

ОПТИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ VRF-СИСТЕМ В УНИКАЛЬНЫХ ЗДАНИЯХ

Отанов Ёркинбек Собир угли

Ташкентский архитектурно-строительный университет, магистрант 1-го курса
специальности «Инженерные коммуникационные системы, строительство и монтаж».

<https://doi.org/10.5281/zenodo.22754878>

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы повышения энергоэффективности систем с переменным расходом хладагента (VRF/VRV) при их интеграции в уникальные архитектурные объекты — высотные комплексы, исторические реконструируемые здания, музеи и сооружения со сложной геометрией фасадов.

Проанализированы ключевые термодинамические ограничения, проблемы потери производительности при значительных эквивалентных длинах трасс и перепадах высот, а также эффективность применения рекуперации тепла (3-трубные системы).

Предложены математические модели оценки сезонов и методы интеллектуального управления на базе искусственного интеллекта и интеграции с BMS.

Ключевые слова: VRF-системы, энергоэффективность, уникальные здания, рекуперация тепла, коэффициент EER/COP, интеграция с BMS, холодильный цикл, инверторный компрессор.

Введение. Современное гражданское и промышленное строительство характеризуется ростом доли уникальных архитектурных объектов. К категории уникальных зданий относятся высотные сооружения (высотой более 100 метров), объекты с пролетами более 100 метров, здания с развитой подземной частью, а также объекты культурного наследия и музеи с жестко регулируемым микроклиматом. Обеспечение нормативного микроклимата в таких объектах представляет собой сложную инженерно-техническую задачу.

Системы кондиционирования воздуха с переменным расходом хладагента (VRF / Variable Refrigerant Flow) за последние два десятилетия заняли лидирующие позиции в сегменте коммерческой и элитной жилой недвижимости. Это обусловлено их высокими эксплуатационными показателями, гибкостью зонирования и возможностью точного поддержания целевой температуры в каждом отдельном помещении. Однако применение VRF-систем в уникальных зданиях сталкивается с рядом существенных физических и технологических барьеров.

Специфические трудности: Среди ключевых факторов, осложняющих функционирование VRF-систем в уникальных зданиях, следует выделить:

- Значительные перепады высот между наружными и внутренними блоками (до 90–110 м), а также суммарная длина фреоновых трасс, превышающая 1000 м.
- Неравномерность инсоляции и тепловой нагрузки в зданиях со сложным остекленным фасадом, вызванная движением солнца в течение дня.
- Строгие требования к сохранению фасадов в исторических объектах, что исключает классическое размещение наружных блоков на внешних стенах.
- Жесткие акустические нормы и ограничение вибрационных нагрузок в залах музеев, картинных галерей и акустических филармоний.

Основная часть. Энергетическая эффективность VRF-системы напрямую зависит от термодинамических параметров Refrigerant Cycle (холодильного цикла). В качестве показателей сезонной эффективности используются коэффициенты SEER (Seasonal Energy Efficiency Ratio) и SCOP (Seasonal Coefficient of Performance). В идеальных условиях холодильный коэффициент COP определяется отношением полезно полученной теплоты (или холода) к затраченной механической работе компрессора:

$$COP = \frac{Q_{\text{холод}}}{N_{\text{эл}}} = \frac{(q_0)}{(h_2 - h_1)}$$

где q_0 — удельная холодопроизводительность $\left[\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right]$, а $(h_2 - h_1)$ — удельная работа сжатия хладагента в компрессоре $\left[\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right]$. При увеличении длины трубопроводов в уникальных зданиях возникают дополнительные гидравлические потери давления $\Delta P_{\text{гидр}}$.

Потеря давления во всасывающем трубопроводе приводит к снижению давления кипения P_0 и, следовательно, к падению температуры кипения T_0 . Падение температуры кипения всего на 1 °C снижает энергоэффективность компрессора примерно на 2–3%.

При размещении наружного блока на крыше высотного здания, а внутренних блоков — на нижних этажах, возникает значительный гидростатический столб жидкости. Давление жидкого хладагента в жидкостной магистрали увеличивается с глубиной под действием силы тяжести по формуле:

$$\Delta P_{\text{гидростат}} = \rho_{\text{жидк}} \cdot g \cdot \Delta H$$

где $\rho_{\text{жидк}}$ — плотность жидкой фазы хладагента $\left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}\right]$, g — ускорение свободного падения $\left[\frac{\text{м}}{\text{с}^2}\right]$, ΔH — перепад высоты [м]. При расположении наружного блока внизу здания (в техническом подвале) происходит противоположный процесс: давление жидкого хладагента при подъеме на верхние этажи падает, что может вызвать его преждевременное вскипание (вскипание флеш-газа) до попадания в электронный расширительный клапан (EEV). Это приводит к резкому снижению производительности EEV и нарушению работы всей системы.

Для нейтрализации негативных факторов в уникальных зданиях применяются специализированные технические и архитектурно-инженерные решения.

