

УДК 697.148, 628.8.02

Д. А. Авсюкевич, М. В. Егоричев

Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского

ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПАРАМЕТРОВ МИКРОКЛИМАТА В ЧИСТЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ

Представлен обзор литературы по вопросам интеллектуального управления системами вентиляции и кондиционирования воздуха, регулирования этих систем по уровню потребности, применения теории графов при моделировании микроклимата помещений. Разработана графоаналитическая модель параметров микроклимата чистых помещений, учитывающая термодинамические параметры воздуха, содержание углекислого газа, чистоту воздуха. Получены аналитические зависимости для начального состояния и конечных параметров микроклимата. Проведен анализ полученных результатов.

Ключевые слова: система вентиляции и кондиционирования, энергоэффективность, чистое помещение, температурно-влажностный режим, микроклимат, фактическая нагрузка, теория графов.

Введение

В последние годы крайне актуальны задачи энергосбережения в области строительства. В сфере жилищно-коммунального хозяйства потенциальные ресурсы энергосбережения составляют не менее 50 %. Ключевое влияние на энергопотребление зданий оказывают системы вентиляции и кондиционирования воздуха (СВКВ). Особенно это касается СВКВ чистых помещений, в которых кратность воздухообмена в несколько раз превышает кратность воздухообмена в общественных помещениях. Соответственно, производительность и энергопотребление таких СВКВ в несколько раз превышают показатели для аналогичных систем общественных зданий. Поэтому в настоящее время необходимо развитие существующих и разработка новых подходов по повышению энергоэффективности СВКВ. Широкое внедрение средств вычислительной техники, развитие нейросетей предоставляют большие возможности для решения задач энергосбережения в СВКВ.

На современном этапе необходимо применение системы управления параметрами температурно-влажностного режима и чистотой воздуха, способной к самообучению на основе непрерывной обработки больших массивов данных в режиме реального времени, т. е. основанной на принципах искусственного интеллекта. Проблема учета изменяющихся во времени (динамических) параметров температурно-влажностного режима и чистоты воздуха при создании самообучающихся оптимизационных моделей для управления СВКВ является достаточно сложной и до конца не исследованной.

Одной из задач в этом направлении является повышение энергоэффективности на основе адаптивного регулирования СВКВ чистых помещений по фактической нагрузке (по потребности) с применением технологий искусственного интеллекта. При проектировании искусственных нейронных сетей часто используются графоаналитические модели. Принципиальной особенностью графоаналитической модели формирования микроклимата чистых помещений является учет как термодинамических параметров воздуха, так и

содержания углекислого газа в воздухе и чистоты воздуха, что позволяет использовать ее при обработке данных нейронной сетью.

Обзор литературы

Современные системы управления СВКВ, как правило, регулируют температуру воздуха в помещении, а также поддерживают постоянство газового состава воздуха. Достаточно перспективной задачей является обеспечение комфортных условий в помещении и минимизация энергопотребления адаптивного регулирования СВКВ помещений по фактической нагрузке (по потребности) с применением технологий искусственного интеллекта.

Общие вопросы разработки интеллектуальных систем управления энергопотреблением в зданиях и их технологии рассматриваются в работах Ю. А. Табунщикова, например, в [1]. В работе указаны особенности математических моделей, предназначенных для оптимального управления энергосбережением, раскрыта методология создания оптимизационных математических моделей для управления, отмечено преимущество искусственных нейронных сетей перед традиционными алгоритмами управления. Принципы интеллектуализации управления системами формирования микроклимата помещений изложены в [2]. В работе [3] приведена структура системы интеллектуального управления микроклиматом, раскрыт алгоритм работы блоков такой системы, приведены интерфейсы основных подсистем.

Использование искусственных нейронных сетей при реализации алгоритмов самообучения в системах управления теплоэнергопотреблением зданий рассматривается в работе [4]. В ней отмечены особенности математических моделей теплового режима помещений, предназначенных для использования в системах управления, предложен алгоритм самообучения моделей управления теплоэнергопотреблением зданий, указаны преимущества искусственных нейронных сетей, приведен пример практической реализации алгоритмов самообучения на основе использования нейросетей. В работе [5] рассмотрена модель СВКВ с учетом неравномерности тепловой нагрузки и газового состава воздушной среды, предложены методы разработки интеллектуальных систем управления для электроприводов СВКВ, математическое описание объекта регулирования получено методами классической теории автоматического управления, оптимизация контуров регулирования выполнена с использованием методов синтеза нечетких алгоритмов и искусственных нейронных сетей. В работе [6] описана концепция создания системы управления отоплением с использованием нейронных сетей, осуществляется ее моделирование, и приводятся результаты ее испытания. Обоснование требований к контроллеру обучения на основе рекуррентной нейронной сети с долговременной памятью для систем отопления и СВКВ изложено в [7].

