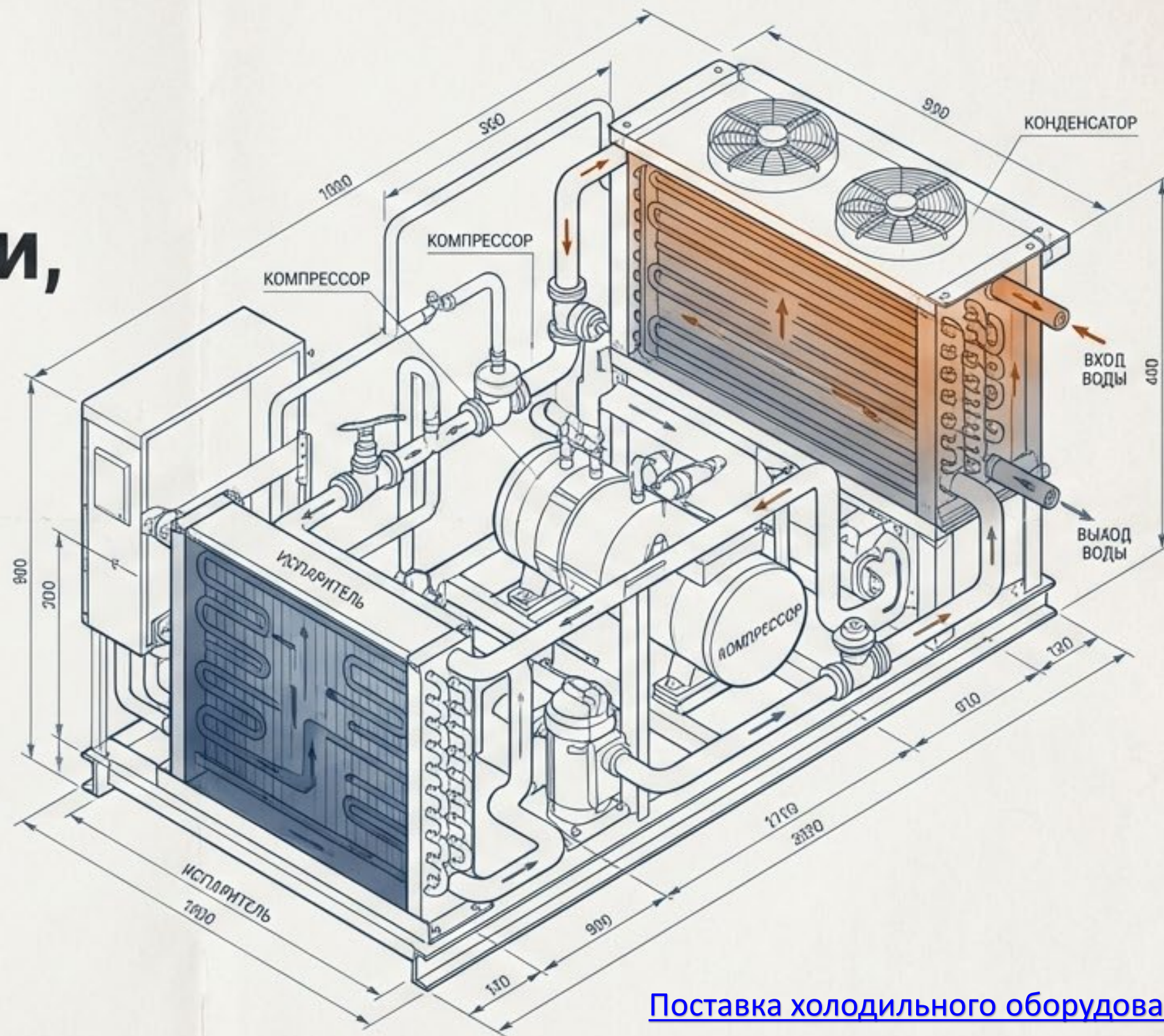


Архитектура промышленного холода: Технологии, эффективность, выбор

Стратегическое руководство
по проектированию систем
холодоснабжения для коммерческих,
промышленных и IT-объектов.



ОКТАБРЬ 2024 | ИНСТИТУТ ПРОМЫШЛЕННОГО ХОЛОДА



[Поставка холодильного оборудования](#)

Механика холода: Парокомпрессионный цикл

Испаритель

Жидкий хладагент кипит при низком давлении, отбирая тепло у контура (вода/гликоль охлаждается на 5-7°C).

