

УДК 621.56/59(063)  
ББК 31.392  
К 14

Сборник подготовлен под редакцией  
доктора технических наук, академика Кулажанова Т.К.

**Редакционная коллегия:**

Цой А.П., Шалбаев К.К., Галкин М.Л., Андреева В.И. (ответ. секретарь)

К 14 Казахстан-Холод 2019: Сб. докл.межд.науч.-техн.конф. (20-21 февраля 2019г.) = Kazakhstan-Refrigeration 2019: Proceedings of the Conference (February 20-21, 2019). – Алматы: АТУ, 2019. – 218 с., русский, английский

ISBN 978-601-263-484-6

В докладах представлены результаты научных исследований, посвященные холодильным компрессорам, теплообменным аппаратам, системам автоматизации, цифровизации, технологиям холодильного хранения и переработки плодов и овощей и практическим внедрениям, представленные из Казахстана, России, Украины, Германии, Австрии, Беларуси, Кыргызстана, Голландии, Швейцарии и Узбекистана. Сборник рассчитан на специалистов и ученых, работающих в областях холодильной техники, пищевой и химической промышленности, а также на специалистов систем кондиционирования воздуха и жизнеобеспечения жилых, коммерческих зданий и спортивных комплексов.

The proceedings present the results of scientific research on refrigeration compressors, heat exchangers, automation systems, digitalization, refrigeration storage technology and the processing of fruits and vegetables and practical implementations submitted from Kazakhstan, Russia, Ukraine, Germany, Austria, Belarus, Kyrgyzstan, Holland, Switzerland and Uzbekistan. The proceedings are devoted to professionals and scientists working in the fields of refrigeration, food and chemical industries, as well as to specialists in air conditioning systems and life support of residential, commercial buildings and sports complexes.

УДК 621.56/59(063)  
ББК 31.392

ISBN 978-601-263-484-6

© АТУ, 2019

## OPTIMIZATION OF MULTI-ZONE VRF AIR-CONDITIONING SYSTEMS

ОПТИМИЗАЦИЯ МНОГОЗОНАЛЬНЫХ VRF СИСТЕМ  
КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА

<b>Zhykharieva N.V.<sup>a</sup></b> , Cand. Tech. Sc., Associate Professor <b>Khmelniuk M.G.<sup>2b</sup></b> , Doctor of Technical Sciences, Professor	<b>Жихарева Н. В.<sup>a</sup></b> , канд. тех. наук, доцент <b>Хмельнюк М.Г.<sup>b</sup></b> , док. тех. наук, профессор
Odessa National Academy of Food Technologies, Ukraine 65039, Odessa, Kanatnaya, Street, building 112	Одесская национальная академия пищевых технологий, Украина 65039, Одесса, Ул. Канатная, 11
<b>E-mail:</b> a – zikhareva.nata@gmail.com; b – hmel_m@ukr.net	

**Abstract**

The article is devoted to the complex approach to improving energy efficiency and energy saving in the field of air conditioning and ventilation using mathematical modeling methods for circuit design solutions and operating modes of equipment for microclimate systems in public facilities using modern multi-zone air conditioning systems. A complex model of optimization of air conditioning systems for public facilities has been developed. This model takes into account not only the thermophysical aspects, taking into account the non-stationary heat and moisture external and internal loads in the room, but also the factors for minimizing the variable part of the reduced costs associated with energy costs.

Optimization possibilities are carried out when calculating the universal objective function and mathematical modeling programs to determine the payback period and the objective function values for the compared variants. The comparative analysis is carried out based on the developed mathematical model of Daikin, Mitsubishi Electric, Fujitsu, Mitsubishi. When calculating according to this model, it is possible to obtain a payback period for equipment using economically feasible insulation thickness and non-stationary heat leakage.

**Аннотация**

Статья посвящена комплексному подходу повышения энергоэффективности и энергосбережения в области кондиционирования и вентиляции с помощью методов математического моделирования, схемно-технических решений и режимов работы оборудования систем обеспечения микроклимата при использовании современных многозональных систем кондиционирования. Разработана комплексная модель оптимизации систем кондиционирования общественных объектов. Эта модель учитывает не только теплофизические аспекты с учетом нестационарной тепловлажностной внешней и внутренней нагрузки в помещении, но также и факторы по минимизации переменной части приведенных затрат, связанных с затратами энергии.