В ряде публикаций отмечается, что у современных СВКВ должна быть реализована адаптивная система интеллектуального управления, учитывающая динамику изменения параметров микроклимата и параметров СВКВ. Вопросы адаптивного управления микроклиматом и СВКВ, подходы к построению адаптивных систем рассмотрены в работах [8—13]. Особенности прогнозирования параметров микроклимата, учет этих особенностей в управлении вентиляционными системами рассматриваются в [14—16]. В статье [14] приводится модель контроля и прогнозирования температуры и влажности в СВКВ. Принцип управления СВКВ с использованием прогнози-

рующей модели, особенности управления с использованием МРС-регулятора описаны в работе [15]. Алгоритм работы системы автоматического управления СВКВ на основе энергосбережения предлагают авторы статьи [16].

Значительное количество публикаций посвящено созданию систем вентиляции, регулируемых по уровню потребности, т. е. в зависимости от фактической нагрузки. Вопросы энергетической эффективности вентиляции по потребности рассматриваются в монографии [17]. В ней раскрыты потенциальные возможности энергосбережения при регулировании вентиляции по фактической нагрузке, приведены основные принципы регулирования в зависимости от температуры и уровня углекислого газа в помещении. В работе [18] анализируется влияние динамического управления расходом воздуха на температурный режим системы вентиляции. В статье [19] рассматривается система динамической вентиляции подземных горных выработок с точки зрения энергосбережения горных работ.

Следует отметить, что в большинстве публикаций при исследовании режимов работы СВКВ при обосновании параметров микроклимата для их моделирования применяются методы анализа энергетического и материального балансов, системы балансовых уравнений, например, в работах [20—23].

Теория графов, свойства графов широко применяются в самых разных областях. Это относится и к созданию различных программных комплексов на основе сетей Петри, и к решению задач на сетевых системах (водопроводах, газопроводах, электросетях), и в сфере информационных технологий. Но в настоящее время недостаточно научной литературы по теории графов в области СВКВ, хотя структура СВКВ позволяет использовать эту теорию весьма эффективно. Например, в статье [24] на основе графической модели (графов) рассматривается работа системы вентиляции и процесс загрязнения фильтра в динамике, что позволяет определить наиболее эффективный способ поддержания постоянного расхода воздуха. В работе [25] элементы теории графов применяются при построении дерева целей микроклимата многофункциональной аудитории и описании структуры нейронной сети для управления микроклиматом умного дома. В публикации [26] графы используются для описания топологии вентиляционной сети при имитационном моделировании нестационарной шахтной вентиляции, основанном на ГИС-технологии. Также в работе описан прототип веб-системы для онлайн-моделирования вентиляции. В монографии [27] изложен графотеоретический подход к моделированию компонентов СВКВ и системы в целом, представлен метод структурно-матричного анализа для исследования характеристик управления моделями СВКВ в пространстве состояний. Часто к графоаналитическим (графическим) моделям относят модели, применяемые при описании процессов на $I-d$ диаграмме влажного воздуха.

Потенциальные преимущества применения теории графов при моделировании микроклимата помещений, определении энергосберегающих режимов работы СВКВ заключаются в следующем:

- возможность распознавания параметров микроклимата, элементов и подсистем СВКВ и определения взаимодействия между ними;
- возможность иллюстрации связей между входными и выходными переменными и параметрами микроклимата, между входными и выходными сигналами элементов СВКВ и связей между ними;

- возможность разработки общей модели СВКВ на основе частных моделей подсистем из базы моделей и информации о топологии СВКВ;
- возможность разработки матричных моделей СВКВ, учитывающих их структуру и взаимосвязи элементов, для их анализа;
- не требуется визуализация графа при разработке адаптивного регулирования СВКВ по фактической нагрузке на основе технологий искусственного интеллекта, достаточно цифрового описания связей между вершинами.

Из анализа приведенной литературы следует, что графо-теоретический подход практически не использовался в целях определения параметров микроклимата, разработки модели адаптивного регулирования СВКВ чистых помещений по фактической нагрузке. Нужно отметить, что возможности графо-теоретического подхода дают значительные перспективы для его применения при моделировании СВКВ. Поэтому в статье представлен новый подход к описанию процесса формирования микроклимата чистых помещений на основе графо-теоретического метода.

