

Методика расчёта VRF-систем для помещений с неравномерным тепловым режимом

Опубликовано в журнале СОК №11 | 2017

Технический директор «Компания МЭЛ», svbruh@ya.ru

Брух С.В.

УДК 697.911

Методика расчёта VRF-систем для помещений с неравномерным тепловым режимом

С. В. Брух, технический директор ООО «Компания МЭЛ», технический редактор журнала С.О.К.

Рассмотрены существующие методики расчёта VRF-систем кондиционирования воздуха. Сделан вывод о допустимости применения существующих методик только для объектов кондиционирования с равномерным тепловым режимом. Для объектов с неравномерным тепловым режимом разработана математическая модель функционирования VRF-систем и их методика расчёта. Приведены рекомендации для выбора расчётного коэффициента неодновременности теплоизбытков разных типов зданий.

Ключевые слова: VRF-системы, методика расчёта, коэффициент неодновременности.

UDC 697.911

Method for calculating VRF-systems for rooms with non-uniform thermal conditions

S. V. Bruh, technical director of "MEL Company", LLC., technical editor of the S.O.K. Magazine [Journal of Plumbing. Heating. Ventilation]

Existing methods for calculating VRF air conditioning systems are considered. A conclusion is made about the admissibility of the application of existing techniques only for air conditioning facilities with uniform thermal conditions. For objects with uneven thermal conditions, a mathematical model for the functioning of VRF-systems and their calculation methodology has been developed. Recommendations are given for choosing the design non-simultaneity coefficient for the heat excess of different types of buildings.

Keywords: VRF-system, calculation method, non-simultaneity factor.

Рассмотрены существующие методики расчёта VRF-систем кондиционирования воздуха. Сделан вывод о допустимости применения существующих методик только для объектов кондиционирования с равномерным тепловым режимом. Для объектов с неравномерным тепловым режимом разработана математическая модель функционирования VRF-систем и их методика расчёта. Приведены рекомендации для выбора расчётного коэффициента неодновременности теплоизбытков разных типов зданий.

Методики подбора оборудования систем кондиционирования воздуха с переменным потоком хладагента (Variable Refrigerant Flow, VRF), изложенные в фирменных каталогах различных производителей, незначительно отличаются друг от друга, но фактически подобны. Традиционный процесс подбора подразделяется на несколько этапов [1].

1. Выбор типоразмера внутреннего блока

На основании явных или полных теплоизбытков обслуживаемых помещений, температуры внутреннего воздуха, температуры наружного воздуха выбирается по таблицам внутренний блок с ближайшей большей холодопроизводительностью Q_T (табл. 1).

❖ Полная производительность внутреннего блока*

табл. 1

Наружная / внутренняя температуры, °C	20	23	24	26	27	28	30	32
10	2,4	2,7	3,0	3,3	3,6	3,9	4,5	4,8
15	2,4	2,7	3,0	3,3	3,6	3,9	4,5	4,8
20	2,4	2,7	3,0	3,3	3,6	3,9	4,5	4,7
25	2,4	2,7	3,0	3,3	3,6	3,9	4,5	4,6
30	2,4	2,7	3,0	3,3	3,6	3,9	4,3	4,4
35	2,4	2,7	3,0	3,3	3,6	3,9	4,1	4,2
40	2,4	2,7	3,0	3,3	3,6	3,8	4,0	4,0

❖ Производительность наружного блока AJH072L FG*

табл. 2

Наружная / внутренняя температуры, °C	20	23	24	26	27	28	30
10	14,8	16,7	18,6	20,5	22,4	24,3	28,1
15	14,8	16,7	18,6	20,5	22,4	24,3	28,1
20	14,8	16,7	18,6	20,5	22,4	24,3	27,7
25	14,8	16,7	18,6	20,5	22,4	24,3	27,2
30	14,8	16,7	18,6	20,5	22,4	24,3	26,3
35	14,8	16,7	18,6	20,5	22,4	24,2	25,2
40	14,8	16,7	18,6	20,5	22,4	23,1	24,1

* Красным цветом выделена номинальная производительность (при стандартных условиях).