Возможности оптимизации проведены при расчете универсальной целевой функции и программ математического моделирования по определению сроков окупаемости и величин целевой функции для сравниваемых вариантов. Проведенный сравнительный анализ на базе разработанной математической модели Daikin, Mitsubishi Electric, Fujitsu, Mitsubishi Heavy для объектов, работающих в течение суточного цикла в экстремально-нестационарном режиме. При расчетах по этой модели можно получить срок окупаемости оборудования с применением экономически-целесообразной толщины изоляции и нестационарных теплопритоков.

## **Введение**

В условиях ускорения научно-технического прогресса задача повышения энергоэффективности систем кондиционирования имеет важное народнохозяйственное значение, поскольку ее решение, кроме повышения эффективности капитальных вложений, обеспечивает ее энергосбережение, экономию материалов, а также улучшение условий труда людей и окружающей среды.

Одной из основных задач этой комплексной проблемы является энергосбережение. Мы решаем триединую проблему - оптимизацию (минимизацию) энергопотребления при жестком соблюдении нормативных требований к комфортной среде обитания в жилых, общественных и промышленных объектах, неукоснительное соблюдение технологических требований в производственных процессах и минимизацию вредного влияния на экологию окружающей среды.

В работе [1] показана традиционная методика расчета VRF систем кондиционирования воздуха.

С учетом подхода к моделированию энергоэффективных систем [2] мы рассматриваем пути повышения эффективности многозональных систем кондиционирования.

Основными целевыми направлениями совершенствования многозональных систем кондиционирования в последнее время являются следующие:

- повышение комфорта микроклимата объекта, точность и надежность его обеспечения при круглогодичной эксплуатации;
- повышение энергоэффективности многозональных систем за счет увеличения коэффициентов трансформации тепла;
- повышение показателей энергосбережения за счет рекуперации и аккумуляции тепловой энергии и постоянного автоматического оптимального управления режимами работы, в зависимости от сезонных параметров наружного воздуха, солнечной радиации и геотермальных источников тепла, а также внутренних нестационарных источников теплопритоков / теплопотери и источники изменения влажности внутреннего воздуха;
- снижение вредного воздействия на экологию окружающей среды;
- совершенствование основных агрегатов многозональной системы кондиционирования воздуха: компрессора, вентилятора, рекуператора, теплообменника;
- аккумулятор теплоты с использованием тепла фазового перехода, системы управления;
- интеграция многозональных систем с солнечными коллекторами, системой приточно-вытяжной вентиляции;
- легкость интеграции с системой "умного дома" (BMS с протоколами BACnet или LONwork, порты SC-LGW или SC-BGW);
- поверочные расчеты с разработкой монтажной схемы и полной спецификации;

### **Комплексный подход к оптимизации многозональных VRF систем кондиционирования воздуха.**

Оптимизация системы кондиционирования воздуха базируется на конкурирующих свойствах системы. Увеличение температурных напоров в теплообменных аппаратах приводит к сокращению капитальных затрат и одновременному увеличению расхода энергии, то есть к увеличению переменной части эксплуатационных расходов, и наоборот. Такой характер закономерностей позволяет найти наиболее целесообразную комбинацию капитальных и эксплуатационных затрат. При этом общий экономический эффект от оптимизации режима работы холодильного оборудования должен оцениваться величиной, учитывающей как капитальные, так и эксплуатационные расходы.

Необходимо отметить, что энергосбережение наиболее эффективно, если оно проводится на всех стадиях жизненного цикла объекта, от выбора на этапе проектирования климатического оборудования и величины теплового сопротивления ограждений, проработки целесообразности использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ), объективного и высококвалифицированного энергоаудита по результатам первого года эксплуатации и энергоменеджмента до момента капитальной модернизации объекта или его полной остановки

перед утилизацией оборудования. [2,3].

Учитывая выше изложенное, нами предложена и протестирована следующая целевая (7) функция совместной оптимизации тепловой защиты объекта (теплового сопротивления ограждений помещения), в котором обеспечивается заданный микроклимат, и производительности энергосберегающего климатического оборудования активной системы обеспечения этого микроклимата, учитывая особенности оптимизации систем кондиционирования воздуха. [3, 7].

$$Prf = \min \left[ \Delta Pst + Pesob - \sum_{i=1}^T \frac{\Delta Qg}{(1+d-R)^i} \right] \quad (1)$$

Целевую функцию (Ptf - target function) для совместной оптимизации предлагается определять с учетом возможного изменения стоимости электроэнергии и коэффициента дисконтирования валюты;

– $\Delta Pst$  - дополнительная стоимость утепления наружных ограждений с целью усиления тепловой защиты помещений с заданным микроклиматом (это может быть одна наружная стена или все стены наружные стены для отдельностоящего объекта);

– $Pesob$  - затраты на покупку и установку в систему энергосберегающего оборудования;

– $i$  - номер года после ввода в эксплуатацию энергосберегающего оборудования;

– $\Delta Qg$  - годовая экономия стоимости потребляемой электроэнергии в результате использования энергосберегающего оборудования и усиления теплозащиты объекта (рассчитывается по среднемесячным температурам наружной среды), кВт;

– $d$  - годовой коэффициент дисконтирования национальной валюты

– $R$  - коэффициент годового роста стоимости (кВт.часа).

