

DOI: <https://doi.org/10.17816/RF635873>

Холодильная установка на R744 для небольших супермаркетов

Simarpreet Singh¹, Ángel Álvarez Pardiñas², Armin Hafner¹,
Christian Schlemminger², Krzysztof Banasiak¹

¹ Norwegian University of Science and Technology, Тронхейм, Норвегия;

² SINTEF Energy Research, Тронхейм, Норвегия

АННОТАЦИЯ

В настоящее время для достижения максимальной производительности системы охлаждения предпочтение отдается прикладным технологическим решениям. Таким образом, сравнительный анализ является важным критерием, который добавляет ценность для оптимального проектирования систем для различных областей применения. В данном исследовании был рассмотрен пример небольшого супермаркета «Молочный бар», для того чтобы оценить потенциал системы охлаждения на основе R744 при аналогичных потребностях в охлаждении и тропических условиях. Данные, собранные в полевых условиях в конкретной временной и температурной зоне, используются для расчета годовой производительности встраиваемых охлаждаемых витрин с ГФУ для применения в областях средних и низких температур. Полученные данные используются для разработки централизованной бустерной системы R744, которая будет покрывать аналогичную нагрузку и потребности в охлаждении всех охлаждаемых витрин в магазине. Исходя из нагрузки на охлаждение для установки с ГФУ, рассчитывается годовая производительность бустерной системы R774 и сравнивается с существующим решением. Годовое потребление электроэнергии для централизованной холодильной системы R744 составляет 3,3 МВт-ч, что на 24% ниже, чем при использовании существующего решения на основе ГФУ. Кроме того, рассматриваются экономические перспективы R744, альтернативные материалы для компонентов и конструкция централизованного блока, которые могут повысить надежность системы и стать эффективной заменой ГФУ технологии для небольших супермаркетов.

Настоящая статья представляет собой перевод статьи Singh S, Pardiñas ÁÁ, Hafner A, Schlemminger C, Banasiak K. R744 Refrigeration Solution for Small Supermarkets. In: Proceedings of the 9th IIR Conference on the Ammonia and CO₂ Refrigeration Technologies. Ohrid: IIF/IIR, 2021.

DOI: 10.18462/iir.nh3-co2.2021.0030

Публикуется с разрешения правообладателя.

Ключевые слова: двухфазный эжектор; R744; супермаркет.

Как цитировать:

Singh S, Pardiñas ÁÁ, Hafner A, Schlemminger C, Banasiak K. Холодильная установка на R744 для небольших супермаркетов // Холодильная техника. 2024. Т. 113, № 1. С. 31–40. DOI: <https://doi.org/10.17816/RF635873>

DOI: <https://doi.org/10.17816/RF635873>

R744 Refrigeration Solution for Small Supermarkets

Simarpreet Singh¹, Ángel Álvarez Pardiñas², Armin Hafner¹,
Christian Schlemminger², Krzysztof Banasiak¹

¹ Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway;

² SINTEF Energy Research, Trondheim, Norway

ABSTRACT

Application based technology solution is nowadays preferred to achieve the performance of the cooling system configuration at its best. Therefore, benchmarking is an essential criterion which would add value to the optimum system design for various applications. In this study, a case study is carried out for a Milk Bar (small supermarket) to evaluate the potential of R744 cooling system for the similar cooling demand and tropical conditions. Field data collected during a particular time and temperature zone is further used to develop a yearly round performance of the HFC plug-in cabinets for MT and LT applications. The data is further used to develop a centralized R744 booster system that would meet the similar cooling load and demand of all the cabinets in the shop. Based on the cooling loads for the HFC unit, the yearly performance of the R774 booster system is calculated and compared to the existing plug-in solution. It is observed that the yearly electric energy consumption for the R744 centralized refrigeration system is 3.3 M W·h, 24% lower than with the existing solution based on HFCs. Moreover, the economic prospective of the R744 is further discussed to alternative material for the components and centralized unit structure which could empower the system with more reliability and an effective substitute to the synthetic technology for smaller supermarkets.

This article is a translation of the article by Singh S, Pardiñas ÁÁ, Hafner A, Schlemminger C, Banasiak K.

R744 Refrigeration Solution for Small Supermarkets. In: Proceedings of the 9th IIR Conference on the Ammonia and CO₂ Refrigeration Technologies. Ohrid: IIF/IIR, 2021.

DOI: 10.18462/iir.nh3-co2.2021.0030

Published with the permission of the copyright holder.

Keywords: Two-phase ejector; R744; Supermarket.