В зданиях с панорамным остеклением в весенний и осенний периоды восточный и южный фасады требуют интенсивного охлаждения из-за солнечной радиации, тогда как северный фасад и внутренние зоны требуют отопления. Классические 2-трубные VRF-системы могут работать только в одном режиме (либо охлаждение, либо нагрев).

Применение 3-трубных систем с блоками-распределителями (BS-блоками) позволяет перенаправлять тепловую энергию, поглощенную в охлаждаемых помещениях, не во внешний конденсатор, а непосредственно во внутренние блоки помещений, требующих обогрева. В этом случае суммарный коэффициент эффективности системы (Integrated Coefficient of Performance, ICOP) достигает существенных величин:

$$ICOP = \frac{(Q_{\text{охлаждения}} + Q_{\text{нагрева}})}{N_{\text{потребляемая}}} \geq 7.0 \dots 9.5$$

Ниже приведено сравнение параметров классических систем 'Чиллер-Фанкойл' и современных 3-трубных VRF-систем с рекуперацией тепла:

Параметр сравнения	Система Чиллер-Фанкойл	2-Трубная VRF-система	3-Трубная VRF с рекуперацией
Сезонный EER / SEER	2.8 – 3.5	4.2 – 5.0	6.5 – 8.8 (при рекуперации)
Гибкость монтажа трасс	Ограничена (большие диаметры)	Высокая (медные трубы 15-35 мм)	Высокая (3 трубы + BS-блоки)
Занимаемая площадь Венткамер	Высокая (насосные группы)	Минимальная	Минимальная
Срок окупаемости (Payback)	Базовый уровень	2.5 – 3.5 года	1.8 – 2.5 года

Максимальная энергоэффективность VRF-систем в уникальных зданиях достигается за счет использования алгоритмов плавающей температуры кипения и конденсации (Variable Evaporating Temperature / Variable Condensing Temperature - VET/VCT).

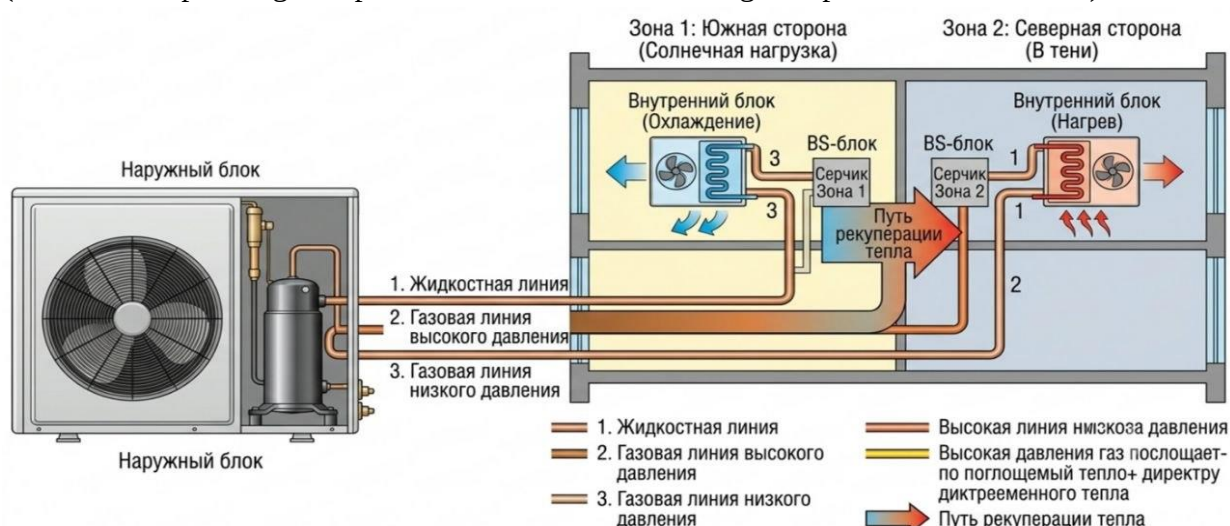


Рис. 1. Принципиальная схема работы 3-трубной VRF-системы с рекуперацией тепла в режиме одновременного охлаждения и нагрева зон.

В традиционных системах температура кипения хладагента T_0 поддерживается константной (например, $+6\text{ }^{\circ}\text{C}$) независимо от текущей тепловой нагрузки. При интеграции с интеллектуальной системой управления BMS (Building Management System) контроллер оценивает разность между целевой и фактической температурой воздуха в помещениях.

При частичной нагрузке целевая температура кипения автоматически повышается до $+10...+12\text{ }^{\circ}\text{C}$. Это снижает работу сжатия компрессора и обеспечивает экономию электроэнергии до 25–30% в годовом исчислении.

Динамический алгоритм: Алгоритм динамического изменения параметров описывается функцией:

$$T_{\text{кип}}(t) = T_{\text{кип, баз}} + \alpha \cdot (T_{\text{возд, факт}}(t) - T_{\text{возд, устав}})$$

где α — пропорциональный коэффициент адаптации системы, зависящий от влажностного режима и динамики изменения теплопритоков.

