

УДК 628.8 + 697.9

# Метод решения задачи векторной оптимизации для систем кондиционирования воздуха<sup>1</sup>

Канд. техн. наук Н. В. КОЧЕНКОВ, канд. техн. наук В. В. НЕМИРОВСКАЯ

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет ИТМО

Институт холода и биотехнологий

191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

*We justified the choice method for solving the vector optimization problem for air conditioning systems. Disclosure of graphic-analytical model of the fundamental concepts and basic engineering tools used in the method. In the simple examples shown its essence and nature of the application. The necessity of further development of this optimization method applied to more complex versions of air conditioning systems.*

**Keywords:** air conditioning, heat and air treatment, the vector mode of operation, a train, the thermodynamic state, vector optimization, operating variables.

**Ключевые слова:** система кондиционирования воздуха, тепловлажностная обработка воздуха, вектор режима функционирования, кортеж, термодинамическое состояние, векторная оптимизация, управляющие переменные.

В содержательном виде задача векторной оптимизации для системы кондиционирования воздуха (СКВ) была сформулирована в предыдущей статье [1]. Учитывая указанные там сложности представления целевой функции в явном виде, возможность использования известных математических методов векторной оптимизации исключается и для решения сформулированной задачи применяется специально разработанный метод. Его математический аппарат впервые был предложен в работе А. Я. Креслинга [2] (только для частного случая) и далее существенно развит и обобщен для широкого спектра нагрузок проф. А. А. Рымкевичем [3].

Фундаментальными понятиями и основными инженерными инструментами этого метода являются исходная термодинамическая схема (ИТС), классы нагрузок и вектор режима функционирования. Их использование, во-первых, придает методу сугубо прикладной характер (только для систем с тепловлажностной обработкой воздуха), во-вторых, качественно меняет подход к поиску решения оптимизационной задачи, который принципиально отличается от подходов, используемых в традиционных методах векторной оптимизации.

В методе используется графоаналитическая модель СКВ, содержание которой представлено как в виде уравнений, неравенств, ограничений, так и графически на  $I-d$ -диаграмме. Графоаналитическая модель включает в себя пять блоков.

**Блок 1.** В данном блоке осуществляется сведение всего множества факторов, оказывающих влияние на условия функционирования СКВ, к относительно небольшому их числу, за счет того, что информация о количественных оценках получается на основе результатов измерений, проводимых в реальном масштабе времени. В результате, несмотря на слишком большое число исходных пе-

ременных, связанных с факторами, которые должны учитываться в модели, после измерений и перевода результатов в количественные оценки этих факторов остается лишь небольшая часть переменных (в виде каркасных параметров  $q_{\Pi}$ ,  $W_{\Pi}$ ,  $m_{\Pi}$ ), которая оказывается достаточной для описания поведения СКВ.

**Блок 2.** В этом блоке по значениям переменных  $q_{\Pi}$ ,  $W_{\Pi}$ ,  $m_{\Pi}$  строится фактическая ИТС и определяется класс нагрузок в помещении, характерный для данного момента времени. Напомним, что ИТС – это такая обобщенная форма представления информации о тепловлажностных  $q_{\Pi}$ ,  $W_{\Pi}$ , и газовых  $m_{\Pi}$ ,  $m_{\bar{\Pi}}$  нагрузках в помещении, которая обеспечивает определение при этих нагрузках наилучшего режима функционирования СКВ, с точки зрения энергозатрат на обработку воздуха. ИТС может быть представлена как в аналитической, так и в графической форме. При графоаналитическом и компьютерном моделировании энергосберегающих режимов СКВ используется графическая форма представления ИТС на  $I-d$ -диаграмме.

Учитывая переменный характер тепловлажностных и газовых нагрузок в помещении, расположение опорных точек ИТС (точек  $\bar{N}$  и  $\bar{\Pi}$ ) на  $I-d$ -диаграмме может быть самым разнообразным. В этом разнообразии сделаны выборки определенных комбинаций их расположения, которые названы *классами нагрузок* [3].