2. Выбор типоразмера наружного блока

Суммируются номинальные холодопроизводительности внутренних блоков (или их индексы). По данной сумме выбирается наружный блок системы таким образом, чтобы номинальная холодопроизводительность всех внутренних блоков составляла меньше чем 130 % от номинальной холодопроизводительности наружного блока (для некоторых производителей VRF-систем на 150–200 %):

$$Q_{\text{нап.ном}} \geq \frac{\sum Q_{\text{вн.ном}}}{1,3}. \quad (1)$$

3. Определение фактической производительности наружного блока

В зависимости от суммы номинальной холодопроизводительности внутренних блоков (суммы их индексов), температуры наружного воздуха, температуры внутреннего воздуха по таблицам определяется фактическая производительность наружного блока (табл. 2). Номинальная производительность задаётся при температуре снаружи +35 °C и температуре влажного термометра внутри +19 °C.

4. Уточнение производительности внутренних блоков

Фактическая производительность внутреннего блока определяется по формуле:

$$Q_{\text{вн.факт}} = \frac{Q_{\text{вн.ном}} Q_{\text{нар.факт}} K_L}{\sum Q_{\text{вн.ном}}}, \quad (2)$$

где K_L — коэффициент уменьшения мощности внутреннего блока в зависимости от длины и перепада высот соединительных трубопроводов между наружным и внутренним блоком.

Если $Q_{\text{вн.факт}}$ меньше теплоизбытков в помещении, производится увеличение типоразмера внутреннего блока и пересчитывается вся система.

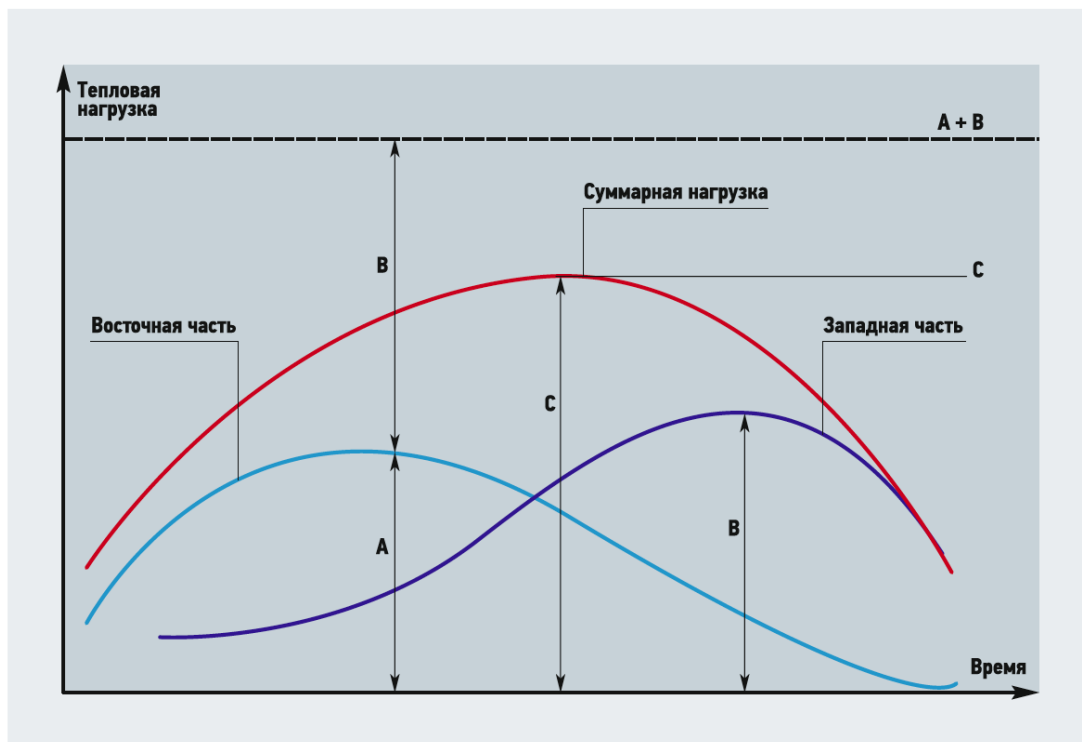
Повторюсь, данная методика используется практически во всех технических каталогах фирм производителей за редкими исключениями в деталях. Но, несмотря на такое «единодушие», она несколько нелогична.

