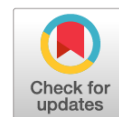


DOI: <https://doi.org/10.17816/RF631892>



Оптимизация использования энергии в холодильных системах

Andy Pearson

Star Refrigeration Ltd., Thornliebank, Glasgow, UK

АННОТАЦИЯ

Энергия, необходимая для функционирования холодильной системы, составляет значительную часть общих затрат на содержание системы в течение всего срока службы. Тем не менее, современные исследования выявили огромные различия в количестве расходуемой энергии между различными системами. В настоящей статье рассмотрены способы использования энергии, а также причины такого большого различия в ее использовании в разных системах. Приводится недавняя работа по оценке и сравнительному анализу производительности средств холодильного хранения и объяснение методологии обеспечения максимально эффективной работы холодильных камер.

Ключевые слова: холодильное оборудование; холодильное хранение; энергия; электроэнергия; эффективность.

Настоящая статья представляет собой перевод статьи Pearson A. Optimising energy use in refrigeration systems.

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

DOI: 10.18462/iir.nh3-co2.2021.0001

Публикуется с разрешения правообладателя.

Как цитировать:

Pearson A. Оптимизация использования энергии в холодильных системах // Холодильная техника. 2023. Т. 112, № 2. С. 67–73.

DOI: <https://doi.org/10.17816/RF631892>

DOI: <https://doi.org/10.17816/RF631892>

Optimising energy use in refrigeration systems

Andy Pearson

Star Refrigeration Ltd., Thornliebank, Glasgow, UK

ABSTRACT

The energy used to operate a refrigeration system accounts for a significant proportion of the total lifetime cost of ownership of the system and yet surveys show huge variation in the amount of energy required from one system to another. This paper considers ways in which energy is used and reasons why there is such a large discrepancy in usage between systems. It describes recent work to assess and benchmark the performance of cold storage facilities and explains a methodology for ensuring that cold and chill stores operate as efficiently as possible.

Keywords: refrigeration; cold storage; energy; electricity; efficiency.

This article is a translation of the article by Pearson A. Optimising energy use in refrigeration systems. In: Proceedings of the 9th IIR Conference on the Ammonia and CO₂ Refrigeration Technologies. Ohrid: IIF/IIR, 2021.

DOI: 10.18462/iir.nh3-co2.2021.0001

Published with the permission of the copyright holder.

To cite this article:

Pearson A. Optimising energy use in refrigeration systems. *Refrigeration Technology*. 2023;112(2):67–73. DOI: <https://doi.org/10.17816/RF631892>

Received: 13.05.2024

Accepted: 13.05.2024

Published online: 17.06.2024

1. ВВЕДЕНИЕ

Использование энергии является ключевым аспектом во всех сферах жизни. Энергия стоит дорого, а надлежащий контроль ее использования может стать решающим фактором между прибылью и убытками организации. Несмотря на столь существенное значение, недавний анализ выявил весьма значительную разницу между средним потреблением энергии в средствах холодильного хранения и лучшим результатом, который может быть при этом достигнут. Европейский проект ICE, осуществлявшийся с 2008 по 2012 гг., в рамках которого были собраны данные очень большого количества складов холодильного хранения, показал, что по всей Европе среднее удельное потребление энергии (УПЭ) составляло около 50 кВтч/м³/год для крупных складов [1]. УПЭ — очень полезный показатель для такого типа анализа, являющийся суммой использованной энергии, измеряемой в киловатт-часах за полный год и поделенной на объем склада. В проекте ICE не проводился расчет показателя УПЭ. Вместе с тем, были составлены графики потребляемой энергии за год в зависимости от объема хранилища, таким образом, УПЭ легко рассчитывается путем деления одного на другое, и информация представлена в отчете. Недавние исследования показали, что передовой подход для крупных складов обеспечивает показатели УПЭ менее 10 кВтч/м³/год для крупных складов [2, 3]. Поэтому очень важно разобраться, почему средний показатель использования энергии в 5 раз превышает лучший из достигнутых результатов, чтобы мотивировать средних пользователей и поощрять их к снижению своих потребностей в энергии.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ

Слово «удельный» здесь указывает на то, что потребление энергии указано на единицу объема склада применительно к объектам хранения и распределения. Это должен быть общий объем складского помещения (длина × ширина × высота), включая охлаждаемые погрузочные платформы, но не включая неохлаждаемые платформы, офисы, зарядные станции, мастерские по техническому обслуживанию и машинные залы. Рассматриваемый показатель может быть неизвестен точно, но его легко вычислить, и точное его значение не так уж важно при условии, что одно и то же число будет последовательно использоваться для будущих сравнений. В идеале рассматриваемая энергия должна быть только той, которая необходима для работы холодильной системы и вспомогательного оборудования (например, вспомогательных вентиляторов в холодильной камере, периферийных нагревателей, нагревательные приборы системы оттаивания и т. д.). К ней не должны относиться другие потребители электроэнергии на объекте (офисное освещение, зарядка

вилочных автопогрузчиков и т. д.), равно как и другие потребители энергии (например, газовые котлы). Единица измерения показателя — кВтч/м³ в год, которая для простоты здесь сокращена до кчмг (киловатт-час на кубический метр в год).

Иногда в холодильной системе отсутствует подробный учет электроэнергии, а отчетные данные относятся ко всему объекту. Это неприемлемо по нескольким причинам, но методика УПЭ все же может дать значимую информацию о работе такого объекта. Если оператор объекта действительно заинтересован в повышении энергоэффективности, ему следует как можно скорее инвестировать средства в субучет и регистрацию данных, чтобы создать базовый уровень производительности системы, позволяющий проводить сравнения в будущем. Если энергия предназначена для всего объекта, то это должно быть указано отдельно. Считается общепризнанным, что холодильное оборудование является крупнейшим потребителем электроэнергии на складе, и на него часто приходится 70% или более от общего потребления энергии на объекте (за исключением топлива для транспорта). Однако, в случае такого большого различия между средними и лучшими показателями, указанное обстоятельство может быть лишь приблизительным ориентиром. Если энергия необходимая для охлаждения составляет 70% от всего потребления электроэнергии на среднем объекте, а общее потребление составляет 50 кчмг, то для охлаждения требуется 35 кчмг, а на все остальные нужды необходимо 15 кчмг. Если потребность в охлаждении снижается за счет инвестиций и эффективной эксплуатации в соответствии с передовой практикой 10 кчмг для холодильной системы, то это снизит общее значение с 50 кчмг до 25 кчмг, при этом на долю охлаждения будет приходиться 40% от общего объема.

«Потребление» — не вполне подходящее слово, поскольку энергия преобразуется из электрической в тепловую и поэтому не потребляется. «Использование» было бы более точным описанием, но поскольку УПЭ является широко используемым и общепризнанным термином, именно он является предпочтительным для данной статьи. Хотя используется термин УПЭ, в тексте он будет относиться к «использованию», а не «потреблению».

3. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УПЭ КАК БИЗНЕС-ПОКАЗАТЕЛЬ

Владелец или оператор склада может использовать УПЭ двумя способами. Годовое потребление электроэнергии на объекте можно разделить на объем складского помещения, чтобы получить единое значение для сравнения эффективности объекта с показателями предыдущих лет, с другими объектами, принадлежащими той же компании, или даже с объектами конкурентов, и, таким образом, получить полезную информацию о рынке. Для этого требуется всего два числа, одно из которых

(объем хранилища) является постоянным и очень легко рассчитывается, а другое (годовое потребление кВтч) приводится в ежемесячных, квартальных или годовых отчетах электроэнергетической компании. На самом деле, для любого оператора склада непростительно игнорировать этот показатель и при этом с интересом следить за прослеживающейся тенденцией и сравнением с другими объектами.