Целью исследований в данной статье является разработка графоаналитической модели формирования микроклимата помещений, учитывающей все параметры микроклимата и позволяющей определить параметры микроклимата с учетом динамики их изменения при обработке данных искусственной нейронной сетью, предназначенной для адаптивного регулирования СВКВ чистых помещений по фактической нагрузке. Для достижения поставленной цели в статье решается ряд частных *задач* — определение параметров наружного и внутреннего воздуха, влияющих на микроклимат в чистых помещениях, разработка параметрической модели микроклимата, формирование ориентированного направленного динамического графа микроклимата и его описание, анализ полученных аналитических зависимостей и результатов.

Метод

Объектом исследования является СВКВ чистых помещений, в которых необходимо обеспечивать поддержание температурно-влажностного режима и чистоты воздуха класса от 6 до 8 ИСО. СВКВ включает в свой состав центральный секционный приточно-рециркуляционный кондиционер с фильтром грубой очистки воздуха, фильтровальную камеру с фильтрами предварительной и тонкой очистки воздуха, запорные воздушные клапаны, клапаны избыточного давления, воздухораспределители. Принципиальная схема исследуемого объекта, для которого создается графоаналитическая модель микроклимата, представлена на рис. 1.

Решение задачи адаптивного регулирования СВКВ чистых помещений по фактической нагрузке осуществляется на основе анализа динамики изменения параметров наружного и внутреннего воздуха $t_{нв}$, $\varphi_{нв}$, $CO_{нв}$, $t_{вв}$, $\varphi_{вв}$, $CO_{вв}$, FP , тепловлажностной нагрузки, зависящей от количества персонала в чистом помещении K^P и теплопоступлений от технологического оборудования и освещения N^T , скорости генерации загрязнений в чистом помещении K^Z , т. е. расход воздуха в помещении $G(\tau)$ зависит от изменения этих параметров:

$$F(G(\tau)) = Y(t_{нв}, \varphi_{нв}, CO_{нв}, t_{вв}, \varphi_{вв}, CO_{вв}, FP, K^P, N^T, K^Z), \quad (1)$$

при следующих ограничениях:

$$t_{\text{вв}}^{\min} \leq t_{\text{вв}} \leq t_{\text{вв}}^{\max}; \varphi_{\text{вв}}^{\min} \leq \varphi_{\text{вв}} \leq \varphi_{\text{вв}}^{\max}; \text{co}_{\text{вв}}^{\min} \leq \text{co}_{\text{вв}} \leq \text{co}_{\text{вв}}^{\max}; FP \in FP^{\text{треб}};$$

$$K_{\text{мин}}^P \leq K^P \leq K_{\text{макс}}^P; N_{\text{мин}}^T \leq N^T \leq N_{\text{макс}}^T; K_{\text{мин}}^Z \leq K^Z \leq K_{\text{макс}}^Z,$$

где t — температура воздуха, φ — относительная влажность воздуха, co — концентрация углекислого газа в воздухе, FP — класс чистоты воздуха; подстрочные символы означают следующее: нв, вв, ув, пв — соответственно, параметры относятся к наружному, внутреннему, удаляемому, приточному воздуху.