Блок включает в себя системы уравнений и неравенств для расчета координат опорных точек ИТС и ее построения на  $I-d$ -диаграмме, а также алгоритм определения класса нагрузок.

**Блок 3.** Блок включает в себя системы неравенств, условий и ограничений, необходимых для деления области наружного климата на расчетные зоны, а также алгоритм определения, к какой из них будет относиться заданная точка наружного климата.

<sup>1</sup> Окончание. Начало см. Вестник МАХ. 2012. № 1. стр. 40–43.

**Блок 4.** В этом блоке для каждой из расчетных зон наружного климата определяется положение на  $I - d$ -диаграмме вектора режима функционирования. Под вектором режима функционирования СКВ понимается направленный отрезок, начало которого (точка Н) характеризует параметры наружного воздуха на входе в кондиционер, а конец (точка К) — параметры воздуха на выходе из кондиционера до использования воздуха второй рециркуляции (см. [2]). Вектор режима функционирования НК, как правило, состоит из двух-трех векторов, его составляющих, которые характеризуют отдельные процессы обработки воздуха в подсистемах СКВ. Вектор режима функционирования полностью определяет числовые значения всех показателей, входящих в состав кортежа ТП, для чего в блок включены соответствующие расчетные уравнения.

**Блок 5.** Блок включает в себя информацию о наружном климате, представленную в таком виде, как это показано в работе [4]. Эта информация используется только на этапе проектирования и (или) моделирования. На этапе же эксплуатации информация о климате определяется непосредственно на основе результатов измерений.

Графоаналитическая модель, содержащая перечисленные блоки, не соответствует какому-либо из известных общих классов математических моделей, что также (помимо сложности представления целевой функции в явном виде) не позволяет использовать для решения оптимизационной задачи уже известные математические методы.

Метод, рассматриваемый ниже, для каждого расчетного момента времени решает задачу векторной оптимизации в три этапа. На первом этапе информация о фактических условиях функционирования СКВ представляется в виде ИТС и определяется класс нагрузок. На втором этапе из множества возможных положений точки К, являющейся, как уже известно, концом вектора режима функционирования, определяется такое положение, при котором термодинамическое состояние СКВ будет оптимальным. При этом использование ИТС позволяет существенно сократить множество возможных положений точки К, поскольку она должна лежать только на ИТС и в строго определенном месте. Безусловно, для каждой конфигурации СКВ правила метода будут иметь свои особенности.

Значимость точки К состоит в том, что она не только показывает геометрическое место расположения конца вектора режима функционирования, который будет являться наилучшим для данного расчетного момента времени, но и несет в себе информацию, во-первых, об эталонных значениях показателей, входящих в состав кортежа ТП и характеризующих оптимальные расходы энергетических ресурсов, необходимые для реализации выбранного вектора режима функционирования, и во-вторых, информацию о том, за счет каких управляющих переменных (верхнего и локального уровней) этого можно добиться. Получение такой

информации составляет содержание третьего этапа решения оптимизационной задачи.

Суть рассматриваемого метода оптимизации для СКВ раскрывается далее через последовательное решение ряда примеров.

### Решение задачи векторной оптимизации для СКВ в примерах

Примеры начинаются с самого простого, в котором ограничения приняты такими, чтобы предельно упростить решаемую задачу. В каждом последующем примере задача векторной оптимизации усложняется за счет изменения ограничений (табл. 1)

Таблица 1

#### Содержание ограничений, принятых в примерах 1–4

№ примера	Ограничение 1	Ограничение 2	Ограничение 3
1	$m_H = m_{\Pi}$	(·)У	
2			$q_{\Pi} = \text{const}; W_{\Pi} = \text{const}$
3	$m_H \leq m_H < m_{\bar{H}}$ ,		
4	где $m_{\bar{H}} < m_{\Pi}$	□У	$q_{\Pi} = \text{var}; W_{\Pi} = \text{var}$

Во всех примерах в рамках идеальной модели рассматривается самостоятельно функционирующая СКВ с традиционными процессами тепловлажностной обработки воздуха, обслуживающая помещение, относящееся к объекту I типа (см. [3]). Нормируемые параметры воздуха в рабочей зоне помещения совпадают с параметрами удаленного (У) воздуха.