To cite this article:

Singh S, Pardiñas ÁÁ, Hafner A, Schlemminger C, Banasiak K. R744 Refrigeration Solution for Small Supermarkets. *Refrigeration Technology*. 2024;113(1):31–40. DOI: <https://doi.org/10.17816/RF635873>

Received: 09.09.2024

Accepted: 09.09.2024

Published online: 05.10.2024

1. ВВЕДЕНИЕ

Экологичные решения для охлаждения и отопления на основе R744 набирают популярность во всем мире, с тем чтобы сократить выбросы парниковых газов в секторе отопления, вентиляции, кондиционирования воздуха и охлаждения [1]. Сектор отопления, вентиляции, кондиционирования воздуха и охлаждения активно развивается и все больше расширяет свое распространение, отвечая на растущий спрос, в основном в тропических регионах [2]. В связи с проблемой глобального потепления энергосберегающее экологичное решение на основе R744 рассматривается как жизненно важное и имеет высокий коммерческий потенциал, хотя и сильно зависит от стоимости системы, цены на электроэнергию и условий окружающей среды. На рынке холодильного оборудования решения на основе R744 пользуются большим спросом, поскольку они поддерживают режимы как средних, так и низких температур, что очень важно в секторе супермаркетов. В развивающихся странах, например, в Индии, основной вклад вносят, прежде всего, супермаркеты, причем в большинстве случаев речь идет об установках малой производительности [3]. Для того чтобы стратегически увеличить проникновение экологически чистых технологий, текущая тенденция должна измениться в сторону систем для более распространенных малых супермаркетов [4]. Однако, главная проблема, связанная с экологичной технологией R744 для малых супермаркетов, заключается в том, что большую долю рынка в настоящее время занимают синтетические хладагенты [5]. В последнее время из-за законодательных ограничений наблюдается тенденция к замене синтетических хладагентов более экологичными решениями. Тем не менее, традиционные системы имеют низкую первоначальную стоимость инвестиций, что делает их более привлекательным вариантом для внедрения. Кроме того, в условиях повышенной температуры окружающей среды традиционная бустерная система на основе R744 демонстрирует более низкие показатели энергоэффективности по сравнению с хорошо обслуживаемыми традиционными системами на основе ГФУ.

С другой стороны, разработка системы малой производительности на основе R744 является сложной задачей, учитывающей имеющиеся на рынке компоненты системы. Поэтому для продвижения энергетически эффективного и экологичного R744 в развивающихся странах в качестве основного мотива следует рассматривать общую эффективность и первоначальную стоимость установки, которая может быть предложена при традиционной конструкции системы. Кроме того, дополнительным преимуществом является возможность рекуперации теплоты на стороне высокого давления в системе R744. Настоящее исследование посвящено реальной установке в магазине «Молочный бар», в котором для хранения охлажденных и замороженных молочных продуктов используются витрины на базе ГФУ. Экспериментально оценивались расход

электроэнергии, температура кипения и конденсации, а также холодильная нагрузка одной из морозильных и одной из холодильных витрин при нормальном режиме работы «Молочного бара». Полученные результаты были использованы для разработки достоверного подхода к моделированию для прогнозирования годовой потребности в охлаждении и потреблении электроэнергии в «Молочном баре». Далее на основании проведенного анализа была разработана модель небольшой централизованной бустерной системы на базе R744 (конденсаторный блок), которая будет рассчитана на аналогичную нагрузку и покрывать потребность в охлаждении всех витрин в магазине. Исходя из нагрузки на охлаждение для установки с ГФУ, рассчитывается годовая производительность бустерной системы на базе R774 и сравнивается с существующим решением.

2. МАЛЫЙ СУПЕРМАРКЕТ ПО ПРОДАЖЕ МОЛОЧНЫХ ПРОДУКТОВ ("МОЛОЧНЫЙ БАР"): СИТУАЦИОННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Молочный завод Verka был основан в 1963 году в городе Амритсар на севере Индии. Магазин готовой продукции «Молочный бар» при заводе представляет собой интегрированную систему, поддерживает и выполняет требования по охлаждению и замораживанию хранящихся продуктов. На рис. 1 показана планировка магазина «Молочный бар» (вид сверху). Магазин выполнен в форме восьмиугольника и оборудован семью среднетемпературными (MT) и двумя низкотемпературными (LT) холодильными витринами Visi, поддерживающими температуру 6 °C и -18 °C, соответственно. В связи с ограниченной потребностью в кондиционировании воздуха внутри помещения установлена сплит-система производительностью 7 кВт. В табл. 1 приведены подробные сведения о витринах и кондиционерах в «Молочном баре».

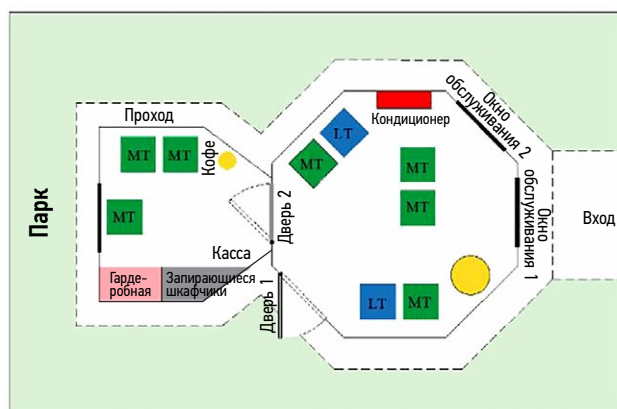


Рис. 1. Планировка магазина «Молочный бар» (вид сверху).
Fig. 1. Internal structure of the milk bar (top view).