Компрессор

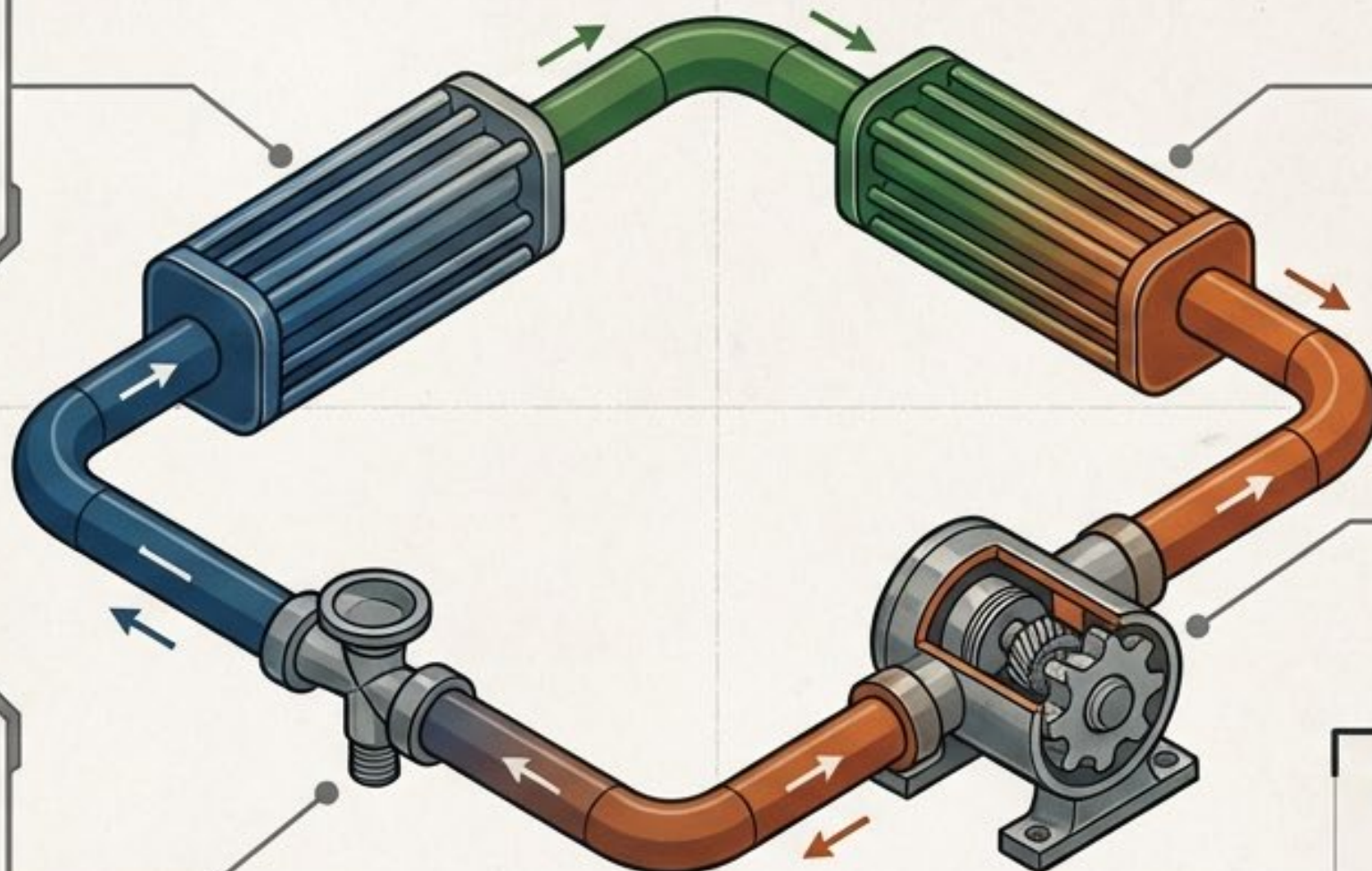
Сердце системы. Сжимает пар до 30+ атм, повышая температуру до 70-90°C. Главный потребитель энергии.

Конденсатор

Сброс тепла во внешнюю среду (воздух/вода). Газ превращается в жидкость.

ТРВ (Терморегулирующий вентиль)

Резкое снижение давления. Хладагент охлаждается и готов к новому циклу.