**Пример 1.** Дано:

- расход наружного воздуха  $m_H$  равен расходу приточного воздуха  $m_{\Pi}$  (**ограничение 1**), что характерно для прямоточной СКВ;
- нормируемые параметры воздушной среды в рабочей зоне помещения заданы в виде точки У (**ограничение 2**);

— значения тепло- и влагоизбытка (соответственно  $q_{\Pi}$  и  $W_{\Pi}$ ) в помещении приняты постоянными (**ограничение 3**);

— параметры наружного климата характеризуются представительными точками  $H_1$  и  $H_2$ .

Для каждой из представительных точек наружного климата  $H_1$  и  $H_2$  требуется определить, за счет каких управляющих переменных могут быть достигнуты оптимальные термодинамические состояния СКВ, при которых расходы энергоресурсов  $q_X$ ,  $q_T$ ,  $m_{\omega}$ ,  $m_H$ ,  $m_{R1}$ ,  $m_{R2}$ , потребляемых на обработку воздуха, будут иметь эталонные значения (рис. 1).

Решение этой задачи оказывается довольно простым, поскольку то, что требуется прежде всего найти положение точки К, является уже известным, так как при  $m_H = m_{\Pi}$  искомая точка К будет совпадать с точкой П, характеризующей параметры приточного воздуха. Для векторов режимов функционирования  $H_1K$  и  $H_2K$  показаны традиционные (хотя могут быть и другие) процессы обработки воздуха: для точки  $H_1$  — с адиабатным увлажнением; для точки  $H_2$  — с политропным охлаждением с осушкой.

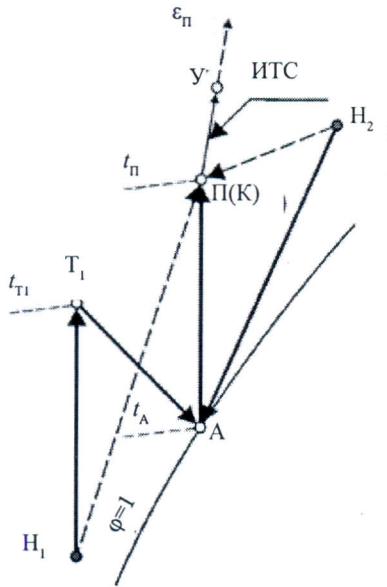


Рис. 1.

Термодинамическое состояние СКВ характеризуется следующими параметрами:  $\langle q_{T_1}, q_{T_2}, m_w, m_h \rangle$  ( $q_x = 0; m_{ri} = 0; m_{r2} = 0$ ) — для точки  $H_1$ ;  $\langle q_x, q_{T_2}, m_h \rangle$  ( $m_w = 0; m_{ri} = 0; m_{r2} = 0$ ) — для точки  $H_2$ . Управляющими переменными будут являться:  $\bar{g} = \{t_{T_1}, t_A, t_{Pi}, m_h\}$  — для точки  $H_1$ ;  $\bar{g} = \{t_A, t_{Pi}, m_h\}$  — для точки  $H_2$ .

ИТС, показанная на рис. 1 в виде отрезка, совпадающего с лучом процесса в помещении  $e_{Pi}$  и ограниченного сверху точкой  $Y$ , а снизу — точкой  $Pi$ , никакой роли в решении задачи не играет, поскольку ее опорные точки  $\bar{H}$  и  $\bar{H}$  совпадают с точкой  $Pi$ .

