



# Выбор и оптимизация систем холодоснабжения зданий

**М. М. Бродач**, канд. техн. наук, профессор Московского архитектурного института (Государственной академии), вице-президент НП «АВОК», председатель комитета НП «АВОК» по техническому нормированию, стандартизации и сертификации

**А. С. Стронгин**, канд. техн. наук, зав. лабораторией НИИСФ РААСН, руководитель разработки рекомендаций АВОК «Выбор и оптимизация систем холодоснабжения зданий»

**Б. П. Харитонов**, канд. техн. наук, доцент, технический директор ООО «ДАИЧИ»

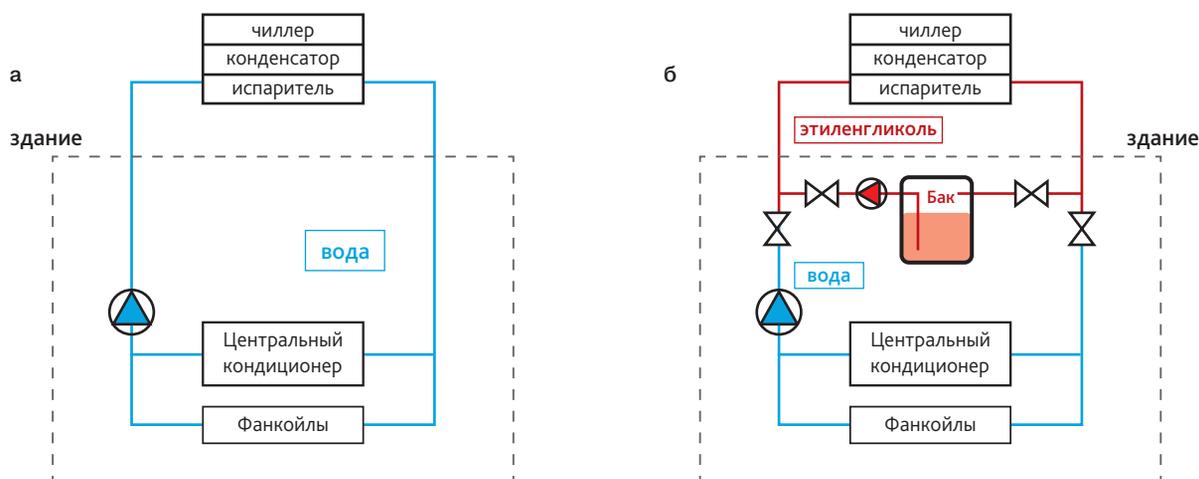
Рекомендации АВОК «Выбор и оптимизация систем холодоснабжения зданий» [1] разработаны творческим коллективом специалистов некоммерческого партнерства «Инженеры по отоплению, вентиляции, кондиционированию воздуха, теплоснабжению и строительной теплофизике» (НП «АВОК») в развитие положений СП 60.13330.2020 «СНиП 41-01-2003 Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха» для повышения энергетической эффективности, надежности и безопасности систем холодоснабжения зданий за счет оптимизации схемных решений и применения энергоэффективного, экологически безопасного оборудования [2].

Системы холодоснабжения применяют для обеспечения параметров микроклимата зданий, таких как торговые, офисные, многофункциональные центры, гостиницы, спортивные сооружения, медицинские организации – крупные потребители материальных и энергетических ресурсов; зданий транспортной инфраструктуры – аэропорты, железнодорожные, автобусные, морские вокзалы. Холодильная мощность систем может достигать нескольких тысяч киловатт, а их стоимость – десятков миллионов рублей.

Оптимизация систем холодоснабжения позволяет достигнуть экономии первоначальных затрат на их устройство, а также снизить потребление энерго-ресурсов в процессе эксплуатации на 15–25%.

