

УДК 621.56

РАЗРАБОТКА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ, РАБОТАЮЩЕЙ НА СМЕСИ ХОЛОДИЛЬНЫХ АГЕНТОВ

А.В. Усов*, О.В. Иваненко

ФГБОУ ВО «Кемеровский технологический институт
пищевой промышленности (университет)»,
650056, Россия, г. Кемерово, б-р Строителей, 47

*e-mail: usov-kemtip@rambler.ru

Дата поступления в редакцию: 18.03.2016

Дата принятия в печать: 30.04.2016

При проектировании холодильных установок с отношением давления конденсации к давлению кипения больше восьми рекомендуется применять двухступенчатое сжатие. Это приводит к усложнению схемы холодильной установки, увеличению капитальных и эксплуатационных затрат. Схема одноступенчатой холодильной установки, работающей на смеси холодильных агентов, позволяет получить низкую температуру кипения при высокой температуре конденсации. Для более эффективного способа получения низких температур предлагается модернизировать одноступенчатую холодильную установку. Для обеспечения бесперебойной работы подобран герметичный поршневой компрессор высокой надежности, изменена смесь заправляемых холодильных агентов, расширительная емкость и приборы автоматизации установки. С помощью низкотемпературной установки на смеси холодильных агентов можно достичь температуры в камере в диапазоне $-40...-65$ °С. Данная установка имеет хорошие эксплуатационные показатели: смазочное масло циркулирует в системе, не накапливаясь в приборах охлаждения, а всасываемый в компрессор пар имеет небольшой перегрев. Предложенная холодильная установка одноступенчатого сжатия на смеси холодильных агентов позволяет работать при больших отношениях давления конденсации и давления кипения. В результате можно получить более низкую температуру кипения при одноступенчатом сжатии, что позволяет уменьшить капитальные и эксплуатационные затраты на холодильную установку в целом.

Низкотемпературная установка, смесь холодильных агентов, испаритель, конденсатор, пар, температура

Введение

Низкотемпературные холодильные установки включают в основном пароконденсационные холодильные машины: одноступенчатые, двухступенчатые и каскадные. Диапазоны температур, получаемых с помощью холодильных машин, работающих на различных холодильных агентах и смесях (азеотропных и неазеотропных), различны [1, 2].

При проектировании холодильных установок с отношением давления конденсации к давлению кипения больше восьми рекомендуется применять двухступенчатое сжатие. Это приводит к усложнению схемы холодильной установки, увеличению капитальных и эксплуатационных затрат. При этом существует схема холодильных машин одноступенчатого сжатия, которая решает эту проблему. Схема холодильной установки, работающей на смеси холодильных агентов, позволяет получить низкую температуру кипения при высокой температуре конденсации.

Применение неазеотропных смесей холодильных агентов позволяет повысить термодинамическую эффективность и понизить температурную границу использования одноступенчатых холодильных машин без усложнения схемы до минус 70 °С. В неазеотропных смесях используют в качестве низкотемпературного компонента R13, R13B1, R14, а в качестве высокотемпературного – R11, R12, R22, R114. Чем выше массовая концентрация низкотемпературного компонента и ниже температура конденсации, тем более низкая температура может быть достигнута. Одноступенчатая холо-

дильная установка с традиционным набором элементов на смеси R13/R12 при двухступенчатой конденсации смеси (в конденсаторе, а затем в теплообменнике) позволяет в испарителе получить температуру -63 °С [3].

В России в ближайшее время будут востребованы низкотемпературные камеры с пароконденсационными холодильными машинами на многокомпонентных смесях хладагентов [4]. При разработке и производстве современного холодильного оборудования требуется применение альтернативных озонобезопасных хладагентов [5].

Целью работы является разработка одноступенчатой низкотемпературной холодильной установки, работающей на смеси холодильных агентов, для достижения температуры в камере в диапазоне $-40...-65$ °С.