– $pe1$  - стоимость кВт часа электроэнергии с НДС.

Целевая функция (1), определяемая для заданных вариантов с помощью программы, выполненной в вычислительной среде Mathcad, позволяет выполнить совместный оптимальный выбор варианта тепловой защиты объекта и комплекта энергосберегающего оборудования.

По результатам дополнительного математического моделирования, с учетом фактических затрат энергии за первый год работы, могут быть приняты рекомендации, например, по установке дополнительного энергосберегающего оборудования, усиления теплоизоляции ограждений, сокращения периода между чистками фильтра и т.д. Целевая функция (1), определяемая для заданных вариантов с помощью программы, выполненной в вычислительной среде Mathcad, позволяет выполнить совместный оптимальный выбор варианта тепловой защиты объекта и комплекта энергосберегающего.

Целевая функция (1) имеет универсальный характер и может быть выполнена для определения срока окупаемости.

Срок расчетной эксплуатации  $T=7$  лет предлагается для дальнейшего обсуждения. Принято считать, что срок окупаемости энергосберегающего оборудования равен сроку гарантии на это оборудование 2- 4 года, а срок получения прибыли после срока окупаемости, равной начальным инвестициям в энергосберегающие мероприятия, с учетом коэффициента дисконтирования в пределах 3-5 лет. Использовать срок службы на оборудование вентиляции и кондиционирования 15-20 лет, приведенный в ДБН В.2.5-67:2013, в целевой функции (1) нерационален. [8]

Оптимизация системы кондиционирования воздуха осуществляется в три этапа.

На первом этапе оптимизируется структура и производительность СКМ, характер и нагрузки.

На втором этапе осуществляется оптимизация подсистем по различным технологическим и конструктивным параметрам. Наконец, на третьем этапе базовые варианты структуры и производительности СКМ оптимизируются вместе с оптимальными вариантами подсистем. При этом рассматриваются все возможные сочетания.

Систему кондиционирования подбираем по основным уравнениям модели; уравнение баланса воздуха, полной теплоты (Q), влаги (W), газов (M) и явной теплоты (Qя) в помещении: [6]

$$G_s \frac{\partial h_y}{\partial \tau} = G_{n1} \cdot h_{n1} - G_{y1} h_{y1} - G_p h_p + \sum_{i=2}^n G_{ni} h_{ni} - \sum_{j=2}^m G_{yj} h_{yj} + \Delta Q + \Delta Q' \quad (2)$$

$$G_s \frac{\partial d_y}{\partial \tau} = G_{n1} d_{n1} - G_{y1} d_{y1} - G_p d_p + \sum_{i=2}^n G_{ni} d_{ni} - \sum_{j=2}^m G_{yj} d_{yj} + \Delta W + \Delta W' \quad (3)$$

$$G_s \frac{\chi_{n1}}{\rho_{n1}} = G_{n1} \frac{\chi_{n1}}{\rho_{n1}} - G_{y1} \frac{\chi_{y1}}{\rho_{y1}} - G_p \frac{\chi_p}{\rho_p} + \sum_{i=2}^n G_{ni} \frac{\chi_{ni}}{\rho_{ni}} - \sum_{j=2}^m G_{yj} \frac{\chi_{yj}}{\rho_{yj}} + M_\Gamma \quad (4)$$

$$G_s \frac{Cp \partial t_y}{\partial \tau} = Cp G_{n1} t_{n1} - Cp G_{y1} t_{y1} - Cp G_p t_p + Cp \sum_{i=2}^n G_{ni} t_{ni} - Cp \sum_{j=2}^m G_{yj} t_{yj} + \Delta Q_{\text{я}} + \Delta Q' \quad (6)$$

где  $G_p$ ,  $G_y$ ,  $G_r$  - расход приточного, удаляемого и рециркуляционного воздуха кг/с;  $h_p$ ,  $h_y$ ,  $h_r$  - энтальпия приточного, удаляемого и рециркуляционного воздуха кДж/кг,  $d_p$ ,  $d_y$ ,  $d_r$  - влагосодержание приточного, удаляемого и рециркуляционного воздуха;  $t_p$ ,  $t_y$ ,  $t_r$  - температура приточного, удаляемого и рециркуляционного воздуха х/рп х/ру х/рр, концентрация и плотность приточного, удаляемого и рециркуляционного воздуха;  $\Delta G_M$ ,  $\Delta Q_M$ ,  $\Delta W_M$ ,  $\Delta M_\Gamma$ ,  $\Delta Q_{\text{ям}}$  - дебалансы местной вентиляции по воздуху, полной теплоте, влаге, газам и явной теплоте.