## Выбор системы холодоснабжения

Выбор схемы системы холодоснабжения зависит от многих факторов и критериев оптимизации. В рекомендациях приведены наиболее распространенные схемы систем холодоснабжения с их краткой характеристикой, в т. ч. схемы с непосредственным охлаждением и промежуточным теплоносителем; с воздушным и водяным охлаждением конденсатора; с выносным конденсатором; с первичным и вторичным контурами охлаждения; с использованием естественного охлаждения (с фрикулингом) [3–8]. Дано описание, рассмотрены особенности и область применения указанных схем. В качестве примера приведена схема системы холодоснабжения с



■ Рис. 1. Схема ХМ с воздушным охлаждением конденсатора и одним первичным контуром с водой: а – теплый период года; б – холодный период года (консервация антифризом)

промежуточным теплоносителем, обеспечивающая минимальные капитальные затраты (рис. 1).

В такой схеме используются холодильные машины с воздушным охлаждением конденсатора и одним первичным контуром холодоснабжения на воде, а для зимнего периода предусмотрена консервация системы холодоснабжения с помощью антифриза.

Для выбора системы холодоснабжения из технически приемлемых для конкретного объекта схем рекомендуется на стадии предпроектных работ (без проведения подробных расчетов) использовать экспертную рейтинговую оценку систем холодоснабжения по выбранным критериям. В рекомендациях приведены рейтинги схем холодоснабжения по следующим критериям:

- капитальные (первоначальные) затраты на систему;
- цена жизненного цикла;
- капитальные затраты на стадии строительства Shell & Core;
- энергоэффективность – для систем, эксплуатируемых только в теплый период года либо круглогодично.

## Расчетные условия и экологическая эффективность системы холодоснабжения

Для расчета систем холодоснабжения и кондиционирования воздуха важен выбор расчетных параметров наружного климата и условий эксплуатации. От выбора значений этих параметров зависят как тепловая нагрузка на систему холодоснабжения и, соответственно, требуемая холодопроизводительность системы, так и холодопроизводительность холодильных машин в реальных условиях эксплуатации. В рекомендациях приведены условия выбора расчетных параметров

наружного климата с нормативной обеспеченностью (0,98, согласно СП 131.13330 [9]), а также с заданной обеспеченностью (по согласованию с заказчиком).

При выборе нормативных значений расчетных параметров наружного воздуха, например, для г. Сочи необеспеченность в отдельные годы может составить более 400 часов. Предлагается методика обоснованного выбора и согласования с заказчиком расчетных параметров наружного воздуха с любой желаемой степенью обеспеченности.

Важным фактором оптимизации систем холодоснабжения является режим их работы.

При стандартном проектировании подразумевается, что система холодоснабжения работает непрерывно, обеспечивая 24 часа в сутки комфортные условия в помещениях. Однако в реальной жизни систему холодоснабжения могут выключать в ночные часы и в нерабочие дни. В рекомендациях проанализировано, как будут меняться характеристики оборудования и комфортные условия в зависимости от режима эксплуатации системы холодоснабжения.

В рекомендациях приведены требования и методы расчета надежности, безопасности и экологической эффективности систем холодоснабжения по величине их вклада в глобальное потепление. Для оценки парникового эффекта вычисляют показатель полного эквивалентного вклада в парниковый эффект TEWI, сочетающий прямой вклад от выбросов хладагентов в атмосферу и косвенный вклад от выбросов парниковых газов, образующихся при выработке энергии, необходимой для работы холодильной системы в течение всего срока ее эксплуатации.

Применение показателя TEWI допускается для выявления наиболее эффективных способов снижения фактического воздействия холодильной системы на парниковый эффект, в т. ч.:

- минимизации величины заправки системы хладагентом, применения микроканальных теплообменников;
- проектирования/подбора холодильной системы и хладагента, в наибольшей степени приспособленных для конкретной системы охлаждения;
- оптимизации системы с целью повышения эффективности использования электроэнергии;
- соответствующего технического обслуживания для поддержания оптимальных показателей энергопотребления и предотвращения утечек хладагентов;
- регенерации и утилизации используемого хладагента;
- регенерации и утилизации используемой теплоизоляции.