Объекты и методы исследований

Теоритическая одноступенчатая холодильная установка, работающая на смеси холодильных агентов, состоит из следующих элементов: поршневой компрессорный агрегат; конденсатор с водяным или воздушным охлаждением; линейный ресивер; терморегулирующий вентиль или капиллярная трубка; воздухоохладитель с относительно небольшой длиной трубок; отделитель жидкости; регенеративный теплообменник и расширительный сосуд. На жидкостном трубопроводе устанавливается фильтр-осушитель.

Для более эффективного способа получения низких температур предлагается модернизировать

одноступенчатую холодильную установку, схема которой представлена на рис. 1 [1]. Компрессор 4 нагнетает пары смеси холодильных агентов в конденсатор 5, в котором конденсируется в основном высокотемпературный компонент. Смесь жидкой и паровой фаз выходит из конденсатора и поступает в отделитель жидкости 2, где фазы разделяются. Отделенная жидкость высокотемпературного компонента дросселируется в дроссельном устройстве 1' до давления всасывания, смешивается с потоком паров, поступающих из испарителя 1, и направляется в конденсатор-испаритель 3 для охлаждения и конденсации паровой фазы смеси низкотемпературного компонента, поступающей из отделителя жидкости. Из теплообменника пары всасываются в компрессор. Пары низкотемпературного компонента

та из отделителя жидкости направляются в конденсатор-испаритель 3, где конденсируются. Далее жидкость низкотемпературного компонента дросселируется в дроссельном устройстве 2' и поступает в воздухоохладитель, где кипит и забирает тепло от источника теплоты с низкой температурой.

После испарителя 1 пар низкотемпературного компонента смешивается с высокотемпературным компонентом, идущим от дроссельного устройства 1', и поступает в конденсатор-испаритель 3. В конденсаторе-испарителе 3 смесь перегревается, в ней выкипает высокотемпературный компонент за счет парообразного низкотемпературного компонента, идущего из отделителя жидкости 2. Затем парообразная смесь поступает на всасывание в компрессор 4.

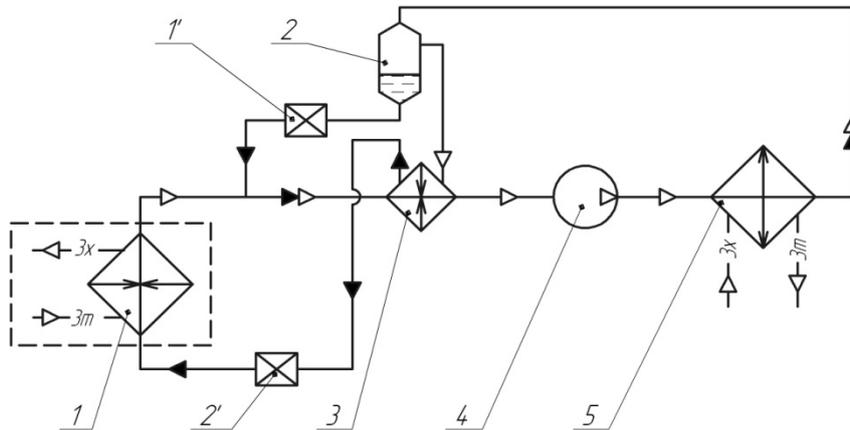


Рис. 1. Схема одноступенчатой холодильной установки на смеси хладагентов:
1 – испаритель; 2 – отделитель жидкости; 3 – конденсатор-испаритель; 4 – компрессор; 5 – конденсатор;
1', 2' – дроссельные устройства

Проверку работоспособности предлагаемой схемы проводили в реальных процессах низкотемпературной обработки. В качестве объекта замораживания выбирался сыр «Радонежский». Из него изготавливали образец в форме цилиндра диаметром 30 мм, длиной 60 мм, масса продукта 28 г.

