 и 800 кг/ч. Определен расход жидкого азота при замораживании продукта от $t_H = 18\text{ }^\circ\text{C}$ до $t_V = -3\text{ }^\circ\text{C}$ в аппарате, определяющего первый температурный уровень системы хладоснабжения. Определена тепловая нагрузка на второй модуль аппарата (с интенсивной циркуляцией воздуха), с учетом холодильного потенциала входящего газообразного азота во вторую зону при варьировании температуры потока воздуха: $t_{a1} = -40, -30, -20\text{ }^\circ\text{C}$ (второй и третий температурные уровни). Для применения комбинированного способа замораживания в холодильной промышленности целесообразно использовать аппараты большей производительности, т. к. приведенные затраты с увеличением производительности существенно снижаются.

Ключевые слова: комбинированный способ, быстрое замораживание, творог, скороморозильный аппарат, модуль, температура, зона, тепловая нагрузка.

Информация о статье

Поступила в редакцию 01.02.2016, принята к печати 20.04.2016

doi: 10.21047/1606-4313-2016-15-2-63-66

Ссылка для цитирования

Буянов О. Н., Буянова И. В. Расчет тепловой нагрузки на модули скороморозильного аппарата комбинированного типа // Вестник Международной академии холода. 2016. № 2. С. 63–66.

Heat load calculation for the modules of combined type freezing units

D. Sc. **O. N. BUAYNOV**¹, D. Sc. **I. V. BUAYNOVA**²

¹onb@kemtipp.ru, ²milk@kemtipp.ru

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

The article deals with methodology and calculation of heat load for modules of combined type fast-freezing units. Combined method of refrigeration is provided in fast-freezing unit consisted of a system of modules each of which can provide the specified conditions of the heatsink for quick freezing process of biological objects. Set thermal load on the first module of the unit with the capacity of 100, 250, 500 u 800 kg/h is shown. Liquid nitrogen consumption for refrigeration from 18 °C to -3 °C is calculated for the first temperature level of refrigeration unit. Thermal load on the second module (with intense convection) is calculated taking into account refrigeration capacity of inlet gaseous nitrogen at the air temperature of -40, -30, -20 °C (the second and the third temperature level). In refrigeration industry the units of a larger capacity are recommended to use for combined method of refrigeration due to their cost-effectiveness.

Keywords: combined method, fast freezing, curd, fast-freezing unit, module, temperature, area, heat load.

Введение

Промышленное производство быстрозамороженных продуктов всегда требует организации современной, малоэнергоёмкой, экологически безопасной технологии и соответствующего оборудования.

Одним из направлений повышения экологической безопасности является переход на природные хладагенты. В России доля холодильных установок, работающих на синтетических хладагентах, составляет 90%, на при-

родных около 10%, что не соответствует мировым тенденциям в сохранении экологии планеты. Новая холодильная техника должна отвечать важнейшим принципам мирового уровня: быть высокофункциональной, конкурентоспособной и оставаться, прежде всего, ресурсосберегающей (снижение потерь энергии, материалов, сырья) [1, 2].

Совершенствование холодильной техники и технологии производства быстрозамороженной продук-

ции 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 безопасные хладагенты.

В мировой практике 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. Быстрозамороженные продукты сохраняют до 95–98% исходных свойств, они порционированы и готовы для употребления. 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 [3–6].

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 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ [4, 7–9].

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.

При помощи термоэкономического анализа, в котором основным критерием являются приведенные затраты, была дана окончательная оценка исследуемых вариантов организации данного комбинированного метода замораживания: понижать температуру воздуха в первом модуле ниже $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$, а во втором $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ нецелесообразно с энергетической точки зрения [5].

Теперь необходимо решить задачу оптимизации аппарата комбинированного типа «азот+воздух» по технико-экономическим критериям: максимуму производительности при минимуме приведенных затрат, что и является целью настоящего исследования.

Объекты и методы исследований

Объектом замораживания являлся творог нежирный, выработанный кислотно-сычужным способом коагуляции белков молока.

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

I — температура газообразного азота $t_{r1} = -70...-60\text{ }^{\circ}\text{C}$, поступающего в первую зону аппарата;

II — температура входящего газообразного азота во вторую зону в процессе замораживания и перехода во второй модуль: $t_{r2} = -40...-35\text{ }^{\circ}\text{C}$;

III — температура потока воздуха, устанавливаемая во второй зоне $t_{в1} = -20...-40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Результаты и их обсуждение

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 $t_{н} = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ до среднеобъемной, равной криоскопической температуре $t_{в} = t_{кр}$ (I уровень системы);

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

При оценке условий работы комбинированной системы хладоснабжения, были определены следующие характеристики:

1. Тепловая нагрузка на первый модуль аппарата, производительностью соответственно 100, 250, 500 и 800 кг/ч;

2. Расход жидкого азота при замораживании продукта в первой зоне от начальной температуры $t_{н} = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$

до $t_v = t_{кр}$ в интервале назначенной производительности аппарата при варьировании температуры газообразного азота на входе в аппарат: $t_{r1} = -80; -70; -60$ °С (I температурный уровень);

3. Тепловая нагрузка на второй модуль аппарата, производительностью соответственно 100, 250, 500 и 800 кг/ч, с учетом холодильного потенциала входящего газообразного азота во вторую зону при варьировании температуры потока воздуха: $t_{в1} = -40; -30; -20$ °С (II и III температурные уровни).