3. АНАЛИЗ ПОЛЕВЫХ ДАННЫХ МАЛОГО СУПЕРМАРКЕТА В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

В текущем разделе описывается методология измерений и сбора данных в супермаркете. Для получения общей производительности витрин МТ и LT в типичный зимний день измеряются и анализируются различные рабочие параметры, в частности температура (окружающей среды, на выходе конденсатора, на входе испарителя, в витрине), влажность (окружающей среды, витрины) и потребляемая мощность витрин МТ и LT. Подробная информация об используемых измерительных датчиках и их расположении в витринах МТ и LT приведена в табл. 2. Во время работы в течение шести часов велась постоянная ручная регистрация данных с интервалом в три минуты. Параметрические измерения проводятся в течение обычного рабочего дня при постоянном открывании и закрывании дверей витрины в магазине. При проведении эксперимента для оценки максимальной производительности витрин в рамках проведения сравнительного исследования

учитывается переменный профиль нагрузки из-за проникновения воздуха и изменение нагрузки охлаждения из-за открытия и закрытия двери витрины.

На рис. 2 показано изменение рабочих параметров витрин МТ и LT относительно холодный январский день с температурой окружающей среды около 17 °С и 15 °С соответственно. Как видно, при постоянном открывании и закрывании дверей витрин МТ и LT в дневное время витрины способны поддерживать температуру воздуха в них, т.е. 6 °С и -18 °С для МТ и LT, соответственно. Колебания влажности воздуха внутри шкафа составляли от 50 до 95% в течение всего периода работы. Причиной этого является проникновение воздуха при постоянном открывании дверцы. Во время работы системы постоянно регистрируется включение/выключение компрессора в зависимости от температуры испарителя и витрины. Базовая нагрузка (при выключенном компрессоре) витрин МТ и LT составляет ~40 Вт и ~180 Вт соответственно, что обусловлено наличием основных электрических компонентов, установленных в обеих витринах. Базовая нагрузка сравнительно высока в случае витрины LT из-за

Таблица 1. Сведения о витринах и кондиционерах, установленных в «Молочном баре»

Table 1. Details of the cabinets and air conditioning in the milk bar

Данные	Витрина	Единицы измерения	Значение/диапазон
Температура охладителя Visi	МТ	°С	8
	LT	°С	-19
Сплит-система	кондиционер	°С	от 16 до 26
		—	SRC 700
Модель	LT	—	SRF 500
	Кондиционер	—	Voltas CZZ 243
Холодопроизводительность	МТ	Литр/Тонна/кВт	570/0.68/2.24
	LT	Литр/Тонна/кВт	465/0.45/1.48
	Кондиционер	Тонна/кВт	2/7
Количество	Кондиционер	—	7
		—	1
Хладагент	МТ	—	R134a
	LT	—	R404A
	Кондиционер	—	R32



AC



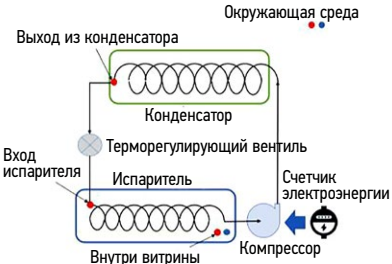
МТ

LT

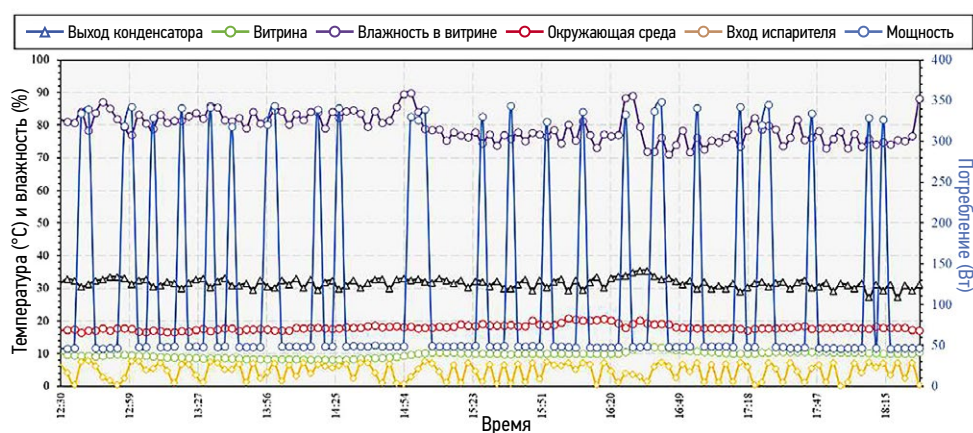
Таблица 2. Используемые измерительные датчики и их расположение в витринах МТ и LT

Table 2. Measuring sensors used and their locations in the MT and LT cabinets

		Диапазон	Точность (% от измеренного значения)
Температура	Thermocare PT	от -50 °С до 70 °С	±0.5
Влажность	HTC-RH	От 0 до 100% относительной влажности	±2%
Счетчик электроэнергии	HTC PM-03	0,2–1 Вт / 1–5 Вт / 5–2200 Вт	<10 / 5 / 1