Эффективность системы

$$COP = \frac{Q_{cool}}{W_{comp}}$$

Коэффициент энергоэффективности (COP) варьируется от 2.5 до 6.5+.

[Поставка холодильного оборудования](#)

Сердце системы: Эволюция компрессоров



Битва титанов: Винтовые vs. Центробежные

График энергоэффективности (COP)



Суммарный расход электроэнергии:

Кейс: 650 тонн, 4 месяца эксплуатации

Профиль нагрузки объекта:

- 100% (2.3% времени)
- 75% (41.5% времени)
- 50% (46.1% времени)
- 25% (10.1% времени)

Экономия
операционных затрат
(ОРЕХ) до 15% в пользу
винтовых машин при работе
на частичных нагрузках.

Винтовой чиллер

239,884 кВт·ч

Центробежный чиллер

276,719 кВт·ч

Следующий уровень: Безмасляные компрессоры (Magnetic Bearing)

Отсутствие механического трения

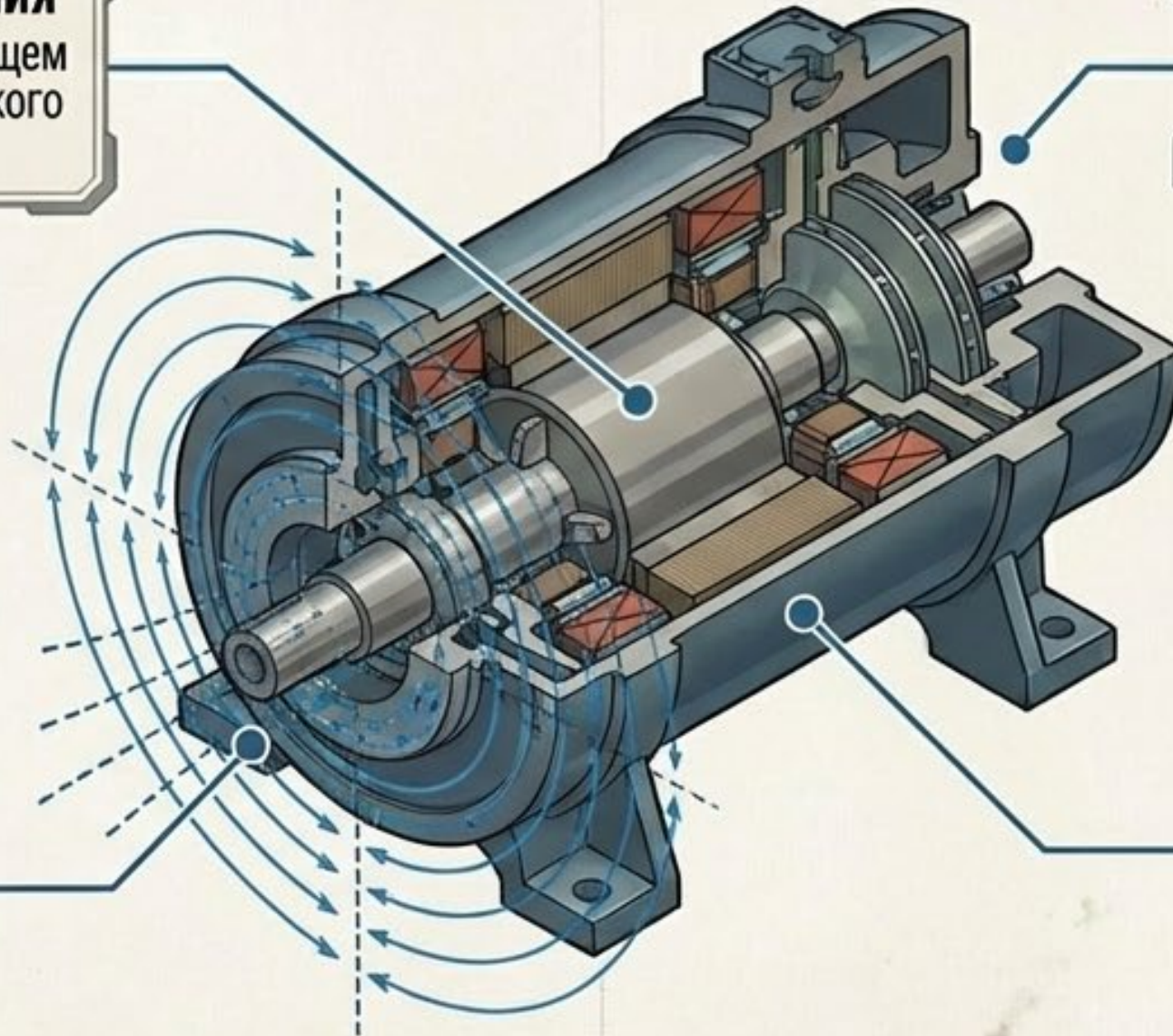
Вращение вала происходит в левитирующем магнитном поле. Львиная доля физического износа полностью исключена.

