

Энергетическая эффективность низкотемпературных систем

Игорь Алексеевич Короткий, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой теплохладотехники
Александр Николаевич Расщепкин, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры теплохладотехники Кемеровский государственный университет
Елена Валерьевна Короткая, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры
E-mail: krot69@mail.ru

Современное состояние мировой экономики характеризуется растущим дефицитом энергетических ресурсов. Спад промышленного производства, перераспределение мировых потоков, рост неопределенности рынка и повышение стоимости энергетических ресурсов требуют значительно большего внимания к развитию и совершенствованию технологий энергосбережения. Холодильное производство — крупнейший потребитель энергии как в России, так и во всем мире. Оптимизация низкотемпературных систем с целью повышения их энергоэффективности является важной народнохозяйственной проблемой. Повышение энергетической эффективности подразумевает не только уменьшение потребления электроэнергии, но и развитие технологий полезной утилизации теплоты конденсации холодильных установок. Государственное стимулирование развития холодильного производства должно быть ориентировано прежде всего на развитие в стране наиболее передовых технических решений в части аппаратного обеспечения холодопроизводящих систем.

Ключевые слова: энергетическая эффективность, производство электроэнергии, энергогенерация, утилизация теплоты конденсации, углекислота, углекислотная холодильная машина.

Korotkiy I.A., Rasshchepkin A.N., Korotkaya E.V. Energy efficiency of low temperature systems
Kemerovo State University

The current state of the world economy is characterized by a growing shortage of energy resources. The decline in industrial production, the redistribution of global flows, the growing uncertainty of the market and the increase in the cost of energy resources require much more attention to the development and improvement of energy saving technologies. The refrigeration industry is the largest consumer of energy both in Russia and around the world as a whole. Ways to optimize low-temperature systems in order to increase their energy efficiency is an important national economic problem. At the same time, increasing energy efficiency implies not only a reduction in electricity consumption, but also the development of technologies for the useful utilization of the condensation heat of refrigeration units. State incentives for the development of refrigeration production should be focused, first of all, on the development of the most advanced technical solutions in the country in terms of hardware for refrigeration systems.

Key words: energy efficiency, electricity production, power generation, condensation heat recovery, carbon dioxide, carbon dioxide refrigeration machine.

Показатели электрогенерации являются индикатором развития промышленного производства. С 2010 по 2019 г. производство электроэнергии в мировом масштабе стабильно росло в среднем на 2,6 % ежегодно (рис. 1) [1]. Максимальное количество электроэнергии было выработано в 2019 г. и составило чуть более 27 тыс. тераватт-часов (ТВт·ч).

В 2020 г. впервые за более чем десятилетнюю историю был зафиксирован спад электрической генерации. В годовом исчислении сокращение составило 0,4 %, или 112 ТВт·час по сравнению с 2019 г. Причиной снижения объемов выработки электроэнергии и соответственно промышленного производства стала пандемия вируса COVID-19, разгар которой пришелся на 2020 г.

В 2021 г. мировой рост генерации электроэнергии возобновился: увеличение по сравнению с кризисным 2020 г.

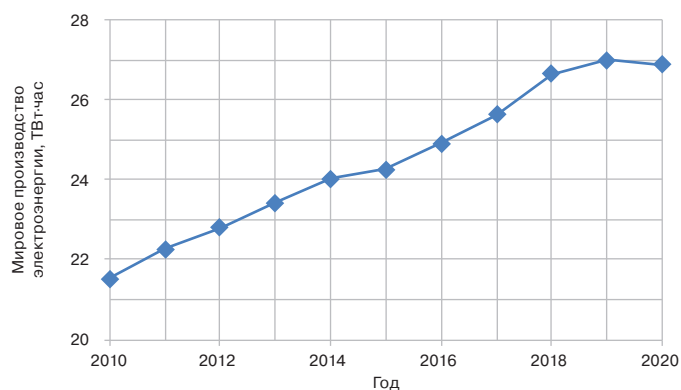


Рис. 1. Динамика мирового производства электроэнергии с 2010 по 2020 гг.

достигло 5,5 % [2]. В абсолютных величинах мировое производство составило около 28,5 тыс. ТВт·ч. Однако значительная часть наиболее развитых стран по выработке электроэнергии не достигли показателей 2019 г. (табл. 1). Страны — драйверы роста электрогенерации в мире представлены в табл. 2.