Витрина средней температуры



Витрина низкой температуры

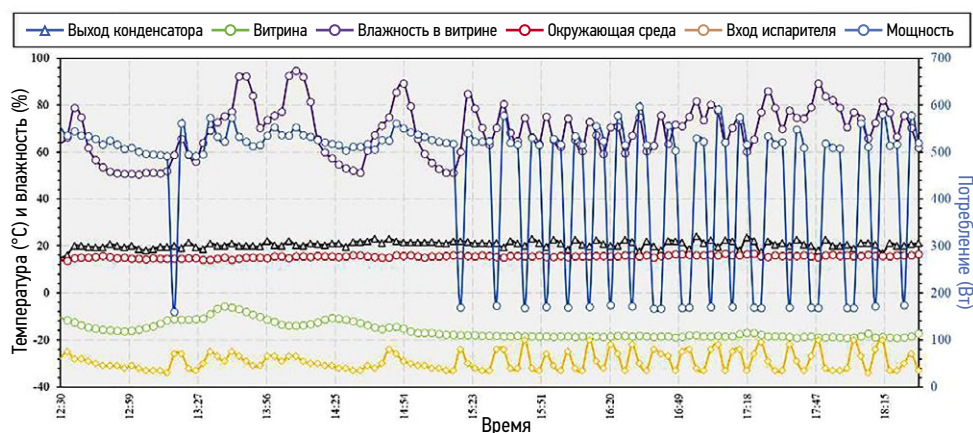


Рис. 2. Изменение рабочих параметров витрин MT и LT.

Fig. 2. Variation of the operating parameters of the MT and LT cabinet.

дополнительного нагревателя, установленного в стеклянной двери витрины LT (внутри кожуха), чтобы защитить ее от образования инея.

3.1. Оценка годовой работы

В этом разделе описывается методология, использованная для использования полевых измерений для витрин MT и LT и расчета годового потребления электроэнергии существующими витринами на основе ГФУ.

На основании полевых измерений, описанных в предыдущем разделе, можно сделать вывод, что потребление электроэнергии витринами MT и LT постоянно в течение всех дней проведения экспериментов, с незначительными различиями между ночным и дневным периодами. Потребление электроэнергии составило 127 Вт·ч и 468 Вт·ч для витрин MT и LT, соответственно. Учитывая базовое потребление электроэнергии, упомянутое выше, были получены данные о потреблении электроэнергии компрессором, установленным в каждой витрине. Для подтверждения потребляемой мощности, измеренной при работающем компрессоре (после вычета мощности, потребляемой вспомогательным оборудованием), и оценки нагрузки на охлаждение витрины при данных условиях эксплуатации использовались технические паспорта и спецификации компрессоров MT и LT, предоставленные

производителем (MT: THK9417YJE производства Tecumseh и LT: NEK2150GK производства Embraco). Нагрузка на охлаждение и замораживание составляла примерно 265 Вт·ч и 484 Вт·ч, соответственно, в дни проведения полевых измерений, когда температура на улице была относительно низкой, а температура воздуха в магазине/супермаркете стабильно составляла 17 °C (измерения в витрине MT) и 15 °C (измерения в витрине LT).

Холодильная нагрузка в витринах зависит от условий в магазине. В связи с ограниченной доступностью натуральных измерений, для определения этих холодильных нагрузок при различных температурах воздуха в магазине, которые, кроме того, являются источником теплоотдачи конденсатора каждой отдельной витрины, был использован вычислительный инструмент с открытым исходным кодом CoolPack (версия 1.50 www.ipu.dk), модуль «Cooling demand equals to Refrigerated display cabinets» («Уравнение потребности в охлаждении для холодильных витрин»). Определение параметров для вычислительного инструмента и результирующая потребность в охлаждении при различных температурах воздуха показаны на рис. 3. Потребность в охлаждении витрины MT увеличится с 191 Вт до 1,386 кВт, если температура окружающего воздуха (в магазине) изменится с 15 °C до 40 °C. То же самое произойдет и с витриной LT — с 485 Вт

Название	Значение	Описание
MT Витрина	M.06.02	С помещением, без электрического размораживания
Длина, м	0,54	Глубина
Площадь витрины, м ²	1,04	Высота / ширина дверцы
Нагрузка испарителя, кВт	0,45	Для справки
Климатическое исполнение	2	
Класс температуры	N	+10 °C +1 °C
Температура испарителя, °C	6	
Температура витрины, °C	10	
Температура окружающей среды, °C	15–35	
LT Витрина	M.11.021	С электрическим размораживанием
Длина, м	0,58	
Площадь витрины, м ²	0,901	
Нагрузка испарителя, кВт	0,645	Для справки
Климатическое исполнение	2	
Класс температуры	L1	-15 °C -18 °C
Температура испарителя, °C	-30	
Температура витрины, °C	-16	
Температура окружающей среды, °C	15–35	

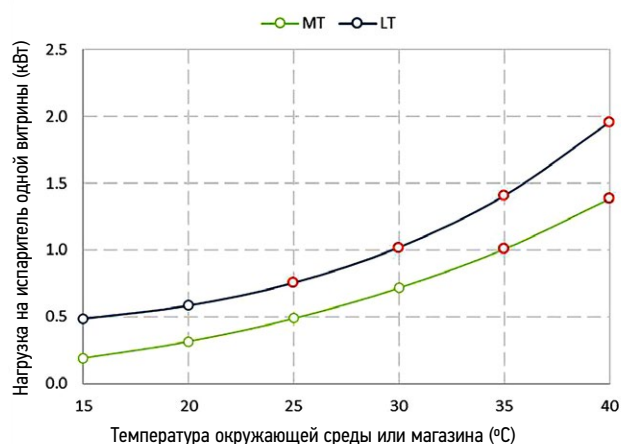


Рис. 3. Слева – параметры для определения потребности в охлаждении в CoolPack. Справа – потребности в охлаждении для каждой витрины MT и LT при различных температурах окружающего воздуха.