Повышение энергетической эффективности системы – намного более действенное средство снижения парникового эффекта, чем уменьшение величины заправки хладагентом. Во многих случаях при уменьшении величины заправки хладагентом более эффективная холодильная система, заправленная хладагентом с более высоким потенциалом глобального потепления, может оказаться лучше с точки зрения негативного воздействия на окружающую среду, чем менее эффективная система, заправленная хладагентом с низким значением ПГП, но с повышенным потреблением энергии. Тем более когда выбросы сведены к минимуму: отсутствие утечки означает отсутствие прямого влияния на парниковый эффект.

Принятый Европейским союзом регламент применения фторсодержащих газов [10] означает, что вся отрасль должна перейти на новое поколение хладагентов, которые не только безопасны для озонового слоя, но и обладают очень низким ПГП. Например, для замены хладагента R134A разработаны хладагенты R450A (группа опасности A1), R513A (группа опасности A1), R1234ze (группа опасности A2L), а для замены R410A разработан R446A (группа опасности A2) и R32 (группа опасности A2L).

## Расчет энергетической и экономической эффективности систем холодоснабжения

В рекомендациях приводится метод расчета энергетической эффективности систем холодоснабжения. Значения показателей, получаемые при сертификационных испытаниях оборудования, не могут характеризовать энергоэффективность

всей системы холодоснабжения для конкретного объекта (с учетом профиля тепловой нагрузки и др. особенностей).

Энергоэффективность системы холодоснабжения предлагается оценивать показателем годовой энергоэффективности  $\mathcal{E}_Г$ , рассчитываемым по формуле

$$\mathcal{E}_Г = \frac{Q_X + Q_T}{Q_{Эл}}, \quad (1)$$

где  $Q_X$ ,  $Q_T$ ,  $Q_{Эл}$  – соответственно годовое количество произведенных холода, теплоты и затраченной электроэнергии, кВт·ч/год.

Исходные данные для расчета энергетической эффективности приведены в таблице.

Требуются расчеты следующих величин:

- ожидаемый профиль нагрузки (холод/теплота) на холодильное оборудование в зависимости от климатических условий и технологического назначения здания;
- текущая величина выработки холода и теплоты, а также энергопотребление (часовое, суточное), дифференцированное в соответствии с требованиями многотарифного учета электроэнергии;
- годовые затраты электроэнергии всеми потребителями холодильной станции (холодильная машина, гидромодуль, градирня, зональные охладители) в зависимости от характеристик и алгоритма управления оборудованием.

При пересчете тепловых нагрузок (нагрузок на систему холодоснабжения) в расход электроэнергии необходимо учитывать изменение величины холодильного коэффициента EER при изменении мощности холодильных установок во время работы и количество часов работы каждого вида оборудования холодильной системы, зависящего от принятого алгоритма управления.

Расчет показателя  $\mathcal{E}_Г$  – необходимое, но недостаточное условие для выбора оптимального варианта, поскольку неизвестно, какой ценой достигнута энергоэффективность.

Основным фактором выбора оптимальной конфигурации и опционального оснащения системы холодоснабжения является экономическая эффективность. Цель расчета экономической эффективности – оценка эффективности инвестиционных потоков. Выбирается базовый вариант с наименьшими первоначальными затратами и наибольшим годовым электропотреблением. Сравнимые варианты требуют дополнительных первоначальных затрат, которые снижают энергопотребление и трактуются как инвестиции в энергосбережение. Принята