Несмотря на наметившуюся в 2021 г. глобальную тенденцию к увеличению производства электроэнергии, в 2022 г. обострение политических противоречий, вылившихся в масштабный вооруженный конфликт на Украине, спровоцировало резкий рост стоимости энергоресурсов и неопределенность рынка энергоносителей.

Доля мирового производства энергии за счет сжигания ископаемого топлива (угля, природного газа, нефти) составляет 61–63 % (рис. 2). Стоимость источников для тепловой генерации электроэнергии взаимосвязана и в зна-

Таблица 1
Показатели производства электроэнергии в странах G7

Страна – член G7	Производство электроэнергии, ТВт·ч		Рост производства относительно 2019 г., %	Абсолютная величина роста, ТВт·ч
	2019 г.	2021 г.		
США	4411,2	4406,4	-0,1	-4,8
Япония	1025,8	1019,7	-0,6	-6,1
Канада	650,8	641,0	-1,5	-9,8
Германия	607,0	584,5	-3,7	-22,5
Франция	562,8	547,2	-2,8	-15,6
Великобритания	323,8	309,9	-4,3	-13,9
Италия	293,9	287,2	-2,3	-6,7
Суммарно по G7	7875,3	7795,9	-1,0	-79,4

Таблица 2
Показатели производства электроэнергии
в странах – драйверах роста

Страны – драйверы роста	Производство электроэнергии, ТВт·ч		Рост производства относительно 2019 г., %	Абсолютная величина роста, ТВт·ч
	2019 г.	2021 г.		
Китай	7503,4	8534,3	13,7	1030,9
Индия	1622,1	1714,8	5,7	92,7
Россия	1085,0	1157,1	6,6	72,1
Бразилия	626,3	654,4	4,5	28,1
Саудовская Аравия	335,4	356,6	6,3	21,2
Иран	318,9	357,8	12,2	38,9
Турция	303,9	333,3	9,7	29,4
Итого	11795	13108,3	11,1	1313,3

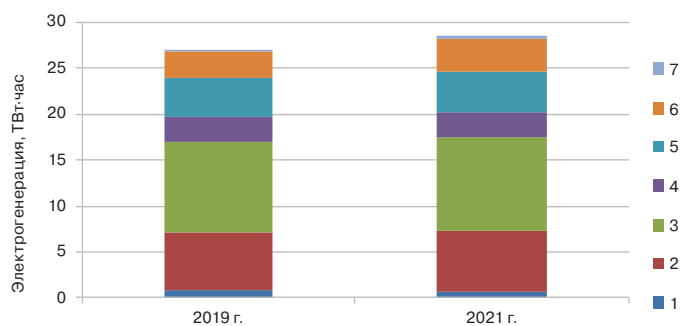


Рис. 2. Доли различных видов электрогенерации: 1 – нефть; 2 – природный газ; 3 – уголь; 4 – ядерные электростанции; 5 – гидроэлектростанции; 6 – электрогенерация из возобновляемых источников; 7 – другие виды генерации электроэнергии

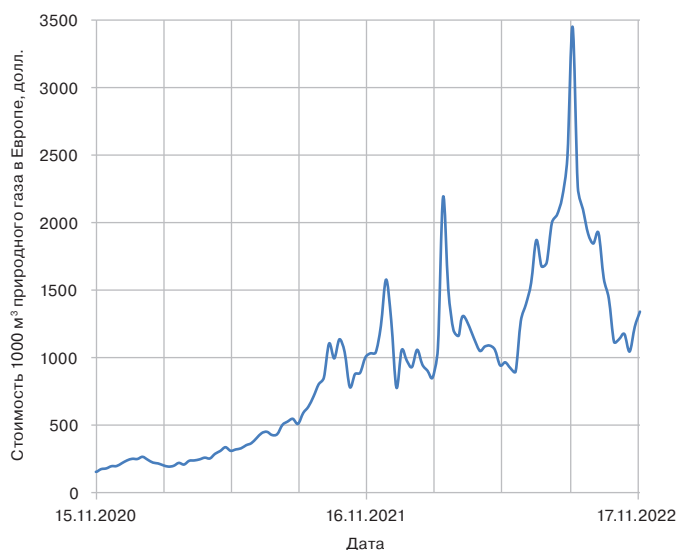


Рис. 3. Динамика изменения стоимости природного газа по данным TTF в 2020–2022 гг.