Пример 1. Один наружный блок с производительностью 10 кВт по холоду обслуживает два внутренних блока с производительностью 7,1 кВт по холоду. Внутренние блоки располагаются по разным фасадам здания. В первую половину дня с восточного фасада теплоизбытки насчитываются 7 кВт, а с западного — 3 кВт. Итого суммарная нагрузка утром составит $7 + 3 = 10$ кВт. Во второй половине дня, наоборот, с восточного фасада здания теплоизбытки равны 3 кВт, а с западного — 7 кВт, в сумме $7 + 3 = 10$ кВт.

Все параметры длины трубопроводов, расчётных температур стандартны. Определим по формуле (2) расчётную производительность внутреннего блока:

$$\begin{aligned} Q_{\text{вн.факт}} &= \frac{Q_{\text{вн.ном}} Q_{\text{нар.факт}} K_L}{\sum Q_{\text{вн.ном}}} = \\ &= \frac{7,1 \times 10 \times 1,0}{7,1 + 7,1} = 5 \text{ кВт.} \end{aligned}$$

То есть по формуле (2) максимальная производительность наружного блока 10 кВт разделилась равномерно между двумя одинаковыми внутренними блоками по 5 кВт. Но, во-первых, тепловой режим обслуживаемых помещений неравномерен. Во-вторых, в каждом внутреннем блоке присутствует встроенный EEV-клапан регулирования расхода хладагента. Поэтому производительность наружного блока в помещениях с неравномерным тепловым режимом не может делиться поровну (пропорционально индексу внутреннего блока). Клапан EEV будет подстраиваться под тепловой режим помещения: уменьшать поток хладагента через один внутренний блок и максимально открываться на другом пропорционально тепловой нагрузке (рис. 2).



❖ Рис. 2. Суммарная тепловая нагрузка от помещений разных фасадов

Основной недостаток данной методики

Весь смысл функционирования VRF-систем сводится к обслуживанию помещений с неравномерными в течение дня теплоизбытками. Следовательно, для одних помещений необходима максимальная производительность внутренних блоков, например, в утренние часы (ориентация окон на восток), а для других помещений в вечерние (ориентация окон на запад) в пределах одной системы. Тем самым достигается перераспределение мощности наружного блока и его равномерная загрузка в течение дня. Именно неравномерность или «многозональность» лежит в основе функционирования VRF-систем. Поэтому коэффициент превышения суммарной мощности внутренних блоков над мощностью наружного необходим и оправдан, так как практически невозможно одновременное функционирование всех внутренних блоков в режиме максимальной мощности. Но недостаток формулы (2) заключается в том, что основное свойство VRF-систем — неравномерность производительности внутренних блоков во времени — не учитывается. Мощность наружного блока делится равномерно между внутренними блоками, как будто они одновременно функционируют в режиме максимальной мощности.

Но, например, солнце не может одновременно светить и с запада, и с востока. Вероятность одновременной загрузки оборудования обслуживаемых помещений также очень низка. Поэтому однозначно загрузка на систему кондиционирования в данный момент времени будет меньше простой арифметической суммы нагрузок на отдельные помещения.

По большому счету, как не существует двух одинаковых людей, так и не существует двух одинаковых помещений с точки зрения равномерности тепловой нагрузки. Для оценки неравномерности тепловой нагрузки групп помещений необходимо ввести понятие коэффициента неравномерности группы помещений в пределах одного холодильного контура K_n [формула (7)].