Безмасляная система

Нет необходимости в масляных фильтрах, подогревателях картера и регулярной замене масла. Повышает теплообмен в испарителе, так как масло не оседает на трубках.

Акустический комфорт

Практически бесшумная работа в сравнении с традиционными центробежными аналогами за счет отсутствия трущихся деталей.



Ювелирная точность VFD

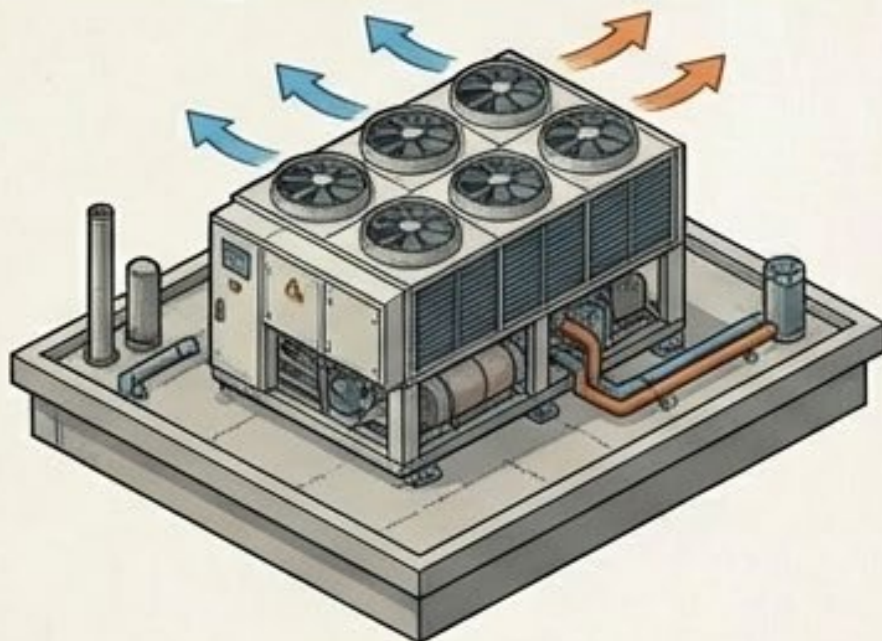
Встроенный частотно-регулируемый привод позволяет максимально точно отрабатывать любые частичные нагрузки.

Архитектурный компромисс

Технология требует самых высоких капитальных затрат (CAPEX) на рынке, но обеспечивает рекордно низкий OPEX и минимальную совокупную стоимость владения (TCO).

Архитектура сброса тепла: Воздух или Вода?

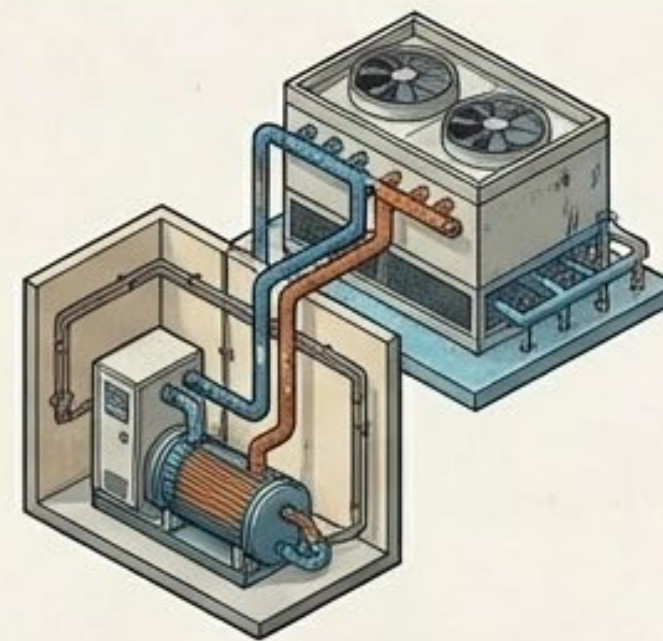
Воздушное охлаждение



Капитальные затраты:	⚙️⚙️⚙️⚙️⚙️	(Низкие)
Занимаемая площадь:	⚙️⚙️⚙️⚙️⚙️	(Большая)
Сложность ТО:	⚙️⚙️⚙️⚙️⚙️	(Низкая)
Энергоэффективность:	⚙️⚙️⚙️⚙️⚙️	(Средняя)