чительной степени определяется стоимостью природного газа. Динамика изменения цен на природный газ на европейском рынке, по данным хаба TTF (Title Transfer Facility) в Нидерландах, приведена на рис. 3 [3]. Стоимость природного газа в Европе по долгосрочным контрактам в настоящее время также привязана к текущей стоимости торговой площадки TTF.

Ввиду того что стоимость энергоносителей увеличивается, стоимость производимой электроэнергии также стремительно растет. Экономически развитые страны вынуждены принимать жесткие административные меры, направленные на сокращение потребления электроэнергии, а также закрывать энергоемкие производства либо переносить их в страны, более обеспеченные энергетическими ресурсами.

Развитие низкотемпературных технологий в значительной степени определило современный уровень и стандарты качества жизни людей. На привод холодопроизводящих систем идет 25 % производимой электроэнергии [4]. В условиях резкого роста стоимости энергетических ресурсов, а в некоторых случаях их дефицита вопрос повышения энергетической эффективности низкотемпературных систем становится все более актуальным и значимым. Принимая во внимание совокупность факторов и развитие негативных тенденций вследствие растущей неопределенности в мировой экономике, борьба за энергетическую эффективность генерации холода, особенно в сфере производства продуктов питания, ни в коем случае не должна сопровождаться сокращениями или «оптимизациями» холодопроизводящих мощностей.

Низкотемпературные технологии в настоящее время глубоко интегрированы с технологиями производства, транспортировки и хранения продуктов питания. Этот комплекс технологических решений получил название «непрерывная холодильная цепь» [5]. Она позволяет в значительной степени снизить потери продуктов питания, увеличить глубину переработки агропромышленного сырья и в конечном итоге повысить продовольственное обеспечение населения планеты. Тем не менее значительная доля продовольственных ресурсов теряется вследствие недостаточности систем холодоснабжения. В отдельных регионах доля потерь некоторых видов продовольствия составляет 30–40 %.

Важным свойством холодопроизводящих систем является то, что потребляемая ими энергия идет не на «производство холода», а на перенос теплоты от объекта охлаждения и передачу этой теплоты от объекта окружающей среде. За счет такого переноса в охлаждаемом объекте поддерживается требуемая температура, уровень которой ниже температуры окружающей среды.

Для снижения энергопотребления холодильными машинами применяются различные технические решения [6]. К их числу относится использование электронных терморегулирующих вентилей, которые контролируют подачу холодильного агента в испарительную систему в зависимости от внешних условий. Также применяются адаптивное регулирование давления конденсации в зависимости от температуры окружающей среды и частотное регулирование производительности компрессоров. Снижение температуры конденсации холодильных установок на 1 °С дает снижение энергопотребления в аммиачных холодильных установках на 4 %, а во фреоновых — на 2 %. Частотное регулирование позволяет избежать дополнительных энергетических затрат на раскрутку вала компрессора, повысить его моторесурс и обеспечить плавное потребление электроэнергии.

К важным способам повышения производительности холодильных систем относится применение энергетически эффективных холодильных агентов [7], одним из которых является диоксид углерода. Он значительно от-

личается от традиционно применяемых фреонов и аммиака более высокими рабочими давлениями (10–40 атмосфер на стороне низкого давления и до 120 атмосфер на стороне высокого давления), высокой температурой тройной точки (минус 56 °С) и низкой температурой критической точки (31 °С). При этом углекислый газ имеет чрезвычайно высокие термодинамические характеристики, обеспечивающие его эффективность как холодильного агента.

Применение углекислого газа требует специальных технических решений. Современная технологическая база позволяет производить эффективные углекислотные системы холодоснабжения. В настоящее время они имеют более высокую стоимость — на 15–20 % по сравнению с соответствующими фреоновыми. Однако замена системы холодоснабжения с фреоновой на углекислотную дает снижение энергопотребления на 15–20 % при реализации каскадного цикла холодильной машины по схеме фреон/CO₂ и до 30 % при реализации транскритических углекислотных систем холодоснабжения. Таким образом, несмотря на более высокую стоимость, холодопроизводящие углекислотные системы характеризуются более низким энергопотреблением по сравнению с фреоновыми холодильными машинами. При этом срок окупаемости при внедрении углекислотных систем только за счет экономии потребления электроэнергии составляет 6–8 лет.