Fig. 3. Left, parameters for the definition of the cooling demands in CoolPack. Right, cooling demands for each MT and LT display cabinets under different air temperatures in the surroundings.

до 1,956 кВт. Однако, холодильные системы и компрессоры, установленные в каждой витрине, не будут обладать достаточной холодопроизводительностью, чтобы удовлетворить потребность в них при любых условиях. Пометки красным цветом соответствуют условиям работы, при которых компрессора будет недостаточно, т.е. магазинам требуется кондиционирование воздуха для поддержания потребности в охлаждении витрин и сохранения качества продукции. В данном исследовании считалось, что температура воздуха в магазине должна составлять от 15 °C до 20 °C, при этом в холодных условиях окружающей среды необходимо использовать отопление, а в более теплых — кондиционирование. Таким образом, холодильная нагрузка ограничена температурным диапазоном от 15°C до 20°C.

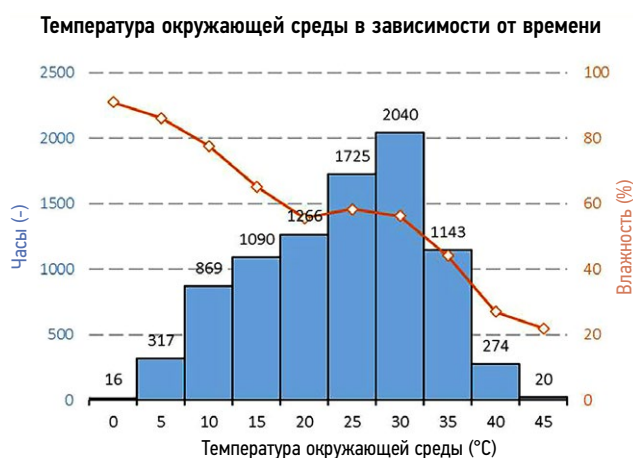


Рис. 4. Температурные интервалы и средняя относительная влажность для каждого температурного интервала в месте проведения исследования

Fig. 4. Temperature bins and average relative humidity for each temperature bin in the location of the case study.

Температура и относительная влажность окружающей среды в течение года для места проведения исследования (Амритсар) были сгруппированы в температурные интервалы (5 K) и для каждого температурного интервала была определена средняя влажность, как показано на рис. 4. Эта информация была использована в анализе температурных интервалов для оценки годового потребления энергии холодильной системой в данном исследовании, а результаты представлены в другом разделе.

В качестве альтернативы существующему решению в настоящем исследовании был теоретически разработан централизованный недорогой компрессорно-конденсаторный агрегат малой производительности на базе R744 для холодоснабжения испарителей витрин в супермаркете, как показано на рис. 5. В его основе лежит параллельная компрессорная схема с бустером, включающая компрессор LT для морозильных витрин, компрессор MT для холодильных витрин, охладитель газа для отвода теплоты на улицу (а не в цех, как в существующем решении), клапан высокого давления (HPV) для регулировки уровня высокого давления в зависимости от условий эксплуатации и жидкостный ресивер, подключенный к испарителям через жидкостную линию и к параллельному компрессору или байпасному клапану дроссельного газа (FGBV) через газовый патрубок.

Расчет размеров компрессоров был выполнен в соответствии с холодильными нагрузками (MT и LT), определенными в предыдущем разделе, и в предположении, что все витрины MT (7 единиц) и LT (2 единицы) идентичны, т.е. расчетная нагрузка для централизованной установки R744 была равна 2,21 кВт на уровне MT (температура кипения 0 °C для дополнительной безопасности по сравнению с 6 °C в отдельных системах на базе ФУ) и 1,17 кВт на уровне LT (температура кипения -30 °C). Температура окружающей среды, учитываемая при проектировании,

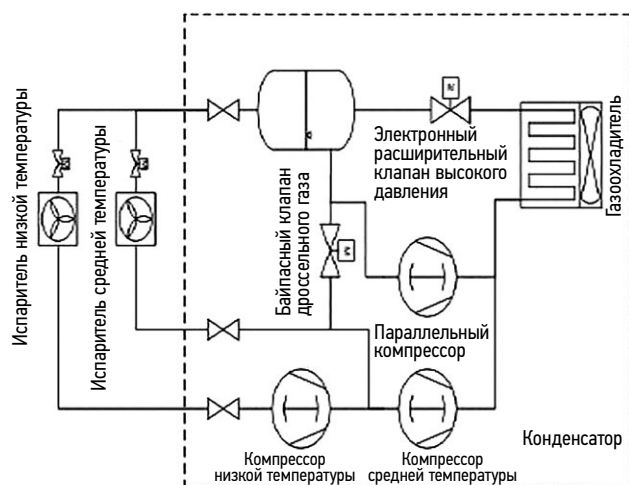


Рис. 5. Упрощенный эскиз конденсаторного агрегата R744 для исследования.