Таблица

Исходные данные для расчета энергетической эффективности

Название	Обозначение, размерность	Расчетная формула	Примечание
Годовое количество произведенного холода	$Q_{Х}$ , кВт·ч/год	$\sum_{i=1}^n Q_{Хi} = \sum_{i=1}^n q_{Хi} \cdot \tau_{iХ}$	$\tau_{iХ}$ , $\tau_{iТ}$ , $\tau_{iЭл}$ – соответственно, количество часов работы оборудования, вырабатывающего холод, теплоту и потребляющего электроэнергию при $i$ -й БИН-температуре наружного воздуха, ч; $q_{Хi}$ , $q_{Ti}$ , $q_{Эли}$ – соответственно, текущая холодильная, тепловая или электрическая мощность оборудования при $i$ -й БИН-температуре наружного воздуха, кВт
Годовое количество произведенной теплоты (в режиме рекуперации и теплового насоса)	$Q_{Т}$ , кВт·ч/год	$\sum_{i=1}^m Q_{Ti} = \sum_{i=1}^m q_{Ti} \cdot \tau_{iT}$	
Годовое количество электроэнергии, затраченной всем оборудованием холодильной станции	$Q_{Эл}$ , кВт·ч/год	$\sum_{i=1}^{n+m} Q_{Эли} = \sum_{i=1}^{n+m} q_{Эли} \cdot \tau_{iЭл}$	

Где  $n$  – общее количество периодов в сезоне с  $i$ -й температурой наружного воздуха (зависит от диапазона изменения температуры наружного воздуха, в котором работает оборудование, и выбранного шага температур при расчете профиля тепловых нагрузок),

$$Q_{Хi} = q_{Хi} \cdot \tau_{iХ} \quad (2)$$

$Q_{Хi}$  – количество холода, выработанное всем холодильным оборудованием при  $i$ -й температуре наружного воздуха кВт·ч/год,  
 $q_{Хi}$  – средняя холодильная мощность каждой единицы оборудования (чиллер, градирня, гликолевый насос и т. п.) при  $i$ -й температуре наружного воздуха, кВт,

$\tau_{iХ}$  – количество часов работы каждой единицы оборудования при  $i$ -й температуре наружного воздуха, ч/год,

$$Q_{Эли} = q_{Эли} \cdot \tau_{iЭл} \quad (3)$$

$Q_{Эли}$  – количество электроэнергии, выработанное всем холодильным оборудованием при  $i$ -й температуре наружного воздуха, кВт·ч/год,

$q_{Эли}$  – средняя электрическая мощность каждой единицы оборудования при  $i$ -й температуре наружного воздуха, кВт,  
 $\tau_{iЭл}$  – количество часов работы каждой единицы оборудования при  $i$ -й температуре наружного воздуха, ч/год.

математическая модель непрерывного дисконтирования денежных инвестиционных потоков.

Для оценки экономической эффективности систем холодоснабжения необходимо определять следующие исходные данные:

- величину инвестиций  $K$  (первоначальных затрат);
- расчетное значение ежегодного промежуточного дохода  $\Delta Д$ ;
- расчетное значение нормы дисконта  $г$ ;
- срок эксплуатации системы холодоснабжения  $T_{сл}$ .

Основные показатели расчета экономической эффективности – чистый дисконтированный доход, дисконтированный срок окупаемости и индекс доходности.

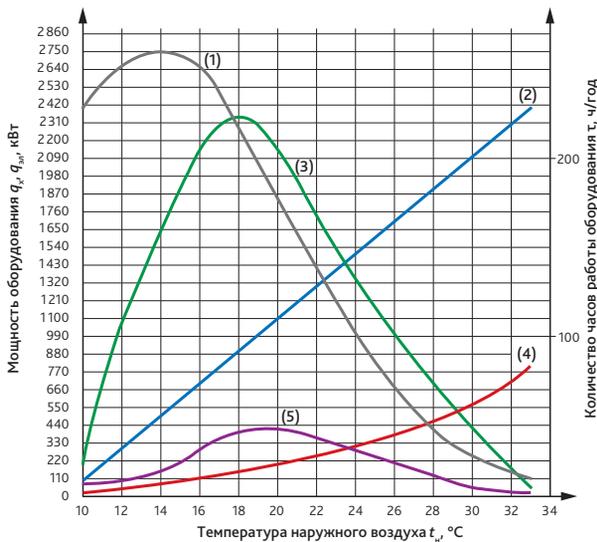
## Примеры расчета

Предложенные методические подходы проиллюстрированы примерами расчета.