Нами рассмотрены некоторые технологии и элементы, совершенствование которых напрямую повышает энергоэффективность и снижает потребление электроэнергии в годовом цикле использования многозональных систем кондиционирования.

Мы построили нашу методику экспериментального анализа для выбора модели наружного блока VRF с использованием формул (1-6) и при учете нестационарного теплообмена в помещениях. [5]

Необходимо также отметить постоянную работу ведущих мировых фирм, производящих многозональных систем кондиционирования с системами их управления и программным обеспечением, над облегчением их эксплуатации и использованием таймеров, настраиваемых на длительный срок по запрограммированному автоматическому поддержанию изменению параметров микроклимата в процессе суточного, недельного, а иногда и более длительного периода.

### Результаты многозональных VRF систем кондиционирования воздуха

Проведенные расчеты показали сочетания наружных блоков при конфигурировании модулей многозональных систем кондиционирования, позволяющих получить системы холодо и теплопроизводительности от 10 до 180 кВт в одном модуле и подобрать оптимальную. Фирмы предлагают варианты наиболее компактных и наиболее энергоэффективных модулей. Модульный принцип оставляет возможность творческой оптимизации многозональных систем кондиционирования, начиная с этапа проектирования, с учетом всех особенностей конкретного объекта. Для этого используются программы-конфигураторы, которые непрерывно совершенствуются.

Наша методика рассмотрена на примере мировых лидеров в секторе производства оборудования: Daikin, Mitsubishi Electric, Fujitsu, Mitsubishi Heavy, где определено по (1) наиболее эффективное оборудование, при этом рассчитывалось потребление энергии и срок окупаемости.

Из расчетов получено, что несмотря на то, что COP у большей многозональной системы кондиционирования выше, суммарное потребление энергии за январь месяц меньше у системы меньшего номинала. Если автоматика обеспечивает с необходимой точностью изменения оборотов вала компрессора и переменную температуру кипения хладагента, которые допускают более низкую, чем 50% нагрузку на МЗС, и это подтверждается фирмой-

производителем, картина может измениться. Поэтому для общественного объекта перед окончательным выбором МЗС необходимо провести расчетную проработку с использованием программ-конфигуратора фирмы-поставщика.

Как правило, VRF- системы кондиционирования применяются в помещениях, где коэффициент неодновременности  $k < 1$ . То есть основной принцип функционирования мультизональных систем - перераспределение хладагента между потребителями с неодновременным нагрузкой - предполагает целесообразность их использования только при значениях  $k < 1$ . Коэффициент неодновременности  $k$  зависит в первую очередь от теплового режима здания, но не может быть меньше определенных величин, зависящих от конструкции VRF- систем. Поэтому для определения мощности внешнего блока необходимо знать три величины: сумму максимальных теплопритоков обслуживаемых помещений, сумму номинальных мощностей внутренних блоков, коэффициент неодновременности теплопритоков помещений.

Поэтому при проектировании VRF- систем необходимо выбирать внутренние блоки в пределах одной системы с неодновременными максимумами нагрузок, например ориентирования по разным фасадам здания. Такой выбор приводит к равномерной загрузке внешнего блока в течение суток и меньшей расчетной мощности внешнего блока.

Комплексная оптимизация может быть использована для совместного выбора агрегата приточно-вытяжной системы с рекуперацией, инверторного кондиционера и конструкции соответствующих наружных ограждений на ранней стадии проектирования. При необходимости на стадии рабочего проекта может быть выполнен поверочный уточненный расчет, а по итогам первого года эксплуатации сверка уточненного расчета с расходом электроэнергии по счетчику.

#### **Выводы**

Разработанная комплексная математическая модель с использованием полученной целевой функции для помещений содержит принципиально новый подход к выбору оптимального климатического оборудования для поддержания комфортных параметров. Эти мероприятия объединяет то, что для их реализации, как правило, требуются дополнительные капиталовложения. Для быстрой оценки сроков окупаемости альтернативных и дополняющих вариантов энергосберегающих мероприятий требуется наличие программного инструментария не только с дружественным интерфейсом, но и императивными ограничениями по всем параметрам микроклимата в рассматриваемом объекте в соответствии с действующими нормативными документами.