Второй способ немного сложнее и требует больше информации, но в конечном итоге более полезен при повседневном планировании бизнес-операций и капитальных затрат. Вместо того, чтобы ждать год, чтобы получить достаточно данных для расчета УПЭ, можно делать прогнозы на основе гораздо меньшего периода времени для данных о том, каким будет УПЭ после того, как результаты системных изменений вступят в силу. Было установлено, что потребление энергии на складах зависит от сезона, но ежедневное потребление не связано тесно с каким-либо одним измеряемым параметром, включая температуру окружающей среды, скорость или направление ветра [4]. Указанное обстоятельство позволяет присвоить каждому дню года коэффициент, представляющий среднюю величину энергопотребления в этот день, включенную в годовой итог. Следовательно, если известно ежедневное использование за относительно короткий период времени, годовое использование можно вычислить путем деления суммы ежедневного использования на сумму ежедневных коэффициентов. Чем больше данных будет собрано, тем точнее будет оценка годового показателя.

Преимущество второго метода состоит в том, что УПЭ можно использовать для оценки эффективности мероприятий по техническому обслуживанию, без необходимости ждать год, чтобы увидеть годовой показатель. Дополнительным преимуществом является то, что при возникновении неблагоприятного изменения воздействие изменения должно быть очевидно посредством текущего прогнозирования, и может быть проведено расследование для выявления причины изменения, чтобы можно было быстро принять меры по исправлению положения и сохранить контроль над потреблением электроэнергии установкой. Чтобы обеспечить этот функционал, необходимо зафиксировать электрическую энергию, использованную за каждые 24 часа, и сохранять эти данные в течение, как минимум, года. Сопоставляя соответствующий ежедневный коэффициент с зарегистрированным вчера значением кВтч, можно сделать прогноз годового УПЭ и сравнить его с предыдущими прогнозами, чтобы выявить, повышается ожидаемый показатель или понижается. Хорошим результатом при изменении технического обслуживания будет являться снижение этой величины, тогда как незамеченное изменение к худшему вызовет подъем и должно послужить поводом для возможного расследования. Чем больше дней используется в прогнозе, тем точнее он будет, но тем больше времени потребуется, чтобы эффект

изменения стал заметен. Поэтому полезно отслеживать несколько прогнозов и выискивать тенденции. Обычно УПЭ за весь год следует рассчитывать каждый день, используя вчерашние показания 365 кВтч, и следует делать краткосрочный, среднесрочный и долгосрочный прогноз. В краткосрочном прогнозе будут использоваться данные за 270 дней и, следовательно, с хорошей точностью (обычно $\pm 5\%$, если за это время ничего не изменится) можно предсказать, какой будет УПЭ через 95 дней. В среднесрочном прогнозе будут использоваться данные за 90 дней и, следовательно, можно предсказать, каким будет УПЭ через 275 дней, с точностью $\pm 20\%$. А в долгосрочном прогнозе, который будет наиболее чувствителен к недавним изменениям в производительности, используются данные за 10 дней и, следовательно, прогнозируется значение через 355 дней, но только с точностью $\pm 30\%$. Можно использовать любые другие объемы данных: чем больше дней используется, тем точнее будет прогноз, но тем медленнее он будет реагировать на изменения. Важно составлять графики тенденций и ежедневно обновлять их, выискивая значимую динамику в показателях.

4. ГРАФИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ УПЭ

Работа такой системы была смоделирована с использованием прежних ежедневных данных в кВтч для объекта, на котором установлены две независимые системы, обслуживающие одну большую камеру. Склад был сдан в эксплуатацию в сентябре 2019 года, а прогнозирование начато 1 января 2020 года.

На рис. 1 показаны различные ежедневные прогнозы в течение тридцатидневного периода, что позволяет сделать несколько выводов о работе установки. Красная линия показывает совокупный показатель УПЭ за предыдущий год, обновляемый каждый день. 25 марта УПЭ составляло 9,38 кчмг, а к 24 апреля немного выросла до 9,47 кчмг. Краткосрочный прогноз, который показывает, каким, как ожидается, будет УПЭ за полный год через 90 дней, немного выше: от 9,85 кчмг до 10,04 кчмг за тридцать дней. Однако, поскольку фактический показатель УПЭ не достиг этого уровня, можно сделать вывод, что в недавнем прошлом УПЭ было выше, но сейчас снижается. Последнее обстоятельство подтверждается среднесрочными и долгосрочными прогнозами, которые в начале периода составляли 12,07 кчмг и 10,98 кчмг, соответственно, а к концу периода снизились до 10,98 кчмг и 6,94 кчмг. Это показывает, что в работе холодильной установки присутствуют факторы, приводящие к снижению удельного энергопотребления, и, следовательно по мере того, как это отражается на результатах за весь год, можно ожидать, что рассматриваемый показатель будет ниже текущего значения за весь год, составляющего 9,47 кчмг.