В примере расчета годового потребления электроэнергии при выборе инверторных или центробежных холодильных машин используется зависимость холодильного коэффициента от температуры

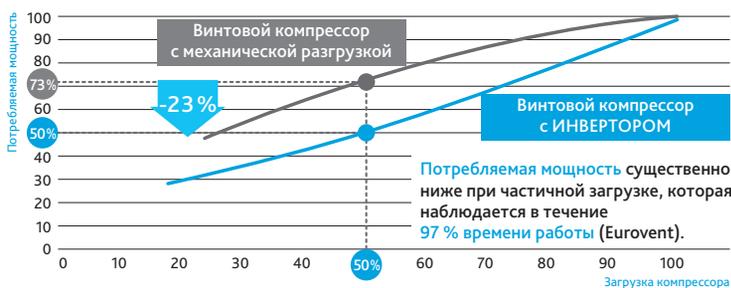
антифриза в конденсаторе. Температура антифриза, поступающего в конденсатор, определяется температурой наружного воздуха, принимаемой по результатам статистической обработки параметров наружного климата. Результаты расчетов показывают, что вариант с инверторными чиллерами с одновинтовыми компрессорами имеет более высокую годовую энергоэффективность и потребляет электроэнергии меньше на 12% по сравнению с центробежными чиллерами. Итог неожиданный для многих специалистов, привыкших к тому, что чиллеры с центробежными компрессорами самые энергоэффективные. Данный пример показывает большую важность объективного расчета потребления энергии с учетом реальных условий эксплуатации.

Второй пример расчета определяет энергетическую эффективность холодильной станции торгово-производственного комплекса с учетом годовых климатических данных. На рис. 2 графически представлены энергетические характеристики холодильной станции. Параметры наружного климата представлены кривой (1), характеризующей годовую длительность периода с данной БИН-температурой воздуха (ч/год). Профиль тепловой нагрузки упрощенно может быть представлен линейной



■ Рис. 2. Пример графического представления показателей энергоэффективности холодильной станции: (1) – годовая длительность периода с указанной БИН-температурой наружного воздуха, ч/год; (2) – линейный профиль нагрузки холодильного оборудования, кВт; (3) – выработка холода при заданной БИН-температуре, кВт·ч; (4) – текущее значение требуемой электрической мощности холодильной станции, кВт; (5) – суммарное потребление электроэнергии всем оборудованием холодильной станции при заданной БИН-температуре, кВт·ч

зависимостью (2). Максимальная холодильная мощность (2400 кВт) требуется при наружной температуре 33°C, минимальная (100 кВт) – при 10°C. Кривая (3) характеризует текущее значение выработки холода в соответствии с климатическими данными (1) и профилем тепловой нагрузки (2) (величина  $q_{Хи}$ , кВт·ч). Площадь под кривой (3) определяет общую годовую выработку холода  $q_{Тн}$  (кВт·ч/год). Текущие значения требуемой электрической мощности холодильной станции представлены кривой (4) ( $q_{Эли}$ , кВт), а текущие расходы электроэнергии – кривой (5) (величина  $Q_{Тн}$ , кВт·ч). Площадь под кривой (5) определяет общие годовые затраты электроэнергии  $\sum_{i=1}^m Q_{Ti} = \sum_{i=1}^m q_{Ti} \cdot t_{iT}$  (кВт·ч/год). Соотношение



■ Рис. 3. Потребляемая мощность при частичных нагрузках инверторного и стандартного компрессоров

площадей под кривыми (3) и (5) определяет значение коэффициента годовой энергоэффективности  $Q_{Эл}$ .