- **Концепт:** Моноблок для наружной установки (или система с выносным конденсатором).
- **Ограничения:** COP падает при температуре воздуха $> +35^{\circ}\text{C}$. Зимой существует риск замерзания воды, требуется использование гликолевых смесей.

Водяное охлаждение



Капитальные затраты:	⚙️⚙️⚙️⚙️⚙️	(Высокие)
Занимаемая площадь чиллера:	⚙️⚙️⚙️⚙️⚙️	(Минимальная)
Сложность ТО:	⚙️⚙️⚙️⚙️⚙️	(Высокая, требуется водоподготовка)
Энергоэффективность:	⚙️⚙️⚙️⚙️⚙️	(Высокая)

- **Концепт:** Кожухотрубный конденсатор внутри здания + выносной драйкулер или градирня.
- **Преимущества:** Охлаждающая вода стремится к температуре мокрого термометра, что радикально снижает рабочее давление конденсации.

Аномалия термодинамики: Абсорбционные чиллеры (АБХМ)

Базовый принцип

Полная замена энергоемкого механического компрессора на термохимический процесс. Рабочий хладагент — дистиллированная вода. Абсорбент — бромид лития (LiBr).

Шаги термодинамического цикла:

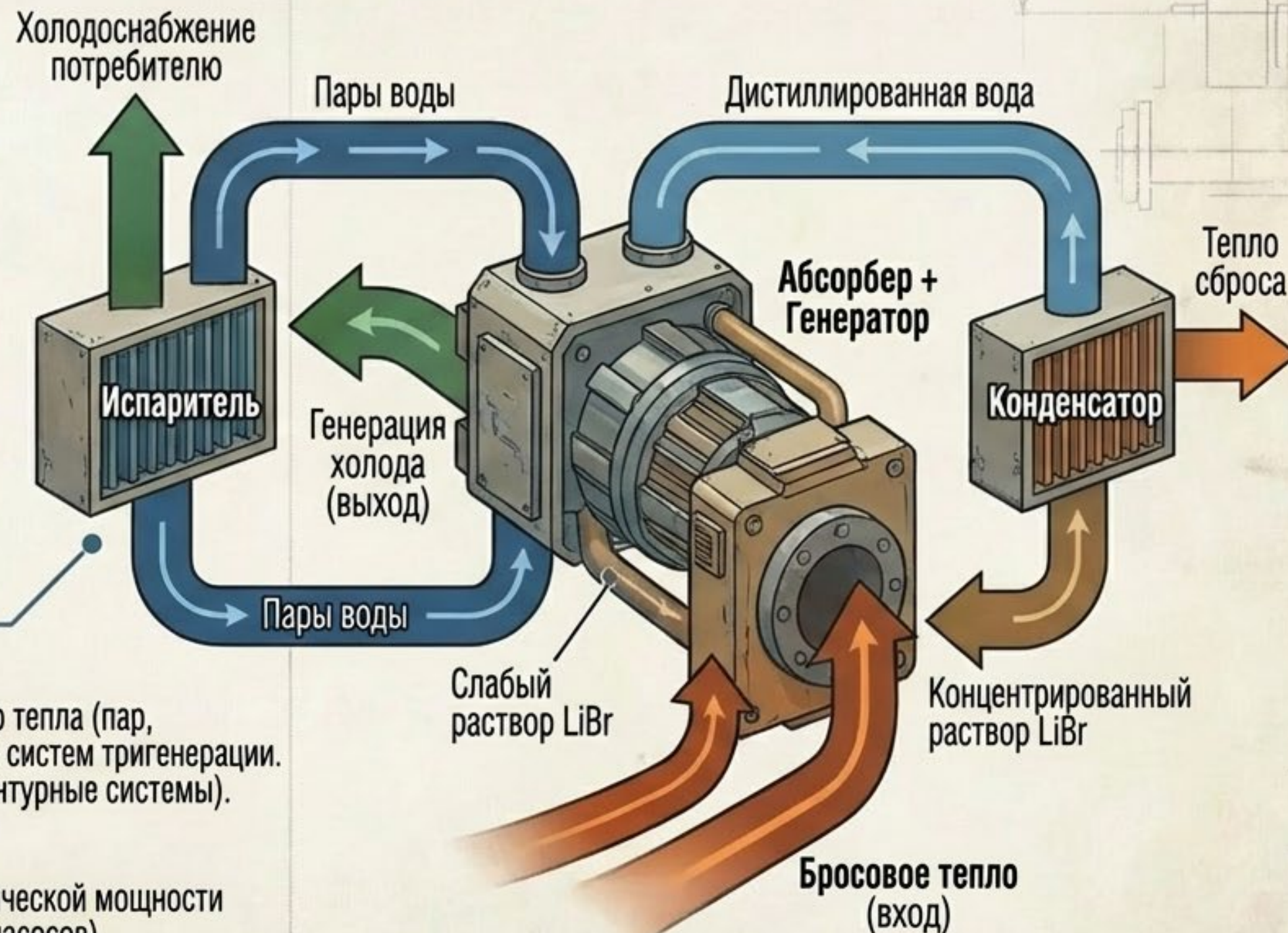
1. Кипение воды в глубоком вакууме (отбор тепла от потребителя).
2. Поглощение паров воды концентрированным бромидом лития.
3. Выпаривание воды из слабого раствора за счет внешнего источника бросового тепла (восстановление LiBr).