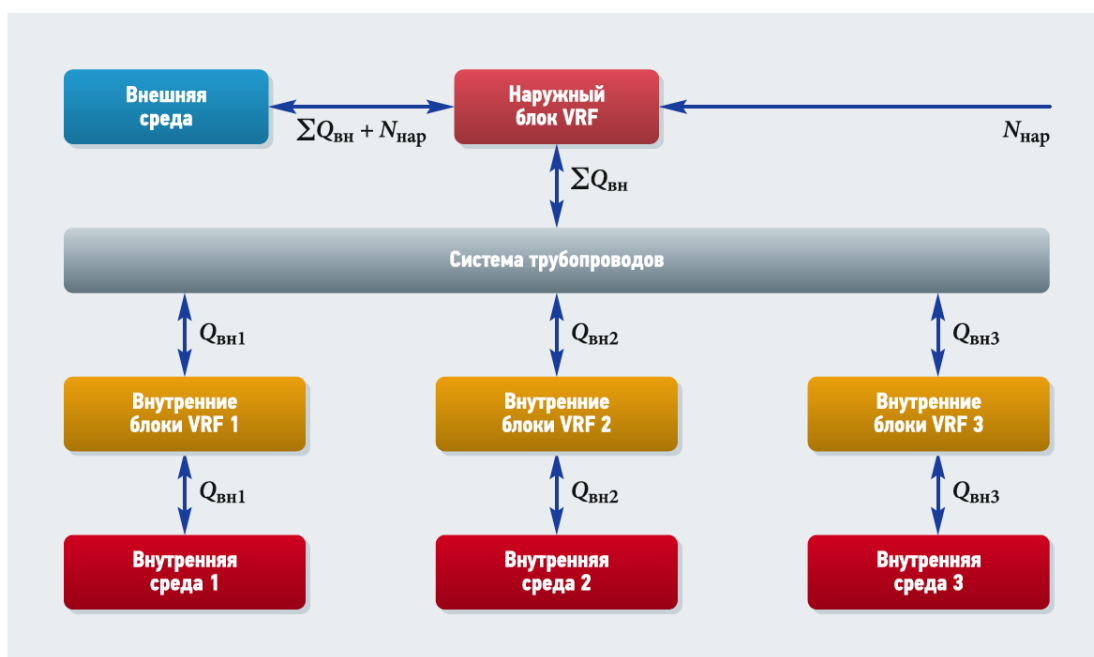
Проблемы, возникающие при эксплуатации VRF-систем кондиционирования после их подбора по существующей методике

Существующая методика расчёта занижает фактическую мощность внутренних блоков на 10–20 %, что приводит к завышению их типоразмера. Это не только увеличивает общую стоимость оборудования и снижает его конкурентоспособность, но и перегружает компрессорную систему наружного блока. С другой стороны, мощность наружных блоков принимается заниженной на 5–10 %, что также приводит к повышенной нагрузке на компрессоры наружного блока. В целом эти два фактора приводят к преждевременному выходу компрессорного узла из строя (как правило, плат управления инверторными компрессорами).

Если оценить традиционную методику в целом, то её можно охарактеризовать как методику расчёта однозональных систем кондиционирования без функции перераспределения мощности. Фактически эксплуатация систем происходит при других условиях.

Методика расчёта оборудования VRF-систем кондиционирования на основе баланса мощности охлаждения

Необходимо отметить, что проектирование VRF-систем кондиционирования должно строиться в первую очередь на фундаментальных законах природы — законах сохранения энергии и массы. VRF-система кондиционирования является термодинамической системой, обменивающейся энергетическими потоками, с одной стороны, с внутренним воздухом помещений, с другой стороны — с внешней средой здания (рис. 1).



❖ Рис. 1. Схема энергетического баланса VRF-системы в режиме охлаждения

Причём процесс энергообмена, как правило, происходит с результирующим повышением потенциала тепловой энергии. Согласно второму закону термодинамики данный процесс может происходить только при участии механической работы (энергии сжатия компрессора). При работе кондиционера в режиме охлаждения тепловой поток от внутреннего воздуха помещений $Q_{вн}$ передаётся через внутренние блоки, систему трубопроводов, наружный блок во внешнюю среду здания. Кроме энергии из охлаждаемых помещений наружные блоки во внешнюю среду отдают энергию, затраченную на привод компрессора.

Таким образом, энергетический баланс VRF-системы кондиционирования выглядит так:

$$\sum q_{вн} + N_{нар} = Q_{нар.т.} \quad (3)$$

Исходя из энергетического баланса системы кондиционирования воздуха, необходимо производить расчёт и подбор оборудования VRF-систем. Этапы подбора оборудования VRF-систем следующие.