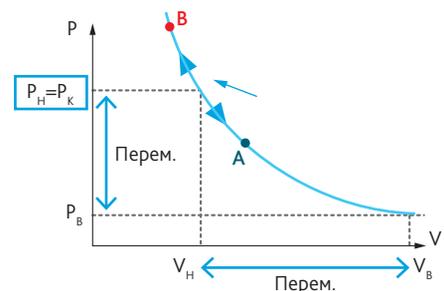
Данный пример показывает, что значение  $\sum_{i=1}^{n+m} Q_{Эли} = \sum_{i=1}^{n+m} q_{Эли} \cdot t_{iЭл}$  наиболее информативно характеризует энергоэффективность холодильной станции, поскольку позволяет учитывать реальные годовые климатические данные, суточный профиль тепловой нагрузки объекта и характеристики полного комплекта выбранного оборудования.

Приведен также пример сравнения вариантов схемных решений холодильной станции торгово-развлекательного центра холодильной мощностью 5 мВт. Выполнен расчет показателей экологической, энергетической и экономической эффективности. Выбран оптимальный вариант, имеющий наибольший показатель годовой энергоэффективности, наименьший дисконтированный срок окупаемости и наибольший индекс доходности.

Выполнен пример расчета экономической целесообразности опционального оснащения холодильной машины. Для проведения расчетов приняты данные на чиллеры с воздушным охлаждением конденсатора, инверторные, с полной и частичной рекуперацией теплоты в рекуператоре (с опцией нагрева воды для горячего водоснабжения), а также без рекуперации теплоты. Экономически оптимальным оказался вариант с частичной рекуперацией теплоты. Кроме того, рекуперация теплоты улучшает экологию благодаря сокращению выброса углекислого газа.

## Инновационные технологии

В справочных приложениях к рекомендациям дана классификация существующих систем холодоснабжения зданий, вариантов компоновки холодильного оборудования и потребителей холода. Рассмотрены основные способы повышения



■ Рис. 4. Технология переменной степени сжатия в одновинтовом компрессоре

эффективности систем холодоснабжения, приведены примеры новых инновационных технологий.

В качестве примера на рис. 3 показано снижение потребляемой электрической мощности при использовании инверторного компрессора по сравнению со стандартным при частичных нагрузках.

Рис. 4 иллюстрирует применение технологии переменной степени сжатия хладагента, позволяющей оптимизировать давление нагнетания и конденсации, повышая энергоэффективность работы компрессора.

Рекомендации АВОК «Выбор и оптимизация систем холодоснабжения зданий» позволят сократить риски принятия субъективных решений проектировщиками и заказчиками рассматриваемых систем при выборе оборудования, что особенно важно на крупных дорогостоящих объектах.

## Литература

1. Р НП «АВОК» 5.4.2-2021 «Выбор и оптимизация систем холодоснабжения зданий». – М.: АВОК-ПРЕСС, 2021.
2. Федеральный закон от 23.11.2009 № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».
3. Нестеренко А. В. Основы термодинамических расчетов вентиляции и кондиционирования воздуха. – М.: Высшая школа, 1971.
4. Баркалов Б. В., Карпис Е. Е. Кондиционирование воздуха в промышленных, общественных и жилых зданиях. – М.: Стройиздат, 1971.
5. Богословский В. Н., Кокорин О. Я., Петров Л. В. Кондиционирование воздуха и холодоснабжение. – М.: Стройиздат, 1985.
6. Кокорин О. Я. Современные системы кондиционирования воздуха. – М.: Физматлит, 2003.
7. Тарабанов М. Г. Кондиционирование воздуха. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2015.
8. 2014 ASHRAE Handbook. Refrigeration (SI).
9. СП 131.13330.2020 «СНиП 23-01-99\* Строительная климатология».
10. Регламент (ЕС) № 517/2014 Европейского парламента и Совета Европейского союза от 16.04.2014 «О фторсодержащих парниковых газах и аннулировании Регламента (ЕС)».

# РЕКОМЕНДАЦИИ НП «АВОК» 5.4.2-2021 «ВЫБОР И ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМ ХОЛОДОСНАБЖЕНИЯ ЗДАНИЙ»