**Пример 2.** В отличие от предыдущей задачи, здесь изменяется ограничение 1 (см. табл. 1) и теперь расход наружного воздуха  $m_h$  может варьироваться в пределах от минимально-неизбежного  $m_{\bar{H}}$  до максимально-целесообразного  $m_{\bar{H}}$  значения, т. е.  $m_{\bar{H}} \leq m_h \leq m_{\bar{H}}$ . При этом поскольку  $m_{\bar{H}} < m_{\bar{I}}$ , то возникает необходимость в использовании рециркуляционного воздуха.

Параметры наружного климата характеризуются семью представительными точками  $H_1, H_2, \dots, H_7$  (рис. 2).

В этом примере конец вектора режима функционирования приобретает одну степень свободы: точка  $K$  уже не совпадает с точкой  $Pi$  и, оставаясь на луче процесса  $\epsilon_{Pi}$ , может скользить по нему между опорными точками  $\bar{H}$  и  $\bar{H}$ . Наличие степени свободы в выборе положения точки  $K$  обусловлено тем, что появляется возможность изменять расход наружного воздуха  $m_h$ , с целью наиболее полного использования его термодинамического потенциала. Роль ИТС (на рис. 2 она показана в виде отрезка  $Y\bar{H}$ ) в примере 2 является уже существенной.

Для каждой из представительных точек наружного климата  $H_1, H_2, \dots, H_7$  требуется определить такое положение точки  $K$  на луче процесса  $\epsilon_{Pi}$ , чтобы термодинамические состояния системы, соответствующие этим точкам наружного климата, были оптимальными. Такие положения точки

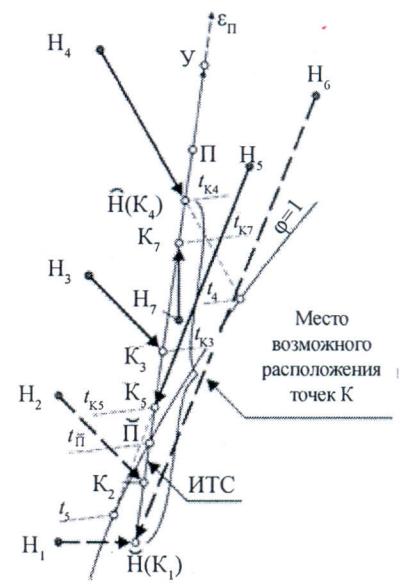


Рис. 2.

$K$  (в виде точек  $K_1, K_2, \dots, K_7$ ) для каждой из представительных точек наружного климата показаны на рис. 2. При этом следует обратить внимание на то, что точка  $K$  может оказаться также и под линией  $\phi = 1$  (например, точки  $K_1$  и  $K_2$ ).

Параметры, характеризующие термодинамическое состояние СКВ и переменные, которые должны быть приняты в качестве управляющих, для каждой из представительных точек наружного климата, показаны ниже:

- точка  $H_1: \langle q_T, m_w, m_h, m_{ri}, m_{r2} \rangle$  ( $q_x = 0$ );  
 $\bar{g} = \{m_{\bar{H}}, I_{K1} (I_{\bar{H}}), t_{\bar{H}}, m_{ri}, m_{r2}\};$
- точка  $H_2: \langle m_w, m_h, m_{ri}, m_{r2} \rangle$  ( $q_T = 0; q_x = 0$ );  
 $\bar{g} = \{m_{\bar{H}}, t_{\bar{H}}, m_{ri}, m_{r2}\};$
- точка  $H_3: \langle m_w, m_h, m_{r2} \rangle$  ( $q_T = 0; q_x = 0; m_{r2} = 0$ );  
 $\bar{g} = \{m_{\bar{H}}, t_{K3}, m_{r2}\};$
- точка  $H_4: \langle q_x, m_w, m_h, m_{r2} \rangle$  ( $q_T = 0; m_{ri} = 0$ );  
 $\bar{g} = \{m_{\bar{H}}, t_{K4}, t_{\bar{H}}, m_{r2}\};$
- точка  $H_5: \langle q_x, m_h, m_{r2} \rangle$  ( $q_T = 0; m_w = 0; m_{ri} = 0$ );  
 $\bar{g} = \{m_{\bar{H}}, t_{K5}, t_{\bar{H}}, m_{r2}\};$
- точка  $H_6: \langle q_T, m_h, m_{r2} \rangle$  ( $q_x = 0; m_w = 0; m_{ri} = 0$ );  
 $\bar{g} = \{m_{\bar{H}}, t_{K7}, m_{r2}\}.$