1. Тепловая нагрузка на первый модуль аппарата определена по методике калорического расчета и складывалась из:

$$Q_o = Q_1 + Q_2 + Q_4, \quad (1)$$

где Q_1, Q_2, Q_4 — теплопритоки, соответственно, через наружное ограждение, от продукта, эксплуатационные, кВт.

$$Q_1 = k \cdot F_{огр} \cdot \Delta t, \quad (2)$$

где k — коэффициент теплопередачи, $k = 0,19$ Вт/(м²·К); $F_{огр}$ — площадь теплопередающей поверхности аппарата, м²

$$F_{огр} = 2L_{ан} B_{ан} + 2L_{ап} H_{ан} + 2H_{ап} B_{ан} \quad (3)$$

где L, B, H — соответственно, длина, ширина и высота изолированного контура аппарата;

$$t = t_{нар} - t_{вн}, \quad (4)$$

где $t_{нар}, t_{вн}$ — расчетная температура, соответственно, наружного воздуха ($t = 18$ °С) и температура среды в соответствующих зонах.

$$Q_2 = \frac{G_{ан}}{3600} (h_n - h_{кр}), \quad (5)$$

где $G_{ан}$ — производительность аппарата, кг/ч; $h_n, h_{кр}$ — энтальпия, соответственно, при начальной ($t_n = 15$ °С) и криоскопической температуре продукта ($t_{кр} = -3$ °С).

Эксплуатационные теплопритоки Q_4 , связанные только с окнами загрузки и выгрузки туннеля аппарата, принимались на уровне 5% от Q_2 .

Результаты первого этапа расчетов сведены в табл. 1.

2. Определение расхода жидкого азота при замораживании продукта от $t_n = 18$ °С до $t_v = -3$ °С в аппарате варьированной производительности и, соответственно, тепловой нагрузки, осуществлялось в зависимости от температуры газообразного азота, входящего в аппарат — t_{r1} , определяющего первый температурный уровень системы хладоснабжения.

Методика расчета заключалась в определении:

— удельной холодопроизводительности распыляемого жидкого азота при заданной температуре t_{r1} :

$$q_o = r_{аз} + C_{р.аз} (t_{r1} - t_{ж.аз}), \quad \text{кДж/кг}, \quad (6)$$

где $r_{аз} = 197,5$ кДж/кг; $C_{р.аз} = 1,05$ кДж/(кг·К); $t_{ж.аз} = -196$ °С; — действительного расхода жидкого азота для получения газовой среды заданной температуры:

$$G_{аз} = \frac{Q_o \cdot 3600}{q_o \cdot G_{ан}}, \quad \frac{\text{кг} \times \text{азота}}{\text{кг} \times \text{продукта}} \quad (7)$$

Результаты данного расчета сведены в табл. 2 и проиллюстрированы в виде графической зависимости на рисунке.

Зависимость расхода жидкого азота при замораживании творога от температуры газообразного азота t_{r1} в аппаратах различной производительности

3. Тепловая нагрузка на второй модуль аппарата с учетом холодильного потенциала входящего газообраз-

Таблица 1

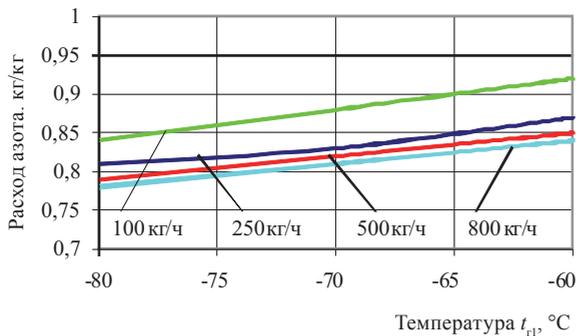
Тепловая нагрузка на модули аппарата при комбинированном способе замораживания

$G_{ан}$, кг/ч по творогу	Q_o , кВт при температурах в зонах, °С					
	I зона			II зона		
	-60	-70	-80	-20	-30	-40
100	7,98	8,07	8,16	3,16	3,25	3,34
250	19,11	19,23	19,35	7,71	7,83	8,05
500	37,55	37,70	37,86	15,29	15,44	15,59
800	59,41	59,58	59,75	24,33	24,50	26,20