Fig. 5. Simplified sketch of R744 condensing unit for the case study.

составляла 40 °C, что представляется достаточным значением для большинства регионов мира. Напомним, что в отличие от существующих установок в централизованном решении на базе R744 теплота отводится за пределы помещения. Учитывая также, что целью данного исследования была «конкуренция» с недорогими витринами на основе ГФУ, следует выбрать самые недорогие компрессоры для R744, представленные на рынке. Как правило, это ротационные компрессоры, а не более дорогие — поршневые. В данном конкретном случае были выбраны три одинаковых агрегата производства Toshiba, модель DY30N1F-10F (3 куб. см), с одноступенчатым сжатием и оснащенные инвертором для оптимального регулирования производительности (25–100 Гц).

Представленный компрессорно-конденсаторный агрегат для R744 был детально смоделирован с использованием языка объектно-ориентированного программирования Modelica в среде Dymola 2021 (компания Dassault Systems, Велле-Виллакубле, Франция). Разработанные модели построены на основе библиотеки TIL 3.9, а параметры R744 и влажного воздуха реализованы в библиотеке TILMedia 3.9, обе от компании TLK-Thermo GmbH (Брауншвейг, Германия). Влияние масла и системы контроля масла не учитывалось. Даже несмотря на то, что модели могут быть динамическими, результаты, представленные в следующем разделе, соответствуют устойчивому состоянию, достигнутому для каждого рабочего состояния. Ниже перечислены некоторые из основных положений модели:

- Компрессоры (массовый расход и потребляемая мощность) моделируются на основе данных производителя для более крупного компрессора (10 куб. см), умноженных на коэффициент, учитывающий соотношение рабочих объемов.
- Газоохладитель, выполненный в виде теплообменника между хладагентом и воздухом, с регулировкой

расхода воздуха, обеспечивающей разницу температур на выходе из газоохладителя в 2 К, например, от температуры воздуха 40 °C до температуры CO₂ 42 °C. Минимальная температура на выходе из газоохладителя составляет 10 °C.

- Клапан высокого давления (HPV) смоделирован как отверстие с контролируемым раскрытием для регулирования высокого давления в зависимости от температуры на выходе из газоохладителя, в соответствии с соотношением давление–температура, аналогичным представленному в программном обеспечении «Simple CO₂ one stage plan» (версия 2.40) (www.ipu.dk), с нижним и верхним пределами в 55 бар (рабочая зона компрессора) и 105 бар (предельная температура нагнетания), соответственно.
- Для простоты расчетов витрины MT и LT были смоделированы как один испаритель на каждый температурный уровень с соответствующим расширительным клапаном, регулирующим поток хладагента для поддержания перегрева 8 К на выходе.
- Ресивер для жидкости с идеальным разделением жидкой и паровой фаз. Давление регулируется в пределах 48 бар и 43 бар с помощью параллельного компрессора при температуре окружающей среды 30 °C или выше, и клапана FGBV при более низких температурах.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 6 представлены основные выводы этого исследования. Во-первых, график слева, на котором представлены холодильные нагрузки (MT и LT) в зависимости от температурного интервала (за пределами помещения). Поскольку температура в магазине должна контролироваться, как описано выше, чтобы поддерживать температуру внутри витрин, нагрузки не меняются так сильно, как это было бы в неконтролируемой среде. На рис. 6 слева также представлен коэффициент энергоэффективности (EER) различных холодильных систем, т.е. холодильных систем MT, LT и кондиционирования на основе ГФУ и компрессорно-конденсаторного агрегата R744, в зависимости от температурного интервала. Эффективность централизованной установки R744, включающей в себя системы охлаждения LT и MT, особенно высока при низких температурах окружающей среды. Эффективность холодильных систем на основе ГФУ не так сильно зависит от температуры окружающей среды, поскольку их конденсатор обменивается теплотой с контролируемой атмосферой в магазине. С другой стороны, в этом случае необходима установка системы кондиционирования воздуха для отвода теплоты из магазина, её отсутствие привело бы к повышению температуры внутри магазина и нагрузки на холодильную установку. В рассматриваемой в данной статье исследовании установлен кондиционер, описанный в табл. 1, в котором используется хладагент ГФУ (R32).