Холодильная установка выводилась на заданный температурный режим по достижении температуры в камере $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Замеры температуры в камере производились при помощи электронного термометра, установленного в центре камеры. Температурные датчики помещали таким образом, чтобы рабочий спай одной термопары находился в геометрическом центре образца, другой – непосредственно под наружной поверхностью образца, третий – на расстоянии «X» (рис. 2). Для равномерного распределения температур продукт размещался в центре камеры на подставке.

Место размещения термопары на расстоянии «X», мм, вычисляется по формуле [6]:

$$X = l \cdot \Psi^{1/n} = 15 \cdot 0,5^{1/2} = 10,6,$$

где l – половина определяющего размера продукта (для цилиндра $\Psi = 1/2$), мм; Ψ – коэффициент, определяемый формой тела; n – коэффициент, за-

висящий от метода замораживания (при воздушном замораживании $n = 2$).

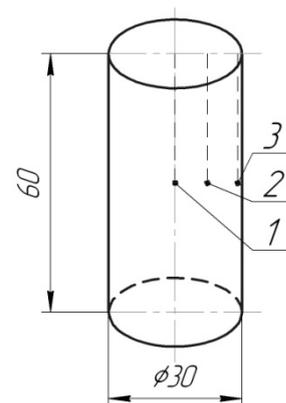


Рис. 2. Размещение температурных датчиков в цилиндре:
1 – термопара в геометрическом центре;
2 – термопара под наружной поверхностью;
3 – термопара на расстоянии «X»

Результаты и их обсуждение

В состав низкотемпературных установок должно входить оборудование, отличающееся от базового материалами и конструкцией некоторых узлов. Данные условия связаны с влиянием низ-

кой температуры на свойства материалов и рабочие процессы холодильных машин. Например, поршневые компрессоры должны иметь небольшое вредное пространство, смазываться маслом, обеспечивающим гидродинамический режим смазки. Материал деталей оборудования и арма-

туры, трубопроводы должны сохранять необходимую прочность и другие нужные свойства при низкой температуре.

На основе схемы (рис. 1) на смеси хладагентов спроектирована и смонтирована низкотемпературная холодильная установка, представленная на рис. 3.