#### **Список литературы**

1. Брух, В. В. Парадоксы традиционной методики расчета VRF систем кондиционирования воздуха / В. В. Брух / СОК: 2005. – № 5. – С. 62–64.
2. Табунщиков, Ю. А. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий. / Ю. А. Табунщиков, М. М. Бродач. – М.: АВОК-ПРЕСС. – 2002. – 194 с.
3. Перепека, В. И. Расчеты систем кондиционирования и вентиляции. / В. И. Перепека, Н. В. Жихарева. – Одесса: «ТЭС», 2014. – 240 с.
4. Zhykharieva, N. Modeling of energy effivient air condition // N. V Zhykharieva / The scientific method. Poland – 2017. – № 3. – P.3–6..
5. Zhykharieva, N. Optimization of conditionsng system for fremises with non stasionari heat exchanger // N. Zhykharieva / Norwegian Journal of development of the International Science 2017. Vol. 2. – № 5. – P. 94– 99.
6. Оносовский, В. В. Моделирование и оптимизация холодильных установок / В. В. Оносовский – Ленинград: Издательство Ленинградского университета, 1990.
7. Жихарева, Н. В. Оптимізація сумарної вартості теплового захисту приміщень та кліматичного обладнання / Н. В. Жихарева, М. Г. Хмельнюк / Холодильна техніка та технологія. 2017. – №4 Том.53 – С. 17–20
8. Жихарева, Н. В. Моделювання та оптимізація систем кондиціонування повітря. / Н. В. Жихарева. – Одесса: «ТЭС», 2016. – 172с.

<b>Буданов В.А.</b> Обзор конструкций холодильных спиральных компрессоров <b>Budanov V.A.</b> Overview of refrigeration scroll compressor designs	50
<b>Свердлов А.В., Волков А.П., Рыков С.В., Волков М.А.</b> Экология и энергоэффективность при проектировании струйных систем вентиляции подземных автостоянок <b>Sverdlov A.V., Volkov A.P., Rykov S.V., Volkov M.A.</b> Ecology and energy efficiency in the design of jet ventilation systems of underground parking	56
<b>Волчок В.А.</b> Выбор зеотропных смесей хладагентов для парокомпрессионных тепловых насосов <b>Volchok V.A.</b> Choice of zeotropic mixtures of refrigerators for vapor-compression heat pumps	63
<b>Бабакин Б.С., Воронин М.И., Малёв Р.Ю., Межевов А.В.</b> Охлаждение элементов холодильных систем и пищевых продуктов с использованием электрофизических методов <b>Babakin B.S., Voronin M.I., Malev R.Y., Mejevov A.V.</b> Cooling of elements of refrigeration systems and food products using electrophysical methods	66
<b>Георгиев Е.В.</b> Выбор оптимальных параметров температуры при микроволновом экстрагировании <b>Georgiiev E.V.</b> Selection of optimal temperature parameters during microwave extraction	69
<b>Данько В.П.</b> Исследование гидродинамики теплообменных аппаратов систем жизнеобеспечения от свойств абсорбента <b>Danko V.P.</b> Study of hydrodynamics of heat and mass transfer devices of life support systems from the properties of the absorbent	73
<b>Евдокимов В.С., Максименко В.А., Кузьменков А.А., Рожков Н.С.</b> Компрессорный холодильный агрегат для термостабилизаторов грунта <b>Evdokimov V.S., Maksimenko V.A., Kuzmenkov A.A., Rozhkov N.S.</b> Refrigeration unit for soil thermostabilizer	78
<b>Жихарева Н. В., Хмельнюк М.Г.</b> Оптимизация многозональных VRF систем кондиционирования воздуха <b>Zhykharieva N.V., Khmelniuk M.G.</b> Optimization of multi-zone VRF air-conditioning systems	82
<b>Акимов А., Кабулов Б.Б., Мустафаева А.К., Бакиева А.Б., Ташыбаева М.М.</b> Способ измельчения замороженного мясного сырья <b>Akimov A., Kabulov B.B., Mustafaeva A.K., Bakieva A.B., Tashybaeva M.M.</b> The method of grinding frozen raw meat	87
<b>Какимов А.К., Суйчинов А.К., Есимбеков Ж.С., Байкадамова А.М., Кабдылжар Б.К.</b> Низкотемпературная обработка сырья при получении мясокостной пасты <b>Kakimov A.K., Suychinov A.K., Yessimbekov Zh.S., Baikadamova A.M., Kabdylzhar B.K.</b> Low-temperature processing of raw materials in the production of meat-bone paste	89