Идеальный профиль применения

Предприятия с избытком технологического бросового тепла (пар, горячая вода, выхлопные газы). Основа современных систем тригенерации. Тепловой COP: от 0.6 (одноконтурные) до 1.4 (двухконтурные системы).

Математика выгоды

Генерация 1 МВт холода требует всего 15 кВт электрической мощности (затраты исключительно на работу циркуляционных насосов).



Фрикулинг: Взлом системы с помощью естественного холода

Использование низкотемпературного наружного воздуха для прямого или косвенного охлаждения теплоносителя в обход механического компрессора.

Лето: $> 20^{\circ}\text{C}$



Компрессорный режим

100% тепловой нагрузки ложится на компрессор. Система фрикулинга полностью отключена.



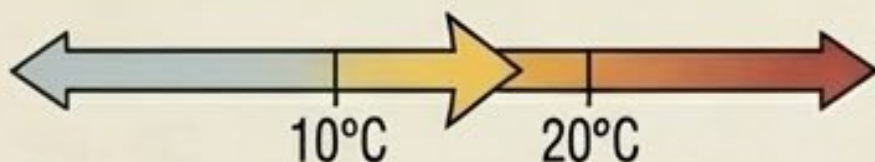
ВКЛ



ВКЛ

Компрессор: **ВКЛ** | Вентилятор: **ВКЛ**

Межсезонье: $10^{\circ}\text{C} - 20^{\circ}\text{C}$



Смешанный режим (Частичный фрикулинг)

Вода предохлаждается атмосферным воздухом в дополнительном теплообменнике. Компрессор лишь дожимает температуру до уставки. Нагрузка снижена.



ЧАСТИЧНО



ВКЛ

Компрессор: **ЧАСТИЧНО** | Вентилятор: **ВКЛ**

Зима: $< 10^{\circ}\text{C}$



100% Фрикулинг

Компрессоры полностью остановлены. Работают исключительно вентиляторы драйкулеров. Максимальная экономия ресурса и энергии.



ВЫКЛ



ВКЛ

Компрессор: **ВЫКЛ** | Вентилятор: **ВКЛ**

Возможная архитектура: Прямой (подача воздуха с улицы), Косвенный (встроенный теплообменник фрикулинга), Раздельный (внешний драйкулер).

Экономика естественного холода (ROI)

Вводные данные кейса

(Промышленный ЦОД / Производство):

Удорожание оборудования с системой фрикулинга (CAPEX): +3,000,000 руб.

Энергопотребление стандартной системы: 1,200,000 кВт·ч/год

Снижение расхода энергии за счет фрикулинга (на 40%): до 720,000 кВт·ч/год

Тариф на электроэнергию: 5 руб. / кВт·ч

Финансовый расчет:

Сэкономленная энергия: 480,000 кВт·ч/год

Финансовая экономия (OPEX): 2,400,000 руб./год

Срок окупаемости инвестиций (ROI):
1.25 года

Анализ окупаемости инвестиций (Waterfall Chart)



Ключевой вывод

В регионах с холодным климатом (4-6 месяцев зимы и межсезонья) фрикулинг гарантированно снижает годовые энергозатраты на 30–50% и радикально продлевает моторесурс компрессоров.