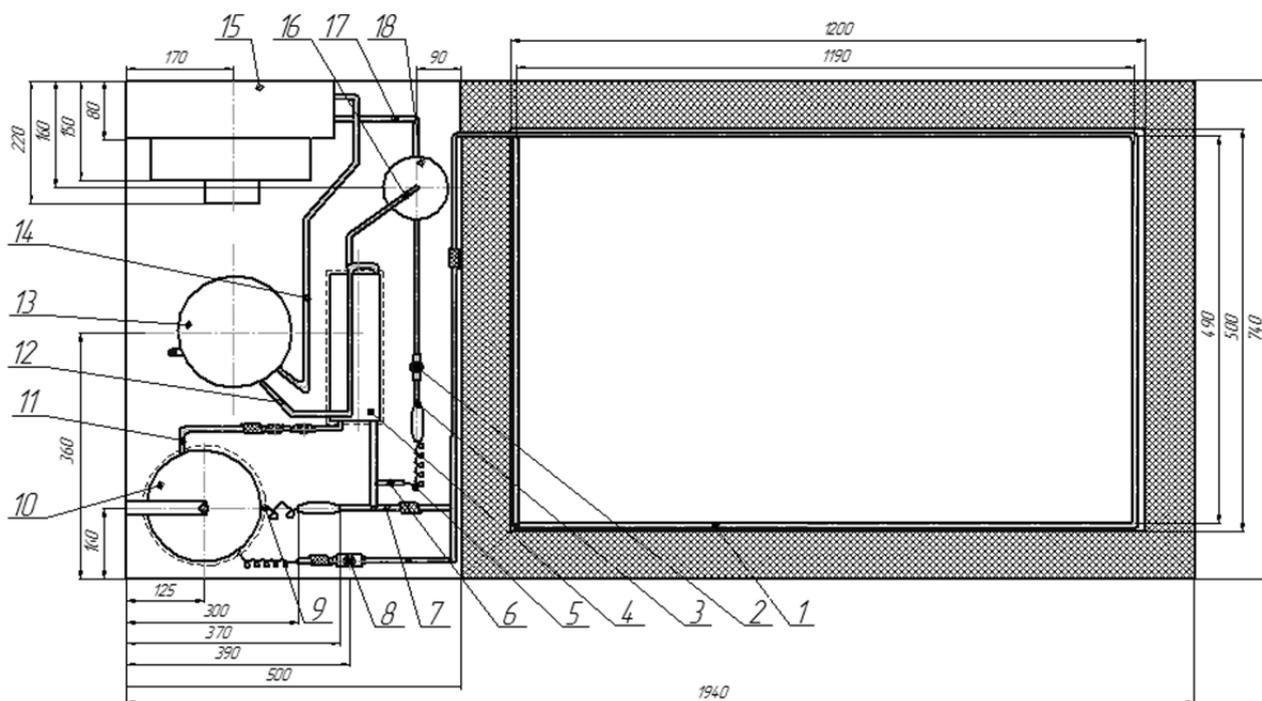


Рис. 3. Чертеж низкотемпературной одноступенчатой холодильной установки на смеси хладагентов:

1 – испаритель; 2 – смотровое окно; 3 – фильтр-осушитель; 4 – конденсатор-испаритель; 5 – капиллярная трубка хладагента R134a и R23; 6 – штуцер шредера; 7 – всасывающий трубопровод R23; 8 – запорная арматура; 9 – капиллярная трубка; 10 – расширительная емкость; 11 – жидкостный трубопровод хладагента R23; 12 – всасывающий трубопровод смеси хладагентов R134a и R23; 13 – поршневой компрессор; 14 – паровой нагнетательный трубопровод смеси хладагентов R134a и R23; 15 – воздушный конденсатор; 16 – паровой трубопровод хладагента R23; 17 – парожидкостный трубопровод смеси хладагентов R134a и R23; 18 – отделитель жидкости

Для обеспечения бесперебойной работы холодильной установки подобран герметичный поршневой компрессор Cubigel GX18TB. Компрессоры серии X обладают высокой надежностью и предназначены для работы в тяжелых низкотемпературных условиях [7]. Изменена смесь заправляемых холодильных агентов, добавлены линейные компоненты, расширительная емкость и приборы автоматизации установки.

Смотровые стекла в установке устанавливаются в жидкостные трубопроводы после отделителя жидкости на линии с газом R134a и после конденсатора-испарителя на трубопроводе с R23. Стекла впаиваются перед фильтром-осушителем и позволяют визуально контролировать состояние течения холодильных агентов. Смотровые стекла Danfoss SGN/H оснащены индикатором влажности, меняющим цвет в зависимости от содержания влаги, содержащейся в хладагенте.

В установке, работающей на смеси двух хладагентов, фильтр-осушитель устанавливается на жидкостных линиях непосредственно перед дросселирующим устройством. Основная функция фильтра-осушителя – это осушение хладагента от воды и очистка от механических загрязнений. Один

фильтр устанавливается после отделителя жидкости (после смотрового стекла), второй фильтр перед капиллярной трубкой с R23, третий фильтр, работающий в обоих направлениях, перед капиллярной трубкой, идущей к расширительной емкости.

Запорные вентили Danfoss типа GBC монтируются на линии движения потока хладагента R23 после регенеративного теплообменника. Один из вентиля монтируется между смотровым стеклом и фильтром-осушителем, другой устанавливается между капиллярной трубкой и испарителем.

Основной функцией установки запорных вентилях на данном участке является отсечение фильтра-осушителя (с целью замены), а также для подбора длины капиллярной трубки и сбора хладагента R23.