Выбор переменной  $I_{K1}$  или  $I_{\bar{H}}$  в качестве управляющей зависит от того, какая принята последовательность обработки воздуха: либо сначала нагрев наружного воздуха до энталпии  $I_{K1}$ , а затем его смешивание с  $m_{ri}$ , либо сначала смешивание, а затем нагрев смеси до энталпии  $I_{\bar{H}}$ . Переменные  $I_{K1}$  и  $I_{\bar{H}}$  относятся к верхнему уровню управления. На уровне подсистем они трансформируются в управляющие переменные локального уровня.

Для расчета значений расходов воздуха  $m_h$ ,  $m_{ri}$ ,  $m_{r2}$  достаточно знать только положение конца вектора режима (т. е. положение точки  $K$ ) на луче процесса  $\epsilon_{Pi}$ . Так, положение точки  $K$  относитель-

но опорных точек  $\bar{H}$  и  $\bar{H}$  характеризует необходимый расход наружного воздуха  $m_{\bar{H}}$ ; положение точки К относительно точки  $\bar{\Pi}$ , являющейся местом пересечения луча процесса  $\varepsilon_{\Pi}$  и линии  $\varphi=1$ , характеризует необходимый расход воздуха первой рециркуляции  $m_{R1}$ ; положение точки К относительно точки  $\Pi$  характеризует необходимый расход воздуха второй рециркуляции  $m_{R2}$ .

Для расчета значений  $q_T$ ,  $q_X$ ,  $m_w$  требуется знать положение всего вектора режима функционирования, поскольку разности энталпий ( $I_K - I_H$ ) и влагосодержаний ( $d_K - d_H$ ) между его концом и началом пропорциональны соответственно расходу теплоты  $q_T$  (или холода  $q_X$ ) и расходу воды  $m_w$ .

**Пример 3.** По сравнению с предыдущим примером здесь изменяется ограничение 2 (см. табл. 1), и теперь нормируемые параметры воздушной среды в рабочей зоне помещении заданы в виде некоторой области  $U_a U_b U_v$ , обозначенной  $\square U$ . Это вносит дополнительно еще одну степень свободы в возможное место расположения точки К (рис. 3).

Поскольку теперь, в зависимости от параметров наружного климата, текущее положение точки У будет изменяться в пределах  $\square U$  (например, по диагонали  $U_a U_b$ ), то следовательно будет изменяться и положение луча процесса в помещении при неизменном значении его углового коэффициента  $\varepsilon_{\Pi}$ . Поэтому точка К может перемещаться по лучу процесса  $\varepsilon_{\Pi}$  между опорными точками  $\bar{H}$  и  $\bar{H}$  (также как это было в примере 2), и в то же время смещаться вместе с лучом процесса.

Для определения положения точки К в этом случае предварительно требуется определить положение точки У, которое должно строго соответствовать параметрам наружного климата для данного момента времени. В частных случаях это конечно, не трудно. Например, для расчетной зимней точки наружного климата это будет точка  $U_a$ , а для расчетной летней точки наружного климата — точка  $U_b$ . Однако положение точки У долж-

но определяться не только для этих двух расчетных точек, но и для любой точки наружного климата за годовой цикл эксплуатации. На рис. 3 такими точками являются точки  $H_1$  и  $H_2$ , для которых показаны положения соответствующих им точек  $U_1$ ,  $U_2$  и  $K_1$ ,  $K_2$ .