1. Расчёт мощности внутренних блоков

Функционально максимальная мощность внутреннего блока должна быть больше или равна максимальным теплопритокам в кондиционируемом помещении. С одной стороны, мощность внутреннего блока равна количеству холода, переданного через поверхность теплообменников. Поэтому можно записать уравнение теплопередачи:

$$Q_{вн} = kF[0,5(t_{вн1} + t_{вн2}) - t_{фр}] = Q_{вн.ном} K_t \quad (4)$$

где k — коэффициент теплопередачи внутреннего блока, Вт/(м²·°C); F — площадь теплообменной поверхности внутреннего блока, м²; $t_{вн1}$ и $t_{вн2}$ — температуры внутреннего воздуха на входе и на выходе внутреннего блока, °C; $t_{фр}$ — температура кипения фреона, °C; $Q_{вн.ном}$ — номинальная производительность внутреннего блока при стандартных условиях, Вт; K_t — коэффициент коррекции производительности внутреннего блока по температуре внутреннего воздуха.

С другой стороны, мощность внутреннего блока равна охлаждающей мощности фреона, поступающего во внутренний блок:

$$Q_{вн} = G_{вн} q_{фр}, \quad (5)$$

где $G_{вн}$ — расход фреона во внутреннем блоке, кг/с; $q_{фр}$ — теплота фазового перехода 1 кг фреона, Дж/кг.

Если по какой-то причине расход хладагента, определённый по формуле (5), меньше производительности внутреннего блока по формуле (4), то наружный блок либо соединительные трубопроводы подобраны неправильно.

Произведение kF — постоянная величина, зависящая от конструктивных особенностей внутреннего блока. Температура кипения фреона $t_{фр}$ также поддерживается примерно (± 2 °C) на одном уровне системой автоматического регулирования VRF-системы.

Таким образом, согласно формуле (4) мощность внутреннего блока зависит от температуры воздуха $t_{вн1}$ на входе во внутренний блок.

Согласно формуле (5) мощность внутреннего блока зависит также от расхода жидкого хладагента $G_{вн}$, поступающего к блоку. Количество энергии, поступающей к внутреннему блоку всегда равно количеству энергии, отходящей от блока, следовательно, можно записать уравнение баланса этих тепловых потоков:

$$Q_{вн} = kF [0,5(t_{вн1} + t_{вн2}) - t_{фр}] = G_{вн} q_{фр}. \quad (6)$$

Мощность внутреннего блока регулируется изменением расхода фреона $G_{фр}$ через блок с помощью терморегулирующего вентиля, но не может быть больше, чем величина теплопередачи, определённая по формуле (4).

При уменьшении температуры внутреннего воздуха происходит падение максимально возможной мощности блока (табл. 1).

Пересчитывая производительность внутреннего блока из примера 1 по формуле (4), мы получаем: $Q_{вн} = Q_{вн.ном} K_t = 7,1 \times 1,0 = 7,1$ кВт.

Сравним расчёт производительности внутреннего блока в примере 1 по формуле (2) — 5 кВт и по формуле (4) — 7,1 кВт становится понятна значительная разница в итоговой производительности двух разных методик расчёта.

Пример 2. Необходимо подобрать внутренние блоки для кондиционируемых помещений. По номинальной производительности и коэффициенту коррекции по температуре внутреннего воздуха подбираем типоразмер внутреннего блока таким образом, чтобы мощность охлаждения была больше (или равна) максимальных теплоизбытков помещения (табл. 3). Причём расчётная температура в различных помещениях может быть неодинаковой.

▄▄ Подбор внутренних блоков для группы офисных помещений

табл. 3

Помещение	t , °C	Теплоизбытки, кВт	Модель блока VRF FG	Фактическая мощность $Q_{вн}^H$, кВт
Офис	23	4,9	ASHA24G	5,3
Офис	23	4,0	ASHA18G	4,2
Зал совещаний	26	6,3	ASHA24G	6,5
Приёмная	24	2,1	ASHA09G	2,3
Кабинет	20	2,8	ASHA14G	3,0

Мы видим, что фактическая мощность внутренних блоков зависит от расчётной температуры в помещениях. Одинаковые внутренние блоки могут выдавать разную производительность в пределах одной системы (например, ASHA24G) и это абсолютно нормально.