В качестве трубопроводов использовали медную трубу диаметрами 8 и 6 мм. На стороне всасывания использовали трубу диаметром 8 мм. На стороне нагнетания используем трубу диаметром 6 мм. Для соединения заправочных шлангов в установленных точках используем штуцеры Шредера и тройники под пайку.

Габаритные размеры холодильной камеры: 1200x500x600 мм, внутренний объем 360 л. Для

испарителя использована труба диаметром 8 мм, длиной 23 м. Объем испарителя составляет 0,29 л.

Измеритель-регулятор микропроцессорный 2ТРМ1 совместно с первичными преобразователями (датчиками) предназначен для измерения и регулирования температуры и других физических параметров, значение которых внешним датчиком может быть преобразовано в сигналы постоянного тока или напряжения.

Холодильная установка оснащена конденсатором воздушного охлаждения. Теплоотдача в нем осуществляется вследствие принудительной подачи большого количества воздуха с помощью осевого или центробежного вентилятора через конденсатор холодильного агрегата. Конденсаторы воздушного охлаждения для малых холодильных установок легко монтируются, недороги в обслуживании, надежно работают при низкой наружной температуре воздуха. Однако для их работы необходимо достаточно большое количество воздуха, при этом работа вентилятора создает шумовой эффект.

Отделитель жидкости в одноступенчатой холодильной установке, работающей на смеси холодильных агентов, предназначен для разделения фаз сконденсированного хладагента R134a и газообразного R23.

Конденсатор-испаритель в данной установке предназначен для конденсации холодильного агента R23 за счет кипения хладагента R134a. При проектировании компоновки холодильной установки было принято решение изготовить конденсатор-испаритель змеевикового типа.

Холодильная установка на смеси холодильных агентов (рис. 3) работает следующим образом.

Из теплообменника пары R134a+R23 всасываются в компрессор. Поршневой компрессор 13 нагнетает пары в конденсатор 15, в котором конденсируется высокотемпературный компонент R134a, а R23 не конденсируется. Смесь жидкой и паровой фаз выходит из конденсатора и попадает в отделитель жидкости 18, где фазы разделяются. Отделенная жидкость R134a дросселируется в

дроссельном устройстве 5 до давления кипения, смешивается с потоком паров R23, поступающих из испарителя 1, и направляется в конденсатор-испаритель 4 для охлаждения и конденсации паровой фазы R23, поступающей из отделителя жидкости. Пары R23 из отделителя жидкости 10 направляются в конденсатор-испаритель 4 и конденсируются в нем. Далее жидкость дросселируется в дроссельном устройстве 5 и поступает в испаритель 1. В испарителе R23 кипит, забирая тепло от источника теплоты с низкой температурой, испаряется и на выходе из испарителя 1 перед конденсатором-испарителем 4 смешивается с R134a. В конденсаторе-испарителе 4 смесь перегревается и поступает на всасывание в компрессор.

Расширительная емкость 10 необходима для защиты холодильной машины от повышения давления при остановке. Во время стоянки холодильной машины давление начинает повышаться и газ высокого давления перетекает в расширительную емкость 10. При запуске компрессора 13 хладагент R23 сначала отсасывается из расширительной емкости 10, а затем из испарителя 1.

Установка имеет хорошие эксплуатационные показатели: смазочное масло циркулирует в системе, не накапливаясь в приборах охлаждения, а всасываемый в компрессор пар имеет небольшой перегрев.

На рис. 4 приведена термограмма вывода холодильной установки на заданный температурный режим в камере $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Из термограммы следует, что на режим установка вышла через два часа после включения, дальнейшее колебание температуры свидетельствует о включении и выключении холодильной машины. Температура в охлаждаемом объеме камеры менялась в диапазоне $-38\text{...}-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ из-за теплопритоков из окружающей среды.

Для апробации работоспособности разработанной установки проводилась серия экспериментальных исследований замораживания сыра. На рис. 5 представлена термограмма процесса замораживания.