Следует отметить, что если для точки  $H_1$  исходная точка  $K_1$  совпадает с опорной точкой  $\bar{H}$ , то для точки  $H_2$  исходная точка  $K_2$  сместилась вместе с лучом процесса  $\varepsilon_{\Pi}$  и изменила (при выбранной ранжировке РА— $2m_K$ ) свое положение на этом луче [4].

Термодинамическое состояние СКВ характеризуется следующими параметрами:  $\langle q_{T1}, m_{H1}, m_{R2} \rangle$  ( $q_X = 0; m_w = 0; m_{R1} = 0$ ) — для точки  $H_1$ ;  $\langle m_w, m_{\bar{H}}, m_{R2} \rangle$  ( $q_T = 0; q_X = 0; m_{R1} = 0$ ) — для точки  $H_2$ . Управляющими переменными будут являться:  $\bar{g} = \{t_{K1}, m_{\bar{H}}, m_{R2}\}$  — для точки  $H_1$ ;  $\bar{g} = \{m_{\bar{H}}, m_{R2}\}$  — для точки  $H_2$ .

**Пример 4.** По сравнению с предыдущим примером здесь изменяется (ограничение 3), и теперь значения  $q_{\Pi}$  и  $W_{\Pi}$  становятся переменными. Следовательно, значение углового коэффициента луча процесса  $\varepsilon_{\Pi}$  также изменяется. Это означает, что при изменении условий функционирования СКВ луч процесса в помещении может не только параллельно смещаться, как это было в примере 3, но, кроме того, и поворачиваться. Поэтому для одной и той же точки У (которая, также как и в примере 3, изменяет свое положение в пределах области  $U_a U_b U_v$ ) могут быть разные положения лучей процессов, в зависимости от значения их угловых коэффициентов  $\varepsilon_{\Pi}$ . На рис. 4 изображены три таких луча процесса ( $\varepsilon_{\Pi1}, \varepsilon_{\Pi2}, \varepsilon_{\Pi3}$ ), на которых положения искомых точек  $K_1, K_2, K_3$  показаны условно.

Представительные точки наружного климата  $H_1, H_2, H_3$  и векторы режимов функционирования здесь не показаны. Поэтому параметры, характеризующие термодинамическое состояние СКВ, и управляющие переменные здесь не приводятся.