2. Расчёт мощности наружного блока

Расчёт мощности наружного блока должен производиться исходя из условия обеспечения максимальной холодопроизводительности внутренних блоков:

$$Q_{\text{нар}} = \sum Q_{\text{вн}} / K_n. \quad (7)$$

Как правило, VRF-системы кондиционирования применяются в помещениях, где коэффициент одновременности $K_n > 1$. То есть основной принцип функционирования мультизональных систем — перераспределение хладагента между потребителями с неодновременной нагрузкой — предполагает целесообразность их использования только при значениях больше 1,0. При условии одновременного максимума тепловых нагрузок в помещениях оптимально применение менее сложных и менее дорогих сплит-систем. Поэтому при проектировании VRF-систем необходимо выбирать внутренние блоки в пределах одной системы с неодновременными максимумами нагрузок, например, ориентированные по разным фасадам здания.

Такой выбор приводит к равномерной загрузке наружного блока в течение суток и меньшей расчётной мощности наружного блока (рис. 2). Для рис. 2 коэффициент одновременности выразится как:

$$K_n = \frac{\sum Q_{\text{вн}}}{Q_{\text{нар}}} = \frac{A + B}{C}. \quad (8)$$

Выбор коэффициента неодновременности загрузки

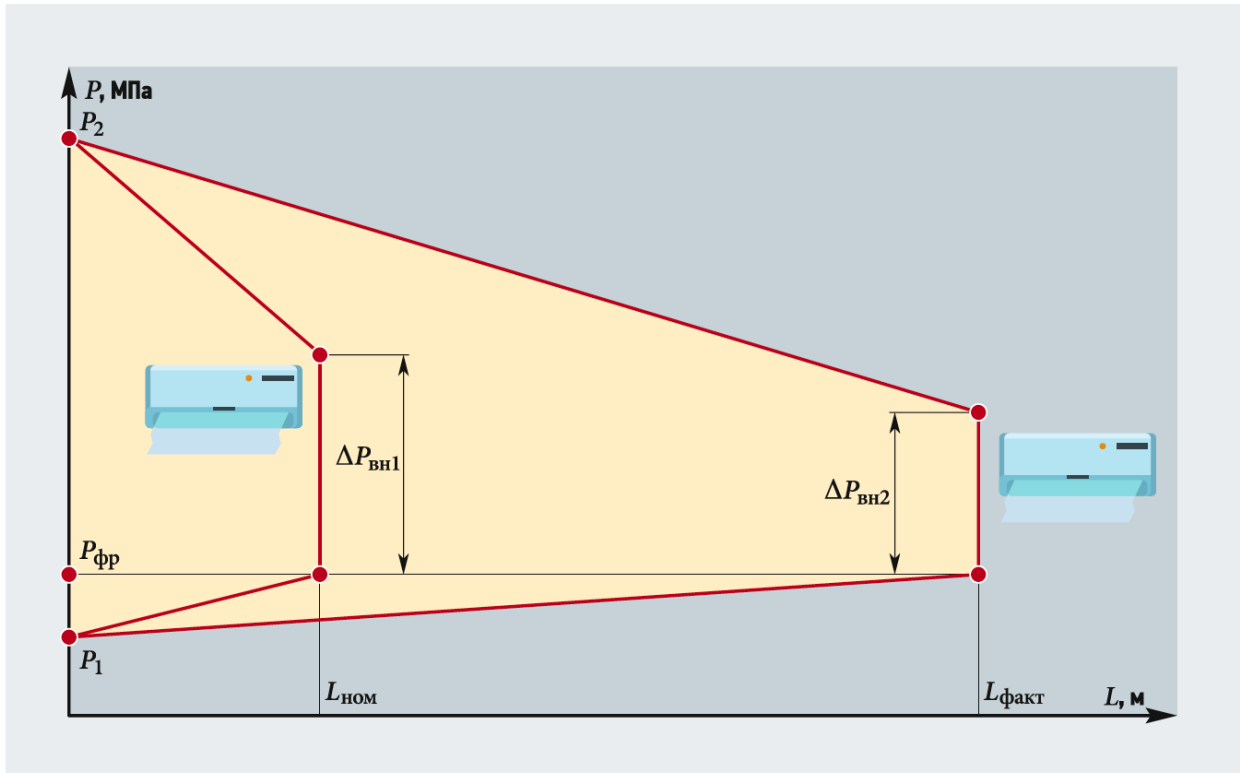
Коэффициент неодновременности K_n зависит в первую очередь от теплового режима здания, но не может быть больше определённых величин, зависящих от конструкции VRF-систем. Например, для серии V3 FG отношение суммы номинальных мощностей (индексов) внутренних блоков к мощности наружного блока не может быть больше 150 %. Поэтому для определения мощности наружного блока необходимо знать три величины: сумму максимальных теплоизбытков обслуживаемых помещений; коэффициент неодновременности теплоизбытков помещений (характеристики объекта кондиционирования); сумму индексов внутренних блоков (характеристика системы кондиционирования).