Таблица 2

Расход жидкого азота в первом модуле аппарата

t_{r1} , °С	q_o , кДж/кг	$G_{аз}$ кг/кг, при замораживании в аппаратах производительностью, кг/ч			
		100	250	500	800
-80	319,3	0,92	0,87	0,85	0,84
-70	329,8	0,88	0,83	0,82	0,81
-60	340,4	0,84	0,81	0,79	0,78



Зависимость расхода жидкого азота при замораживании творога от температуры газообразного азота $t_{г1}$ в аппаратах различной производительности

ного азота во вторую зону при варьировании температуры потока воздуха: $t_{в1} = -40; -30; -20$ °C (II и III температурные уровни) определена по методике, изложенной в п. 1, а результаты расчета представлены в табл. 1. Формула для рассматриваемой задачи несколько видоизменена:

$$Q_2 = \frac{G_{\text{ап}}}{3600} (h_{\text{кр}} - h_{\text{к}}) \quad (5)$$

где $h_{\text{к}}$ — энтальпия продукта при конечной заданной среднеобъемной температуре, кДж/кг.

Таким образом, получены количественные характеристики зависимости расхода жидкого азота в двухзонной комбинированной системе замораживания продукта до среднеобъемной температуры $t_{\text{в}} = -22$ °C и тепловой нагрузки на машинную систему охлаждения с учетом холодильного потенциала входящего газообразного азота во вторую зону.

Следует отметить, что для комбинированного способа замораживания целесообразно принимать аппараты большей производительности, поскольку приведенные затраты с увеличением производительности существенно снижаются.

Список литературы

1. Петров Е. Т., Круглов А. А., Рукобратский Н. И. Анализ методов снижения энергопотребления систем холодоснабжения предприятий в процессе круглогодичной эксплуатации. // Вестник Международной академии холода. 2015. № 1. С. 34–38.
2. Большаков С. А. Холодильная техника и технология продуктов питания. — М.: Академия, 2003. 224 с.
3. Антонов А. А., Венгер К. П. Техничко-экономическая оценка работы скороморозильных аппаратов. // Мясная индустрия. 2002. № 6. С. 40–42.

4. Венгер К. П., Антонов А. А. Азотные системы холодоснабжения для производства быстрозамороженных пищевых продуктов. — Рязань: Узорець, 2002. 207 с.
5. Буянов О. Н., Буянова И. В. Оценка эффективности организации комбинированного способа быстрого замораживания биологических объектов // Вестник Международной академии холода. 2015. № 4. С. 44–48.
6. Воскобойников В. А. Разработка параметров процесса замораживания пищевых продуктов заданной формы. // Вестник Международной академии холода. 2012. № 1. С. 28–30.
7. Буянова И. В. Инновационные технологии для продления сроков годности молочных продуктов // Молочная река. 2015. № 1. С. 60–64.
8. Буянов В. О. Замораживание твердых сыров в условиях регулируемого теплоотвода // Сыроделие и маслоделие. 2009. № 4. С. 46–48.
9. Craiver N. G., Zartzky N. E. Viscoelastic behavior of refrigerated and frozen low moisture Mozzarella cheese. // J. Food Science. 2004. V. 69. No 3. P. 123–128.

References

1. Petrov E. T., Kruglov A. A., Rukobratskiy N. I. Analysis of energy consumption reduction methods in refrigeration systems during year-round exploitation. *Vestnik Mezhdunarodnoi Akademii Kholoda*. 2015. No 1. p. 34–38 (in Russian)
2. Bol'shakov S. A. Refrigerating equipment and technology of food. Moscow: Akademiya, 2003. 224 p. (in Russian)
3. Antonov A. A., Venger K. P. Technical and economic job evaluation skoromorozilnykh of devices. *Myasnaya industriya*. 2002. No 6. p. 40–42. (in Russian)
4. Venger K. P., Antonov A. A. Nitric systems of cold supply for production of the fast-frozen foodstuff. Ryazan': Uzorech'e, 2002. 207 p. (in Russian)
5. Buaynov O. N., Buaynova I. V. Organization efficiency estimation of biological objects fast freezing combined method. *Vestnik Mezhdunarodnoi Akademii Kholoda*. 2015. No 4. p. 44–48. (in Russian)
6. Voskoboynikov V. A. Development of freezing process parameters for preshaped food products. *Vestnik Mezhdunarodnoi Akademii Kholoda*. 2012. No 1. p. 28–30. (in Russian)
7. Buyanova I. V. Innovative technologies for extension of expiration dates of dairy products. *Molochnaya reka*. 2015. No 1. p. 60–64. (in Russian)
8. Buyanov V. O. Freezing of firm cheeses in the conditions of the adjustable heat sink. *Syrodelle i maslodelie*. 2009. No 4. p. 46–48. (in Russian)
9. Craiver N. G., Zartzky N. E. Viscoelastic behavior of refrigerated and frozen low moisture Mozzarella cheese. *J. Food Science*. 2004. V. 69. No 3. P. 123–128.