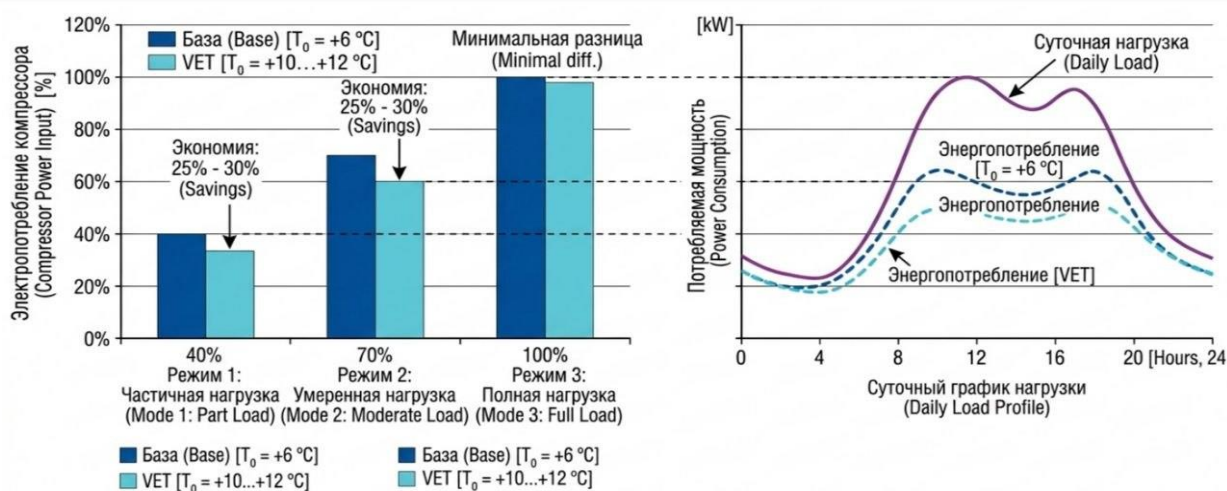


Рис. 2. Сравнительный график энергопотребления системы при фиксированной ($T_0 = +6\text{ °C}$) и плавающей (VET/VCT) температуре кипения хладагента в зависимости от нагрузки.

Заключение. Оптимизация энергоэффективности VRF-систем в уникальных зданиях требует комплексного инженерного подхода, начинающегося на стадии эскизного проектирования. Использование трехтрубных систем с рекуперацией тепла, грамотная компенсация потерь давления в протяженных фреоновпроводах и применение интеллектуальных алгоритмов управления (VET/VCT) позволяют снизить суммарное энергопотребление объекта на 30–45%.

Интеграция VRF-систем в единую цифровое пространство здания (BMS / Digital Twin) обеспечивает не только минимальные эксплуатационные расходы, но и существенно продлевает ресурс компрессорного оборудования за счет оптимизации циклов пуска и останова.

Список литературы

1. Ананьев В. А., Баканов М. А. Системы кондиционирования воздуха с переменным расходом хладагента (VRF-системы). — М.: Евроклимат, 2021. — 320 с.
2. ASHRAE Handbook — HVAC Systems and Equipment. Variable Refrigerant Flow Systems. Chapter 18, 2020.
3. Степанов С. П. Энергоэффективность климатических систем высотных и уникальных зданий // АВОК. — 2022. — № 4. — С. 18–25.
4. ISO 15042:2017. Multiple split-system air-conditioners and air-to-air heat pumps — Testing and rating for performance.
5. ASHRAE Handbook — HVAC Systems and Equipment. Variable Refrigerant Flow Systems. Chapter 18. — Atlanta: ASHRAE, 2020. — 912 p.
6. Ананьев В. А., Баканов М. А. Системы кондиционирования воздуха с переменным расходом хладагента (VRF-системы). — М.: Евроклимат, 2021. — 320 с.
7. Беккер В. Г. Системы вентиляции и кондиционирования воздуха высотных зданий. — М.: АВОК-ПРЕСС, 2019. — 256 с.
8. Кокорин О. Я. Энергосберегающие системы кондиционирования воздуха. — М.: Издательство АСВ, 2018. — 288 с.

9. Сотников А. Г. Проектирование и эксплуатация систем вентиляции и кондиционирования воздуха: В 2-х томах. — СПб.: ООО «Издательство "СпецЛит"», 2020. — Т. 1. — 415 с.
10. Гусев В. П., Сидоров И. В. Акустическая безопасность и энергоэффективность мультизональных VRF/VRV-систем. — М.: Стройиздат, 2021. — 198 с.
Научные статьи и периодические издания:
11. Степанов С. П. Энергоэффективность климатических систем высотных и уникальных зданий // АВОК. — 2022. — № 4. — С. 18–25.