Коэффициент неодновременности фактической нагрузки (не путать с индексами) можно определить расчётом. Рекомендованные величины такие [2]: 100–110 % — офисы с внутренними блоками по одному фасаду (неодновременность теплопоступлений от людей и оборудования); 110–130 % — офисы с внутренними блоками по разным фасадам здания (неодновременность теплопоступлений от людей, оборудования и солнечной радиации); 120–150 % — квартиры и отели (неодновременность от людей, оборудования, солнечной радиации и неиспользуемых помещений).

Холодопроизводительность наружного блока $Q_{\text{нар}}$ можно определить по следующей формуле:

$$Q_{\text{нар}} = G_{\text{нар}} q_{\text{фр}} \cdot \quad (9)$$

Особенностью систем автоматического регулирования VRF-систем является поддержание определённого давления на выходе и входе наружного блока (рис. 3).



❖ Рис. 3. График изменения давления в подающем и обратном фреонапроводах

Потери давления в системе также зависят от расхода фреона $G_{\text{нар}}$ и гидравлической характеристики сети $k_{\text{гидр}}$:

$$p_1 - p_2 = k_{\text{гидр}} G_{\text{нар}}^2 \cdot \quad (10)$$

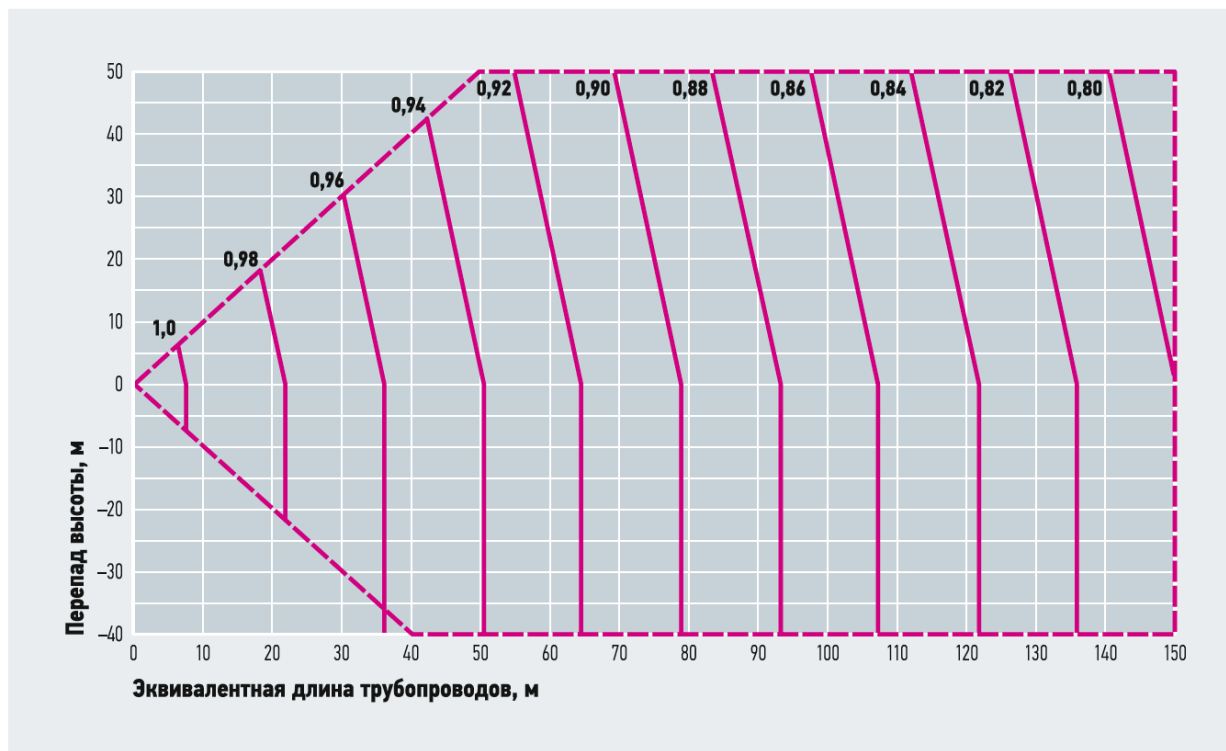
Таким образом, при увеличении длины магистралей выше номинала 7,5 м происходит увеличение гидравлической характеристики сети и, соответственно, уменьшение расхода фреона в системе. Наружный блок уменьшает общий расход фреона, сохраняя перепад давления в системе [4].