Если расширить диапазон графика, чтобы увидеть динамику прогнозов в предыдущие месяцы, можно заметить интересную картину. На рис. 2 показаны прогнозы УПЭ на краткосрочную, среднесрочную и долгосрочную перспективу с середины октября по 25 марта. До этого периода краткосрочные и среднесрочные прогнозы очень близко соответствовали годовым значениям, что свидетельствует об отсутствии существенной тенденции повышения или снижения УПЭ. Долгосрочный прогноз (основанный на показаниях за последние 10 дней) показал большую изменчивость, но даже он не отклонился от фактического значения около 7,7 кчмг более чем на +/- 1,5 кчмг. Тем не менее 19 октября долгосрочный прогноз начал расти и сохранял этот уровень в течение следующих шести месяцев. Через несколько дней среднесрочный прогноз также начал повышаться, и к концу ноября он был на 1 кчмг выше годового показателя УПЭ. С 24 декабря по 3 января наблюдалась непродолжительная обратная динамика, когда прогнозируемое значение упало с 12,2 кчмг до 8,4 кчмг, что соответствовало показателю за весь год, но затем снова начало расти, достигнув пика в 14,4 кчмг к концу января. Очевидно, что-то произошло и повлияло на показатели.

Это отклонение от фактических показателей можно полностью объяснить пониманием того, что еще происходило на объекте, а также является хорошим примером способности этого инструмента выявлять отклонения

от предыдущего нормального поведения за относительно короткое время. Объект представляет собой низкотемпературный стеллажный холодильный склад, обслуживаемый закрытой погрузочной площадкой при температуре окружающей среды. Работа входной группы на участке исправна, здание недавно построено и находится в хорошем состоянии. Внутренний объем склада 81 000 м³, обслуживается двумя модульными аммиачными холодильными установками. Данные УПЭ, приведенные на рис. 1 и 2, относятся к электроэнергии, потребляемой этими двумя установками. В 2020 году здание было расширено еще на 74 000 м³ внутреннего объема, и для обслуживания дополнительного объема были добавлены еще два модульных блока. Доступ в новую камеру с погрузочной платформы осуществляется через исходную камеру через внутренние двери; новая камера не имеет прямого доступа снаружи.

Ввод в эксплуатацию модульных агрегатов нового склада начался 12 октября и завершился 6 ноября, с последующей осадкой здания в течение последующих 4 недель. Поскольку подъезд к пристройке осуществляется через существующий склад, неудивительно, что произошло увеличение энергопотребления первоначальных установок, что и наблюдалось с 19 октября. Кратковременная обратная динамика объясняется закрытием объекта на рождественские праздники, при этом заполнение нового склада продолжалось в течение

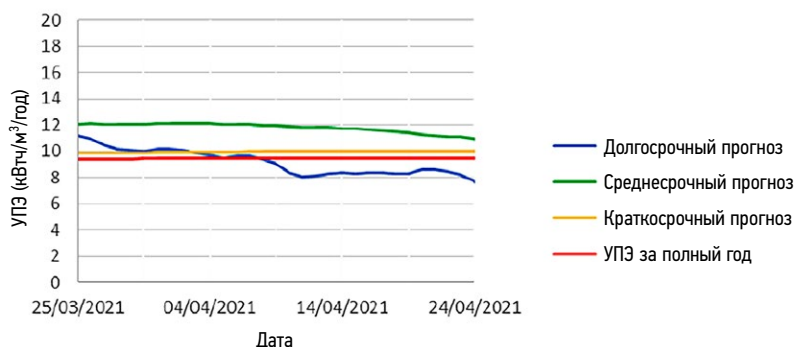


Рис. 1. Ежедневный прогноз УПЭ на 30-дневный период.

Fig. 1. Daily predictions of SEC over a 30 day period.