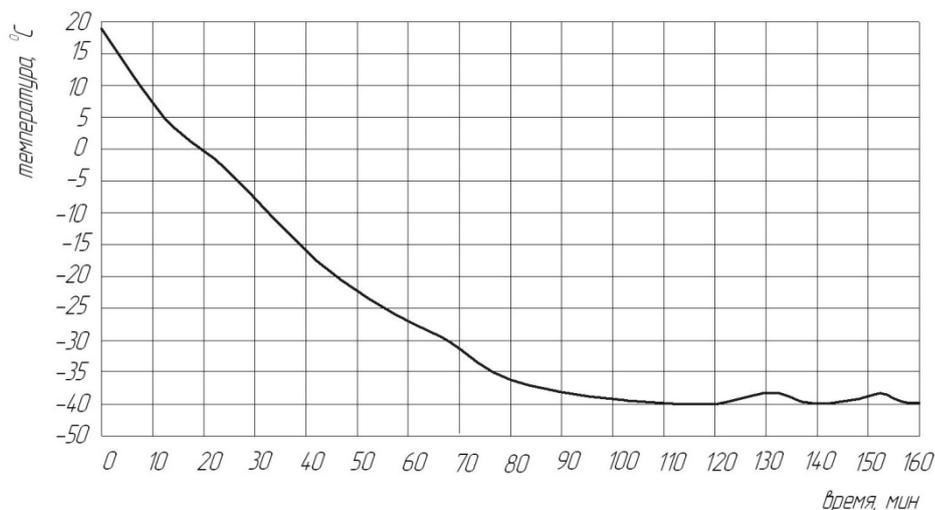


Рис. 4. Термограмма вывода установки на режим

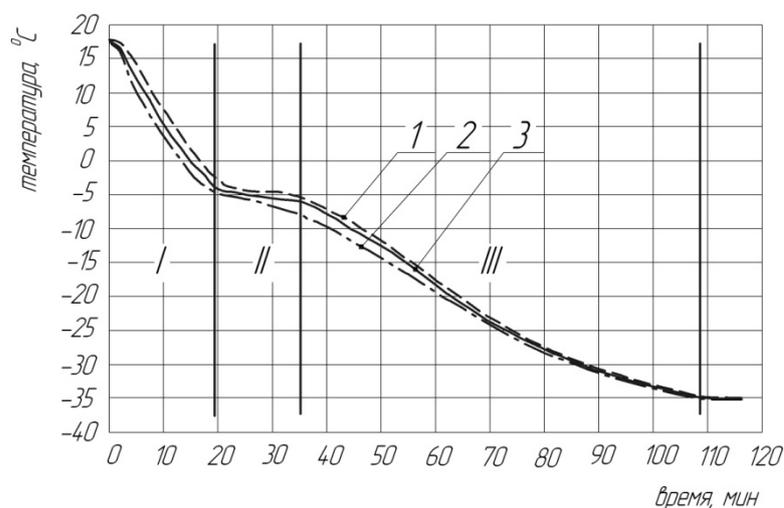


Рис. 5. Термограмма процесса замораживания продукта:
1 – в геометрическом центре; 2 – под наружной поверхностью; 3 – на расстоянии «Х»;
I – зона охлаждения; II – зона кристаллизации; III – зона замораживания

Анализ экспериментальных данных показывает, что в первый период происходит быстрое снижение температуры во всех слоях. Чем ближе слой находился от поверхности, тем скорее в нем понижалась температура. На втором этапе при достижении температуры минус 4,5 °С снижение замедлилось. Третья фаза замораживания выглядит рельефной, особенно в слоях, расположенных ближе поверхности цилиндра. Время замораживания продукта составило 118 минут с начальной температурой продукта 17,8 °С до конечной -35 °С. Температура кристаллизации продукта составила минус 4,5 °С. На 110 минуте при температуре сыра минус 35 °С процесс заморозки продукта остановился. Расчетная скорость замораживания сыра составила 21 мм/ч.