Охлаждение Mission Critical: Центры Обработки Данных

Стандарты микроклимата (ASHRAE / TIA-942):

Температура на входе в стойки:
 $+18...+27^{\circ}\text{C}$ (до $+32^{\circ}\text{C}$ при малых нагрузках)

Относительная влажность:
40–55%

Скорость воздушного потока:
1.5–3 м/с

Ключевые отличия от комфортного кондиционирования:

Непрерывная работа 24/7/365, нулевая толерантность к простоям, сверхвысокая плотность тепловыделения на квадратный метр.



Архитектура отвода тепла:

CRAN (Chiller Room Air Handler):
Чиллер охлаждает воду, вода подается в прецизионные фанкойлы внутри машинного зала.

CRAC (Computer Room Air Conditioner):
Фреоновые системы непосредственного расширения.

Метрика эффективности (PUE)

Цель современных ЦОД — снизить Power Usage Effectiveness ниже 1.2 за счет обязательного применения прямого или косвенного фрикулинга.

Экологический императив: Трансформация рынка хладагентов

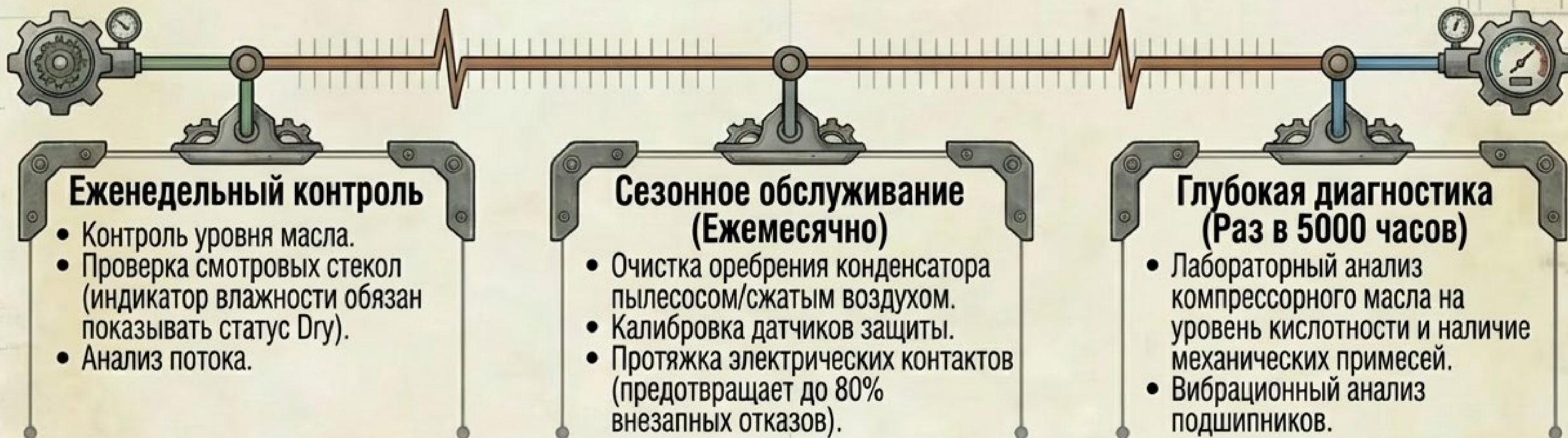
Контекст регуляторики: Кигалийская поправка и жесткие нормы F-Gas диктуют обязательный отказ от HFC-хладагентов с высоким потенциалом глобального потепления (GWP).

Сравнительная матрица рабочих веществ:

Хладагент	Статус	GWP (Парниковый потенциал)	Безопасность	Перспектива
R134a	Уходящий стандарт	1430	A1 (негорючий)	Выводится из обращения
R1234ze	Выбор для винтовых/спиральных компрессоров	< 1 (HFO-класс)	A2L (слабогорючий)	Future-proof. Требуется компрессоры большего объема.
R1233zd	Выбор для центробежных машин	≈ 1	A1 (негорючий)	Оптимально для систем низкого давления.
R290 (Пропан) / R717 (Аммиак)	Природные хладагенты	3 / 0	A3 (горючий) / Токсичный	Высший COP, но требуют специальных мер инженерной защиты.