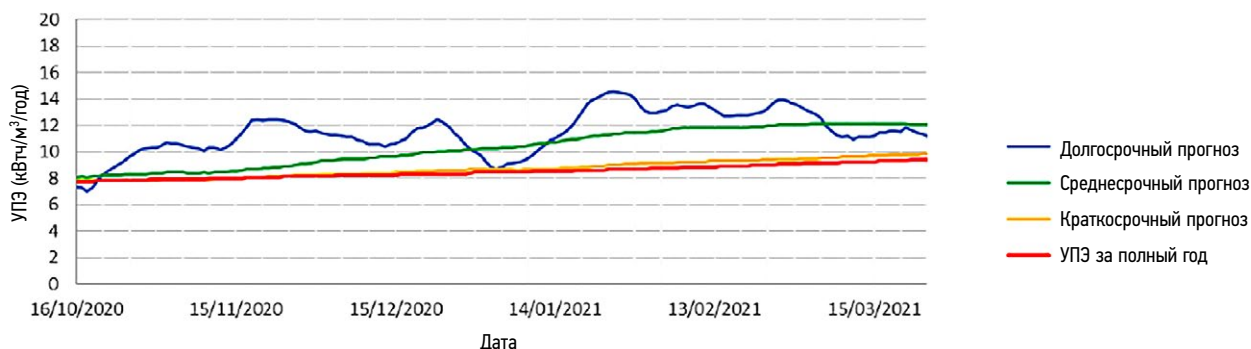


Рис. 2. Ежедневный прогноз УПЭ на более продолжительный период времени.

Fig. 2. Daily SEC Prediction over a wider timespan.

января и февраля, что привело к увеличению движения через существующий склад. Это вызвало увеличение УПЭ для первых двух установок, но компенсируется снижением УПЭ ниже среднего для двух блоков расширения территории.

Укомплектование новой секции склада до нормального рабочего уровня было завершено к концу февраля, после чего стало заметно снижение долгосрочного прогноза (см. рис. 2). Таким образом, картина прогнозов на рис. 1 показывает, что работы по расширению уже завершены, и два дополнительных блока находятся в эксплуатации, УПЭ склада возвращается к предыдущему показателю, составлявшему около 8 кчмг. Необычные взаимоотношения между первоначальным складом и пристройкой означают, что в долгосрочной перспективе следует учитывать общее потребление электроэнергии всеми четырьмя единицами, обслуживающими общий объем склада в 155 000 м³, чтобы увидеть, произойдет ли какое-либо чистое увеличение потребления электроэнергии.

Важно подчеркнуть, что графическое представление не отображает точного показателя УПЭ в будущем, а скорее показывает, каким он был бы, если бы текущая модель использования продолжалась без дальнейшего изменения обстоятельств. Фактическая ценность прогнозов не так важна, как взаимосвязь между ними и то, как они соотносятся с историческими значениями. Например, в конце октября и начале ноября долгосрочный прогноз резко вырос, а через 30 дней последовал среднесрочный прогноз, что показало изменение в модели использования, которое привело к увеличению потребления электроэнергии. Кратковременное снижение долгосрочного прогноза на 25 декабря (Католическое Рождество) не отразилось на изменении среднесрочного прогноза, что указывает на то, что это было всего лишь временной обратной динамикой, однако снижение, достигнутое с конца февраля, было более постоянным и привело к снижению в среднесрочном прогнозе. В любой день данные УПЭ, а также краткосрочные, среднесрочные и долгосрочные прогнозы должны четко отображаться в виде цифр, и добросовестный оператор должен следить за тем, чтобы долгосрочный прогноз был ниже, чем показатель УПЭ, что указывает на то, что его потребление электроэнергии изменяется в правильном направлении. Если показатель долгосрочного прогноза

поднимается выше значения УПЭ, это становится предупреждением о возможных неполадках, однако нет смысла предпринимать активные действия на основе одного или двух высоких долгосрочных показателей. Если данные останутся на уровне выше УПЭ, и если диапазон среднесрочного прогноза также начнет увеличиваться, то потребуются дальнейшие действия, чтобы определить, что изменилось и что можно с этим сделать. Преимущество графика заключается в том, что он визуализирует представление о том, как различные параметры изменяются с течением времени. Пример того, как будут отображаться данные, показан на рисунке 3 для трех дней (5 октября 2020 г., 5 ноября 2020 г. и 24 апреля 2021 г.).