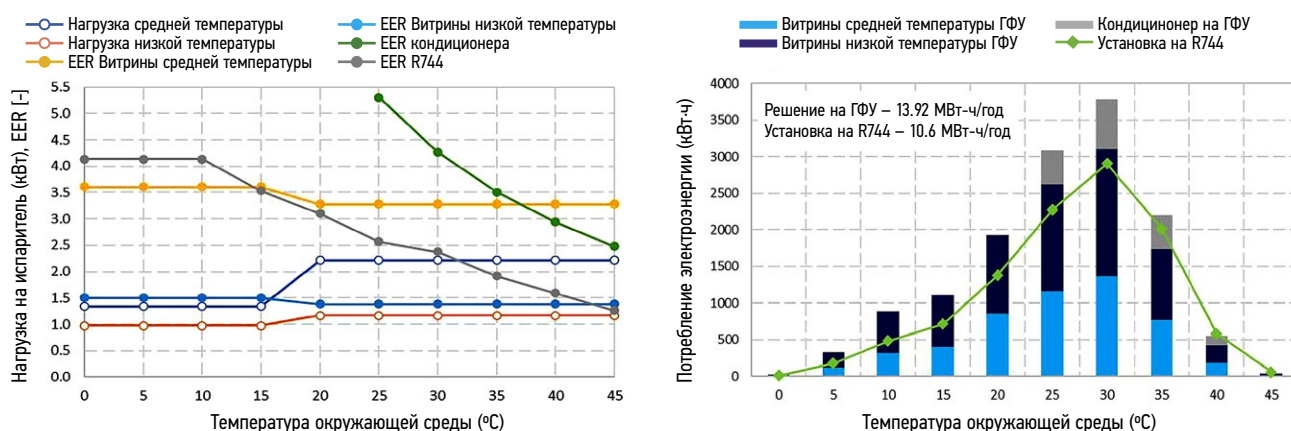


Рис. 6. Слева — общая холодильная нагрузка (MT и LT) и EER различных систем (на основе ГФУ и конденсаторной установки R744) при различных температурах окружающей среды. Справа — расход электроэнергии на температурный интервал (окружающей среды) и в зависимости от системы (конденсатор на основе ГФУ в сравнении с R744).

Fig. 6. Left, total refrigeration loads (MT and LT) and EER of the different systems (HFC-based vs. R744 condensing unit) at different temperatures outdoors. Right, electric energy consumption per temperature bin (outdoors) and depending on the system (HFC-based vs. R744 condensing unit).

Ввиду ограниченности технической информации о данном устройстве, значение EER в зависимости от температуры окружающей среды (конденсатор в данном случае находится за пределами помещения) было рассчитано приблизительно, исходя из потребляемой мощности и холодопроизводительности при номинальных условиях, и предполагая постоянную общую эффективность устройства в рамках исследуемых условий. Это, безусловно, является источником неопределенности в анализе, но дает хорошее представление о влиянии кондиционирования воздуха, необходимого для отвода теплоты, выделяемой в конденсаторах витрин (на основе ГФУ).

На рис. 6 показано потребление электроэнергии для каждого температурного интервала в разных случаях (компрессорно-конденсаторный агрегат R744 в сравнении с отдельными витринами на основе ГФУ). компрессорно-конденсаторный агрегат на базе R744 демонстрирует явно меньшее энергопотребление при температуре до 30 °C за пределами помещения, а при 35 °C наступает точка перелома, если рассматривать только энергопотребление витрин MT и LT в случае использования ГФУ. Однако для корректного сравнения необходимо учитывать фактор кондиционирования за счет теплоты, отводимой конденсаторами различных витрин в воздух в магазине, что не характерно для системы на базе R744. Таким образом, точка перелома отодвигается на 40 °C, что относительно незначительно сказывается на годовом потреблении энергии. Годовое потребление электроэнергии, рассчитанное для централизованной холодильной установки на базе R744, будет на 3,3 МВт·ч ниже, чем при использовании существующего решения на основе ГФУ (снижение на 24%). Следует отметить, что не учитывались базовые затраты на вспомогательное оборудование для различных витрин, поскольку они были бы сопоставимы для обеих систем (на основе ГФУ и R744). Потребление

электроэнергии системой кондиционирования, не связанное с выделением теплоты из шкафов, также считалось сопоставимым независимо от выбранной архитектуры холодильного оборудования.

Учитывая, что с точки зрения энергоэффективности централизованный компрессорно-конденсаторный агрегат R744 превосходит существующее решение (на основе ГФУ), за обсуждением должна последовать экономическая оценка обоих вариантов. Несмотря на то, что указанное обстоятельство не является целью данной статьи, здесь мы кратко рассмотрим этот вопрос. Традиционно утверждается, что системы и компоненты на базе R744 являются более дорогими по сравнению с системами и компонентами на основе ГФУ вследствие экономии за счет масштаба и технологической готовности (выдерживать высокое давление CO₂). Однако литературный поиск показал, что в последние годы этот разрыв сокращается. Новые материалы, например, сплав K65, обеспечивают относительно простой монтаж, в определенной степени компенсируя необходимость прокладки дополнительных трубопроводов (и их изоляции) от компрессорно-конденсаторного агрегата R744 к различным витринам. Благодаря малой холодопроизводительности и благоприятным свойствам CO₂ можно использовать даже чисто медные трубопроводы небольшого диаметра. Более того, предлагаемое решение будет включать:

- всего три относительно недорогих ротационных компрессора R744 по сравнению с девятью компрессорами (по одному на витрину), которые требовались в существующем решении;
- единый газоохладитель вместо отдельных конденсаторов;
- одинаковое количество испарителей, оснащенных, несомненно, более дорогостоящими расширительными устройствами, чем существующие агрегаты.