Жизненный цикл и предиктивное обслуживание

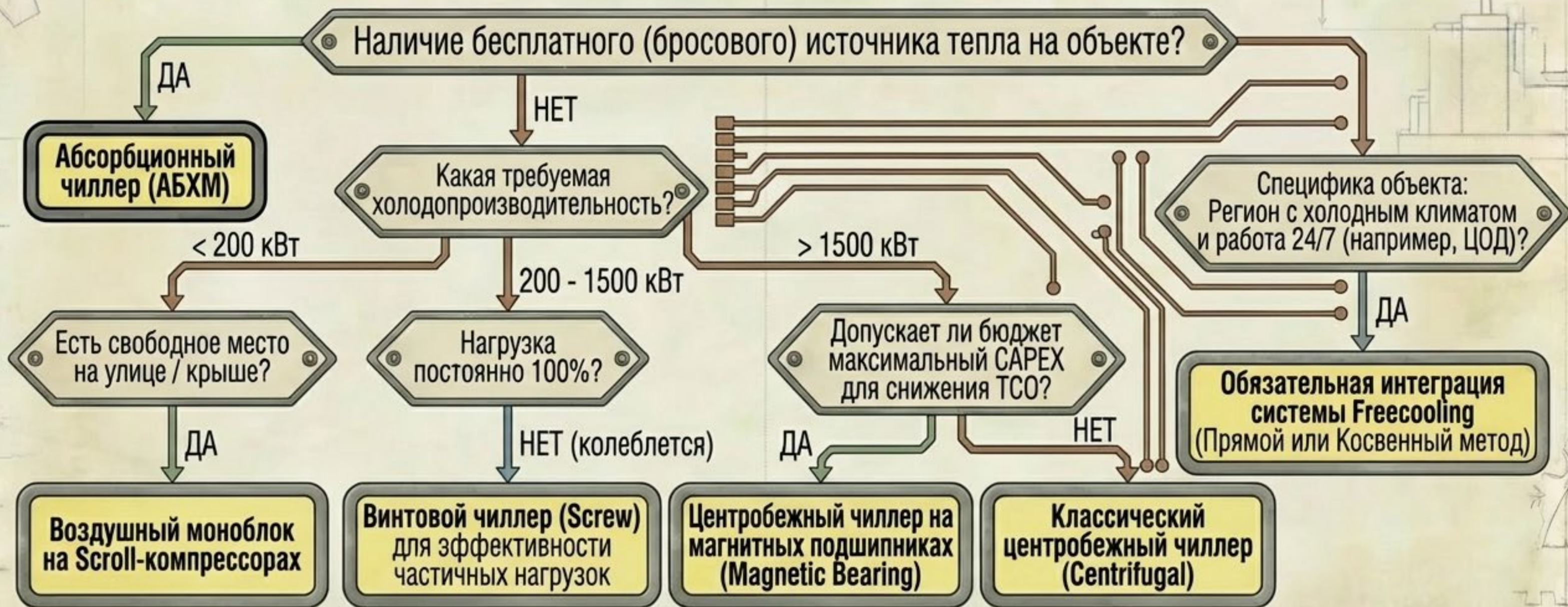
Срок службы промышленного чиллера составляет 15–25 лет при строгом соблюдении температурных графиков и регламента ТО.



Умный чиллер (Интеграция SCADA)

Современные микропроцессорные контроллеры не только точно держат температурную уставку, но и предиктивно блокируют работу системы при малейшем риске замерзания испарителя (Low pressure) или опасном перегреве конденсатора (High pressure).

Синтез: Матрица выбора идеальной архитектуры



Выбор чиллера — это тонкая балансировка между начальными инвестициями (CAPEX), **доступным пространством**, акустическими требованиями и динамическим профилем тепловой нагрузки.

Энергетическая стратегия, а не просто оборудование

Холодоснабжение окончательно переходит от грубой механической компрессии к интеллектуальному управлению тепловой энергией.

Три столпа будущего индустрии:

1. Безмасляные магнитные технологии с нулевым трением.
2. Предиктивная аналитика и бесшовная интеграция в SCADA-системы.
3. HFO-хладагенты с абсолютно нулевым влиянием на глобальный климат.

Эффективная архитектура искусственного холода превращает неизбежные инфраструктурные издержки в измеримое конкурентное преимущество объекта.

WWW.PROMHOLOD-ARCH.RU | INFO@PROMHOLOD-ARCH.RU