С помощью одноступенчатой холодильной установки на смеси холодильных агентов можно

достичь температуры в камере в диапазоне -40...-65 °С. Такие установки применяют для длительного хранения и замораживания медикаментов и биологических объектов; проведения исследований по заморозке пищевых продуктов; изучения термодинамических свойств теплоизоляционных и строительных материалов; испытания изделий электротехнической, машиностроительной промышленности.

Таким образом, предложенная холодильная установка одноступенчатого сжатия на смеси холодильных агентов позволяет работать при больших отношениях давления конденсации и давления кипения. В результате можно получить более низкую температуру кипения при одноступенчатом сжатии, что позволяет уменьшить капитальные и эксплуатационные затраты на холодильную установку в целом.

Список литературы

1. Курылев, Е.С. Холодильные установки / Е.С. Курылев, В.В. Оносовский, Ю.Д. Румянцев. – СПб.: Политехника, 2004. – 576 с.
2. Ultralow-temperature refrigeration [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.mandtsystems.com/documents/ASHRAE_R02_39SI.pdf (Дата обращения 20 февраля 2016).
3. Курылев, Е.С. Низкотемпературные холодильные установки испытательных камер. Ч. 2 / Е.С. Курылев, Ю.Д. Румянцев // Интернет-газета Холодильщик.ru. – 2008. – № 2 (38) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.holodilshchik.ru/index_holodilshchik_issue_2_2008_Test_cameras.htm (Дата обращения 15 марта 2016).
4. Кротов, А.С. Исследование динамических характеристик пароконденсационных холодильных машин на многокомпонентных смесях хладагентов: дис. ... канд. техн. наук: 05.04.03. – М., 2011. – 178 с.
5. Бабакин, Б.С. Альтернативные хладагенты и сервис холодильных систем на их основе / Б.С. Бабакин, В.И. Стефанчук, Е.Е. Ковтунов. – М.: Колос, 2000. – 160 с.: ил.
6. Усов, А.В. Определение скорости замораживания некоторых видов натуральных сыров / А.В. Усов, И.А. Короткий // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2003. – № 1. – С. 11–12.
7. Короткий, И.А. Машины низкотемпературной техники. Ч. I / Кемеровский технологический институт пищевой промышленности. – Кемерово, 2004. – 127 с.

DEVELOPMENT OF LOW-TEMPERATURE REFRIGERATION UNIT OPERATING ON MIXTURE OF REFRIGERANTS

A.V. Usov*, O.V. Ivanenko

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

* e-mail: usov-kemtipp@rambler.ru

Received: 18.03.2016

Accepted: 30.04.2016

When designing refrigeration units with condensing pressure relative to the boiling pressure for more than eight, it is recommended to use a two-stage compression. This complicates the refrigeration unit circuit, increases capital and operating costs. The one-stage refrigeration unit circuit operating on a mixture of refrigerants allows obtaining low boiling point at high temperature condensation. For a more effective method of obtaining low temperatures, it is proposed to upgrade the one-stage refrigeration system. To ensure trouble-free operation hermetic reciprocating compressor of high reliability is chosen, mixture of refrigerants to be fueled, expansion tank and unit automation devices are changed. By means of low-temperature unit, operating on mixture of refrigerants it is possible to reach temperature in a chamber in the range of -40...-65°C. This unit has good performance: the lubricating oil is circulated in the system without accumulating in the cooling devices, and vapor sucked into the compressor has small overheat. The proposed one-stage compression refrigeration unit operating on mixture of refrigerants allows operating at high rates of condensing and evaporating pressure. The result is a lower boiling point in a one-stage compression, thereby reducing the capital and operating costs of the refrigeration unit as a whole.