В октябре, до начала ввода в эксплуатацию Фазы 2, долгосрочный прогноз был ниже УПЭ, а среднесрочный прогноз был выше. Это указывает на то, что потребление электроэнергии было высоким, но постепенно сокращалось. Месяц спустя как долгосрочные, так и среднесрочные прогнозы оказались высокими, что указывало на то, что по какой-то причине произошел быстрый рост. К 24 апреля долгосрочный прогноз упал значительно ниже показателя УПЭ, показывая сокращение использования, но среднесрочный прогноз все еще оставался высоким, что указывает на недавнее снижение.

ВЫВОДЫ

Использование удельного потребления энергии в качестве бизнес-показателя для управления эффективной работой холодильных складов становится все более распространенным, но на сегодняшний день оно осуществлялось только на исторической основе. Возможность полезного использования прогнозов УПЭ для определения тенденций роста энергопотребления и монетизации преимуществ профилактического обслуживания была продемонстрирована с применением реальных данных об объекте в конкретных условиях. Этот метод можно легко включить в управляющее программное обеспечение новых систем или модернизировать существующее предприятие.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Автор выражает признательность компании «Star Refrigeration Ltd» за поддержку и разрешение опубликовать эту статью.



Рис. 3. Цифровое отображение показателей ежедневного прогноза.

Fig. 3. Digital display of daily prediction figures.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Настоящая статья представляет собой перевод статьи Pearson A. Optimising energy use in refrigeration systems. In: Proceedings of the 9th IIR Conference on the Ammonia and CO₂ Refrigeration Technologies. Ohrid: IIF/IIR, 2021. DOI: 10.18462/iir.nh3-co2.2021.0001

Публикуется с разрешения правообладателя.

ADDITIONAL INFORMATION

This article is a translation of the article by Pearson A. Optimising energy use in refrigeration systems. In: Proceedings of the 9th IIR Conference on the Ammonia and CO₂ Refrigeration Technologies. Ohrid: IIF/IIR, 2021.

DOI: 10.18462/iir.nh3-co2.2021.0001

Published with the permission of the copyright holder.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Evans J.A., Huet J-M., Reinholdt L., et al. Cold Store Energy Performance. In: Proceedings of the 2nd IIR Conference on the Cold Chain and Sustainability. Paris: IIF/IIR, 2013.
2. Pearson A. Energy Performance of Industrial Cold Storage Facilities. In: Proceedings of the 25th IIR Congress, Montreal, Canada. Montreal: IIF/IIR, 2019.

3. World Guide to Low-Charge Ammonia Part 1, Shecco. Brussels: Shecco, 2019.
4. Pearson A. Improvements in the Prediction of Energy Performance of Refrigeration Systems. In: Proceedings of the 14th IIR Gustav Lorentzen Conference. Paris: IIF/IIR, 2020.

REFERENCES

1. Evans JA, Huet J-M, Reinholdt L, et al. Cold Store Energy Performance. In: *Proceedings of the 2nd IIR Conference on the Cold Chain and Sustainability*. Paris: IIF/IIR, 2013.
2. Pearson A. Energy Performance of Industrial Cold Storage Facilities. In: *Proceedings of the 25th IIR Congress, Montreal, Canada*. Montreal: IIF/IIR, 2019.

3. *World Guide to Low-Charge Ammonia Part 1, Shecco*. Brussels: Shecco, 2019.
4. Pearson A. Improvements in the Prediction of Energy Performance of Refrigeration Systems. In: *Proceedings of the 14th IIR Gustav Lorentzen Conference*. Paris: IIF/IIR, 2020.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Andy Pearson,

адрес: Великобритания, G46 8JW, Glasgow;

e-mail: apearson@star-ref.co.uk

AUTHOR'S INFO

Andy Pearson,

address: Glasgow, G46 8JW, UK;

e-mail: apearson@star-ref.co.uk