Пример 3. Необходимо подобрать наружный блок для внутренних блоков табл. 3. Эквивалентная длина магистралей 79 м. Коэффициент одновременности нагрузки для офисных помещений принимаем 115 %.

Суммарная фактическая мощность внутренних блоков: $(4,9 + 4,0 + 6,3 + 2,1 + 2,8)/1,15 = 20,1/1,15 = 17,5$ кВт.

Именно эту производительность максимально могут «запросить» внутренние блоки от наружного в расчётный период (в период старта пиковая производительность может быть значительно выше).

Проверим, какой наружный блок сможет выдать требуемую производительность с учётом потерь на длину трубопроводов. При эквивалентной длине трубопроводов 79 м коэффициент снижения производительности составляет 0,9 (рис. 4).



❖ Рис. 4. График изменения производительности по холоду в зависимости от длины трубопроводов и перепада высот наружного блока VRF-системы в режиме охлаждения

Проверим, подойдёт ли нам наружный блок АJH072L с ближайшей большей производительностью 22,4 кВт:

$$22,4 \times 0,9 = 20,16 \text{ кВт} > 17,5 \text{ кВт}.$$

Сравнивая с максимально возможным потреблением холода внутренними блоками 17,5 кВт делаем вывод: да, подойдёт. Запас по мощности наружного блока составит около 15 %:

$$20,16/17,5 = 1,152.$$

Ещё одна проверка нам нужна, чтобы понять — а запустится ли наш наружный блок с этим набором внутренних блоков, учитывая, что его максимальный коэффициент загрузки по индексам составляет 150 %?

Сумма индексов внутренних блоков:

$$(24 + 18 + 24 + 9 + 14) = 89,$$

коэффициент загрузки наружного блока по индексам:

$$89/72 = 1,24 < 150 \%$$

Коэффициент загрузки наружного блока получился в допустимом диапазоне 50–150 %, следовательно, система при запуске просчитает индексы и запустится нормально.

Вывод

1. Рассмотренная методика, основанная на уравнениях энергетического и материального баланса VRF-систем, применима для расчёта кондиционеров с переменным расходом фреона любых производителей.
2. Расчётная производительность внутреннего блока в VRF-системе зависит только от параметров внутреннего воздуха — температуры и влажности, но не зависит от длины трубопроводов или конфигурации системы.
3. Расчётная производительность наружного блока, напротив, зависит от потерь давления по длине трубопроводов, от перепада высот внутренних и наружного блока и местных сопротивлений.
4. Коэффициент загрузки наружного блока зависит не от типа или модели системы кондиционирования, а от одновременности тепловой нагрузки обслуживаемых помещений.

Литература

1. Design technical manual. Airstage VIII Fujitsu General. DTV_V3E040E_02.
2. Брух С.В. VRF-системы кондиционирования воздуха. Особенности проектирования, монтажа, наладки и сервиса. — М.: ООО «Компания БИС», 2017. 360 с.
3. Сотников А.Г. Системы кондиционирования воздуха с количественным регулированием. — Ленинград: Стройиздат, 1976. 168 с.
4. Брух С.В. Анализ VRF-систем. Алгоритмы управления производительностью // Журнал С.О.К., 2017. №9. С. 70–74.