Возможности технологий снижения энергопотребления низкотемпературными системами достаточно хорошо формализованы. Однако они близки к своему эксергетическому максимуму, термодинамические возможности для дальнейшей их интенсификации в настоящее время практически исчерпаны. К тому же без существенного административного и законодательного ресурса их внедрение не будет иметь масштабного характера, поэтому развитие технологий энергосбережения в низкотемпературной технике и технологии будет носить достаточно экстенсивный характер.

Значительно большим потенциалом обладают технологии полезной утилизации теплоты конденсации [8]. Количество тепловой энергии, отдаваемой окружающей среде в конденсаторах холодильных машин, в 1,5–4 раза больше (в зависимости от температуры, создаваемой в объекте охлаждения) той энергии, которая холодильная машина затрачивает на перенос теплоты. Однако температурный потенциал тепловой энергии, отдаваемой окружающей среде, достаточно низок — в среднем от 30 до 60 °С. При низкой стоимости энергетических ресурсов полезное использование этой теплоты является, как правило, нерентабельным, поэтому до недавнего времени системы полезной утилизации теплоты конденсации имели ограниченное применение.

Использование углекислотных холодильных машин существенно повышает эффективность такого рода утилизации теплоты, выделяемой холодопроизводящей системой [9]. На рис. 4 приведены циклы холодильных машин в диаграмме температура–энтропия, работающих на фреоне R134a и углекислоте (R744). Углекислотный цикл имеет значительно больший потенциал утилизации теплоты, выделяемой холодильной машиной. В газоохладителе можно утилизировать от 40 % теплоты при нагреве теплоносителя до 60 °С и до 60 % при нагреве до 50 °С. В тех же условиях в системе холодоснабжения с R134a теплоноси-

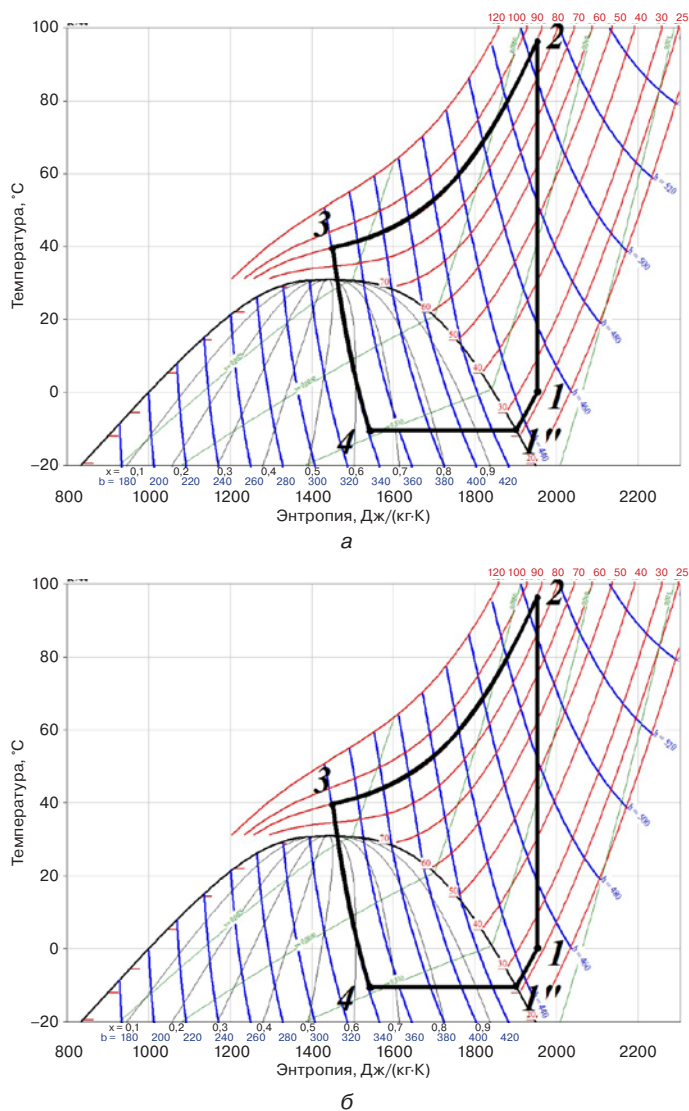


Рис. 4. Цикл холодильной машины с использованием в качестве хладагента: а – R744; б – R134a. Температура кипения холодильного агента минус 10 °С, температура конденсации для R134a (охлаждения углекислоты в газоохладителе для R744) 40 °С, перегрев хладагента перед всасыванием 10 °С

тель с температурой 60 °С получить вообще невозможно, а для получения теплоносителя с температурой 50 °С можно утилизировать только около 3 % теплоты конденсации.