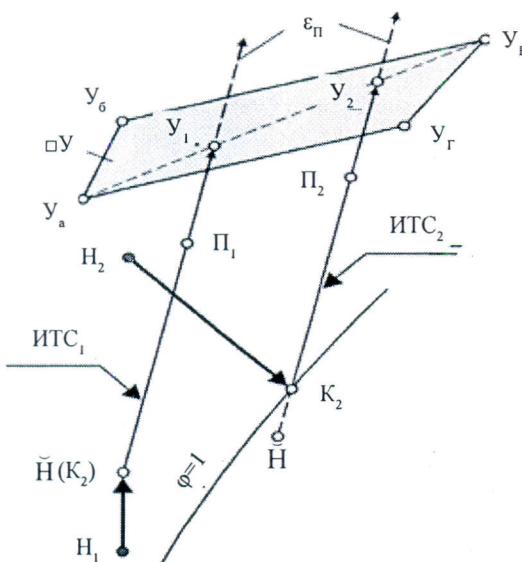


Рис. 3

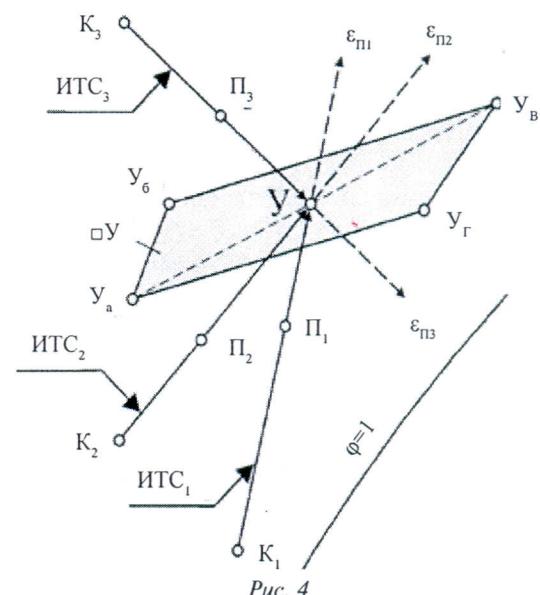


Рис. 4

Указанное выше изменение в ограничении З вносит дополнительно еще одну степень свободы в возможное место расположения точки К, поскольку положение луча процесса в помещении, а следовательно и положение ИТС, на которой располагается эта точка, может изменяться весьма существенно. На рис. 4 показано три таких положения ИТС: ИТС<sub>1</sub>, ИТС<sub>2</sub>, ИТС<sub>3</sub>, которые ограничены сверху точкой У, снизу точками К<sub>1</sub>, К<sub>2</sub>, К<sub>3</sub>, соответственно.

В результате при переменных тепловлажностных нагрузках в помещении для определения положения точки К в каждый расчетный момент времени требуется определить сначала фактическое значение углового коэффициента  $\epsilon_{\Pi}$  луча процесса в помещении, затем параметры, которые должны поддерживаться в помещении (т. е. положение точки У на диагонали У<sub>a</sub>У<sub>b</sub>), и только после этого положение точки К на луче процесса  $\epsilon_{\Pi}$  между точками Н и  $\hat{H}$ .

### Заключение

В приведенных выше примерах были рассмотрены, хотя и простые задачи, но достаточные для того, чтобы показать суть метода решения задачи векторной оптимизации для СКВ. Не углубляясь в правила определения положения точки К (в пределах статьи это сделать невозможно), было показано, как может изменяться ее положение в зависимости от принимаемых исходных условий.

На практике, конечно же, встречаются более сложные случаи, например:

- во-первых, когда требуется учитывать влияние ранее идеализируемых факторов, например, возмущающих воздействий в каналах транспортировки воздуха;

- во-вторых, если СКВ может функционировать совместно с местными системами микроклимата (доводчиками, смежными системами);

- в-третьих, когда вместо традиционных процессов тепловлажностной обработки воздуха может использоваться, например, увлажнение воздуха насыщенным паром или его осушка в воздухоочистителе;

- в-четвертых, когда рассматриваются перспективные схемные решения СКВ, в частности, двухканальная подача наружного воздуха, при которой может быть достигнуто максимальное использование термодинамического потенциала наружного воздуха; раздельная тепловлажностная обработка наружного и рециркуляционного воздуха с последующей подачей этих потоков воздуха в помещение; СКВ, обслуживающая помещения с разнохарактерными нагрузками, т. е. относящиеся к объекту II типа.

Рассмотренный метод оптимизации закладывает фундаментальную основу разработки энергосберегающих режимов для всех этих более сложных случаев. Однако при этом требуется его дальнейшее развитие.

### Список литературы

1. Коченков Н. В., Немировская В. В. Содержательная постановка задачи векторной оптимизации для систем кондиционирования воздуха // Вестник MAX. 2012. № 1.
2. Креслинь А. Я. Автоматическое регулирование систем кондиционирования воздуха. — М.: Стройиздат, 1972.
3. Рымкевич А. А. Системный анализ оптимизации общеобменной вентиляции и кондиционирования воздуха. — СПб.: АБОК С-3, 2003.
4. Коченков Н. В. Энергосберегающие режимы систем кондиционирования воздуха: Моногр. Ч. 1. СКВ, обслуживающие помещения с однохарактерными нагрузками. — СПб.: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2009.