6. ВЫВОДЫ

Основное внимание уделено стратегической разработке реального решения для супермаркетов различного размера. Оценивается современная система R744 и подход, позволяющий малым супермаркетам отказаться от синтетических хладагентов и преодолеть ограничение по производительности при высокой температуре окружающей среды. Настоящее исследование в конечном счете подтверждает огромный потенциал системы на базе R744 в тропических регионах, учитывая энергетические и экономические факторы. Фактически, результаты настоящего исследования подчеркивают потенциал экологически чистой технологии охлаждения R744 для небольших супермаркетов в качестве эффективной стратегии замены традиционных технологий на основе синтетического ГФУ. Кроме того, применение технологии охлаждения на основе R744 позволяет избежать использования ГФУ в блоке кондиционера за счет интеграции кондиционера в конденсаторный блок R744 или использования экологически чистого R290 в отдельном кондиционере.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность за поддержку, полученную от Исследовательского совета Норвегии и партнеров-пользователей через HighEFF — Центр энергоэффективной и конкурентоспособной промышленности будущего, 8-летний исследовательский центр,

работающий в рамках программы FME (Центр экологических энергетических исследований, 257632/E20).

ACKNOWLEDGEMENT

The authors gratefully acknowledge the support received from the Research Council of Norway and user partners through HighEFF — Centre for an Energy Efficient and Competitive Industry for the Future, an 8-year Research Centre under the FME-scheme (Centre for Environment-friendly Energy Research, 257632/E20).

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Настоящая статья представляет собой перевод статьи Singh S, Pardiñas ÁÁ, Hafner A, Schlemminger C, Banasiak K. R744 Refrigeration Solution for Small Supermarkets. In: Proceedings of the 9th IIR Conference on the Ammonia and CO₂ Refrigeration Technologies. Ohrid: IIF/IIR, 2021.

DOI: 10.18462/iir.nh3-co2.2021.0030

Публикуется с разрешения правообладателя.

ADDITIONAL INFORMATION

This article is a translation of the article Singh S, Pardiñas ÁÁ, Hafner A, Schlemminger C, Banasiak K. R744 Refrigeration Solution for Small Supermarkets. In: Proceedings of the 9th IIR Conference on the Ammonia and CO₂ Refrigeration Technologies. Ohrid: IIF/IIR, 2021.

DOI: 10.18462/iir.nh3-co2.2021.0030

Published with the permission of the copyright holder.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gullo P., Hafner A., Banasiak K. Transcritical R744 refrigeration systems for supermarket applications: Current status and future perspectives // *International Journal of Refrigeration*. 2018. Vol. 93. P. 269–310. doi: 10.1016/j.jirefrig.2018.07.001
2. Singh S., Hafner A., Maiya M.P., et al. Multiejector CO₂ cooling system with evaporative gascooler for a supermarket application in tropical regions // *Applied Thermal Engineering*. 2021. Vol. 190. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2021.116766
3. Singh S., Maiya P.M., Hafner A., et al. Energy efficient multiejector CO₂ cooling system for high ambient temperature //

Thermal Science and Engineering Progress. 2020. 19. doi: 10.1016/j.tsep.2020.100590

4. Ali S. The Future of Indian Electricity Demand. Brookings Institution, 2018. Accessed: 09.09.2024. Available from: <http://ebooks.cambridge.org/ref/id/CB09780511996191>

5. Yari M., Sirousazar M. Cycle improvements to ejector-expansion transcritical CO₂ two-stage refrigeration cycle // *International Journal of Energy Research*. 2007. Vol. 32, N. 7. P. 677–687. doi: 10.1002/er.1385

REFERENCES

1. Gullo P, Hafner A, Banasiak K. Transcritical R744 refrigeration systems for supermarket applications: Current status and future perspectives. *International Journal of Refrigeration*. 2018;93:269–310. doi: 10.1016/j.jirefrig.2018.07.001
2. Singh S, Hafner A, Maiya MP, et al. Multiejector CO₂ cooling system with evaporative gascooler for a supermarket application in tropical regions. *Applied Thermal Engineering*. 2021;190. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2021.116766

3. Singh S, Maiya PM, Hafner A, et al. Energy efficient multiejector CO₂ cooling system for high ambient temperature. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2020;19. doi: 10.1016/j.tsep.2020.100590

4. Ali S. *The Future of Indian Electricity Demand*. Brookings Institution, 2018. Accessed: 09.09.2024. Available from: <http://ebooks.cambridge.org/ref/id/CB09780511996191>

5. Yari M, Sirousazar M. Cycle improvements to ejector-expansion transcritical CO₂ two-stage refrigeration cycle. *International Journal of Energy Research*. 2007;32(7):677–687. doi: 10.1002/er.1385

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*** Singh Simarpreet,**
адрес: Норвегия, 7491, Тронхейм;
e-mail: simarleo89@gmail.com

Pardiñas Ángel Álvarez,

Hafner Armin,
e-mail: armin.hafner@ntnu.no

Schlemminger Christian,
e-mail: christian.schlemminger@sintef.no

Banasiak Krzysztof,
e-mail: krzysztof.banasiak@ntnu.no

AUTHORS' INFO

*** Simarpreet Singh,**
address: 7491, Trondheim, Norway;
e-mail: simarleo89@gmail.com

Ángel Álvarez Pardiñas,

Armin Hafner,
e-mail: armin.hafner@ntnu.no

Christian Schlemminger,
e-mail: christian.schlemminger@sintef.no

Krzysztof Banasiak,
e-mail: krzysztof.banasiak@ntnu.no

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author