Таким образом, углекислотная холодильная машина холодопроизводительностью 200 кВт, работающая в вышеприведенном режиме температуры кипения и условной температуры конденсации, способна произвести в течение месяца 88 Гкал теплоты с температурным уровнем 60 °С либо 132 Гкал теплоты с температурным уровнем 50 °С. В то время как холодильная машина с R134a выдаст в течение месяца работы только 5,4 Гкал теплоты с температурным уровнем 50 °С.

ВЫВОДЫ

Современное состояние мирового хозяйства характеризуется растущей стоимостью энергетических ресурсов, неопределенностью и хаотизацией энергетических рынков. Существенное сокращение энергопотребления будет сопровождаться значительным падением уровня

жизни целых регионов. Холодильная промышленность и тесно связанный с ней агропромышленный сектор мировой экономики являются важными потребителями энергетических ресурсов, обеспечивающими в значительной степени качество жизни населения. В сложившихся условиях переход на энергосберегающие технологии, в том числе в агропромышленном секторе, является не только оправданным, но и необходимым. Развитие и внедрение промышленных углекислотных систем генерации холода способны значительно снизить уровень потребляемой холодопроизводящими системами электроэнергии. Кроме того, полезное использование теплоты, выделяемой холодильными машинами, позволяет значительно снизить потребление тепловых энергетических ресурсов.

Стимулирование эффективного использования энергетических ресурсов должно сопровождаться политикой государственного протекционизма, направленного в том числе на возрождение отечественного холодильного машиностроения. Однако если будем пытаться только возродить производство, основанное на устаревших технологических подходах, то будем обречены на воспроизводство «допотопных» технологий. Не пытаясь объять необъятное, следует сосредоточиться на технологиях, имеющих наибольшие перспективы для внедрения как с точки зрения политики импортозамещения, технологической независимости и продовольственной безопасности, так и энергетической эффективности и экологической безопасности. В холодильной технике таковыми, безусловно, являются углекислотные холодопроизводящие системы. 

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Statistical Review of World Energy 2021**. 70th edition [Электронный ресурс]: информационный ресурс bp. – Режим доступа: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2021-full-report.pdf>
2. **Statistical Review of World Energy 2022**. 71st edition [Электронный ресурс]: информационный ресурс bp. – Режим доступа: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf>
3. **ProFinance Service**. Online Trading [Электронный ресурс]: информационный ресурс ProFinance. – Режим доступа: <https://www.profinance.ru/charts/ttfusd1000/lca7h>
4. **Короткий, И.А.** Холодильное производство – состояние и перспективы развития отрасли в России/ И.А.Короткий, А.Н.Расщепкин// Молочная промышленность. 2022. № 8. С. 6–8.
5. **Лисицын, А.Б.** Анализ рисков холодильной цепи/ А.Б.Лисицын, В.С.Барабанщикова// Все о мясе. 2014. № 1. С. 36–37.
6. **Велюханов, В.И.** Энергосберегающие решения в системах хладоснабжения предприятий/ В.И.Велюханов, К.А.Коптелов// Переработка молока. 2012. № 8(154). С. 32–33.
7. **Цветков, О.Б.** Выбор холодильных агентов/ О.Б.Цветков [и др.]// Молочная промышленность. 2018. № 9. С. 21–22.
8. **Короткий, И.А.** Проектные решения схемы холодильной машины с утилизацией теплоты конденсации/ И.А.Короткий [и др.]// Холодильная техника. 2020. № 6. С. 30–33.
9. **Korotkiy, I.A.** The study of specific energy consumption in devices with controlled segregated flows/ I.A.Korotkiy [et al.]// IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: III International Scientific Conference: AGRITECH-III-2020: Agribusiness, Environmental Engineering and Biotechnologies. – Volgograd, Krasnoyarsk: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2020. P. 82070.