Low-temperature unit, mixture of refrigerants, evaporator, condenser, steam, temperature

References

1. Kurylev V.S., Onosovskiy V.V., Rummyantsev Yu.D. *Kholodil'nye ustanovki* [Refrigeration units]. St. Petersburg, Politehnika Publ., 2004. 576 p.
2. *Ultralow-temperature refrigeration*. Available at: www.mandtsystems.com/documents/ASHRAE_R02_39SI.pdf. (accessed 20 February 2016).
3. Kurylev E.S., Rummyantsev Yu.D. Nizkotemperaturnye kholodil'nye ustanovki ispytatel'nykh kamer. Chast' 2 [Low-temperature refrigeration units of test chambers. Part 2]. *Internet-gazeta Kholodil'shchik.ru* [Online newspaper Holodilshchik.ru], 2008, no. 2 (38). Available at: http://www.holodilshchik.ru/index_holodilshchik_issue_2_2008_Test_cameras.htm. (accessed 15 March 2016).
4. Krotov A.S. *Issledovanie dinamicheskikh kharakteristik parokompressionnykh kholodil'nykh mashin na mnogokomponentnykh smesyakh khladagentov. Diss. kand. tekhn. nauk* [Research of dynamic characteristics of vapor-compression refrigerators on multicomponent mixes coolants. Cand. eng. sci. diss.]. Moscow, 2011. 178 p.
5. Babakin B.S., Stefanchuk V.I., Kovtunov E.E. *Al'ternativnye khladagenty i servis kholodil'nykh sistem na ikh osnove* [Alternative coolants and service of refrigerating systems on their basis]. Moscow, Kolos Publ., 2000. 160 p.
6. Usov A.V., Korotkiy I.A. *Opreделение skorosti zamorazhivaniya nekotorykh vidov natural'nykh syrov* Determination of speed of freezing of some types of natural cheeses]. *Khranenie i pererabotka sel'khozsyrya* [Storage and processing of farm products], 2003, no. 1, pp. 11–12.
7. Korotkiy I.A. *Mashiny nizkotemperaturnoy tekhniki. Chast' I* [Machines of low-temperature equipment. Part I]. Kemerovo, KemIFST Publ., 2004. 127 p.

Дополнительная информация / Additional Information

Усов, А.В. Разработка низкотемпературной холодильной установки, работающей на смеси холодильных агентов / А.В. Усов, О.В. Иваненко // Техника и технология пищевых производств. – 2016. – Т. 41. – № 2. – С. 113–118.

Usov A.V., Ivanenko O.V. Development of low-temperature refrigeration unit operating on mixture of refrigerants. *Food Processing: Techniques and Technology*, 2016, vol. 41, no. 2, pp. 113–118 (in Russ.).

Усов Андрей Васильевич

канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой теплохладотехники, ФГБОУ ВО «Кемеровский технологический институт пищевой промышленности (университет)», 650056, Россия, г. Кемерово, б-р Строителей, 47, тел.: +7 (3842) 39-68-50, e-mail: usov-kemtipp@rambler.ru

Иваненко Олег Васильевич

канд. техн. наук, доцент кафедры теплохладотехники, ФГБОУ ВО «Кемеровский технологический институт пищевой промышленности (университет)», 650056, Россия, г. Кемерово, б-р Строителей, 47, тел.: +7 (3842) 39-68-50, e-mail: ivanenkooleg@mail.ru

Andrey V. Usov

Cand.Sci.(Eng.), Associate Professor, Head of the Department of HVAC, Kemerovo Institute of Food Science and Technology (University), 47, Boulevard Stroiteley, Kemerovo, 650056, Russia, phone: +7 (3842) 39-68-50, e-mail: usov-kemtipp@rambler.ru

Oleg V. Ivanenko

Cand.Sci.(Eng.), Associate Professor of the Department of HVAC, Kemerovo Institute of Food Science and Technology (University), 47, Boulevard Stroiteley, Kemerovo, 650056, Russia, phone: +7 (3842) 39-68-50, e-mail: ivanenkooleg@mail.ru