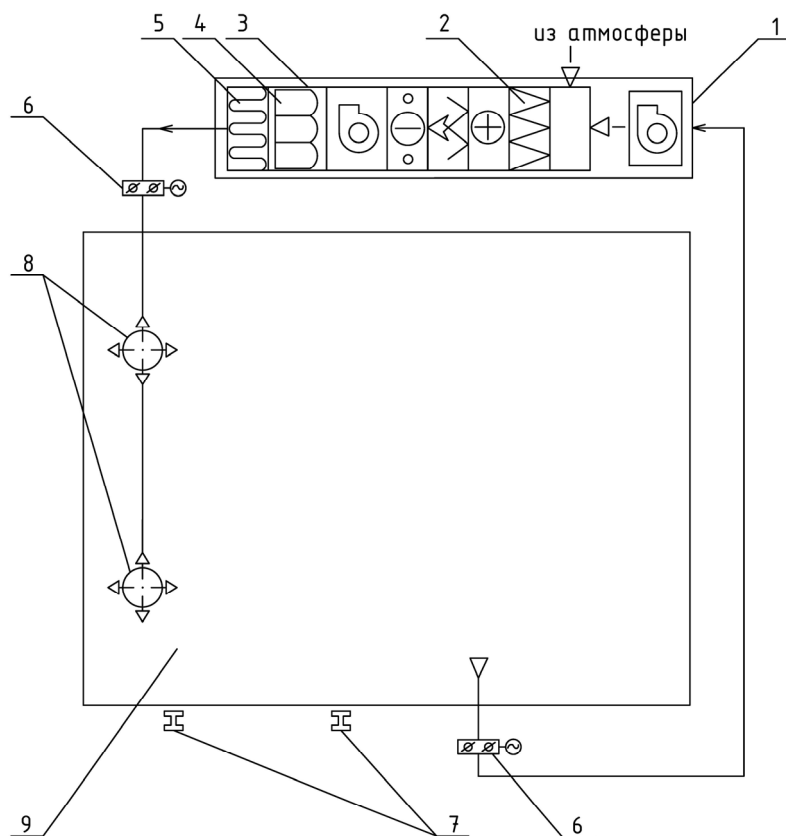


Рис. 1. Принципиальная схема рассматриваемого объекта: 1 — центральный секционный приточно-рециркуляционный кондиционер; 2 — фильтр грубой очистки воздуха; 3 — фильтровальная камера; 4 — фильтр предварительной очистки воздуха; 5 — фильтр тонкой очистки воздуха; 6 — запорные воздушные клапаны; 7 — клапаны избыточного давления; 8 — воздухораспределители; 9 — чистое помещение

При реализации оптимального по критерию энергоэффективности режима работы СВКВ адаптивная система управления поддерживает параметры микроклимата и чистоту воздуха в помещении $t_{\text{вв}}$, $\varphi_{\text{вв}}$, $\text{co}_{\text{вв}}$, $FP_{\text{вв}}$ в необходимых диапазонах. Нахождение этих параметров в заданных диапазонах является критерием качества микроклимата в чистом помещении. С учетом введенных обозначений параметрическую модель микроклимата в чистом помещении можно представить в следующем виде (рис. 2).



Рис. 2. Параметрическая модель микроклимата в чистом помещении

На рисунке 2 обозначено следующее: $\Delta Q_{огр}$ — поступление (потери) теплоты за счет теплопередачи через ограждения помещения; $\Delta Q_{инс}$ — поступление теплоты за счет солнечной радиации; $\Delta Q_{инф}$ — поступление (потери) теплоты за счет инфильтрации воздуха через ограждения помещения.

Микроклимат и чистота воздуха в помещении обеспечиваются за счет работы СВКВ. Наружный воздух с параметрами $t_{пв}$, $\varphi_{пв}$, $co_{пв}$ проходит последовательную обработку в секциях центрального кондиционера, приточный воздух подается в помещение с параметрами $t_{пв}$, $\varphi_{пв}$, $co_{пв}$, $FP_{пв}$. Под воздействием внешних возмущений, определяемых изменениями параметров окружающей среды $\Delta Q_{огр}$, $\Delta Q_{инс}$ и $\Delta Q_{инф}$, и внутренних факторов — тепловлажностной нагрузки, зависящей от K^P , N^T , K^Z , параметры воздуха в помещении изменяются, последовательно переходя в промежуточные состояния $t_{вв}$, $\varphi_{вв}$, $co_{вв}$, $FP_{вв}$, а затем в конечные состояния с параметрами $t_{ув}$, $\varphi_{ув}$, $co_{ув}$, $FP_{ув}$.

Начальное состояние воздуха задается множеством $X = \{x_i\}$, $i = 1, \dots, n$. Промежуточное и конечное состояние воздуха выражаются множеством $Y = \{y_j\}$, $j = 1, \dots, m$. Воздействующие внешние и внутренние факторы — возмущающие воздействия определяются множеством $V = \{v_l\}$, $l = 1, \dots, k$. Изменение состояния воздуха в результате возмущающих воздействий можно представить в виде отображения множества V на множество X , $\alpha_{bij} = V \rightarrow X$, где α — символ отображения элементов множества V на множество X , b_{ij} — коэффициент, учитывающий влияние возмущающих воздействий на микроклимат и чистоту воздуха в помещении.

Переход воздуха помещения из начального состояния x_i в промежуточные и конечное состояния y_j можно представить с помощью интегрального отображения $\alpha_{ij} = X \rightarrow Y$, где \int_{ij} — линейный интегральный оператор.

Ограждающие конструкции здания, внутренние поверхности помещения оказывают сопротивление воздействию внешних и внутренних факторов на параметры воздуха. Величина сопротивления определяется конструктивным

строением помещения, здания в целом. Сопrotивляемость параметров микроклимата влиянию внешних и внутренних факторов можно представить с помощью отображения $\alpha_{\alpha ij} = Y \rightarrow X$, где α_{ij} — коэффициент, учитывающий сопротивляемость параметров микроклимата возмущающим воздействиям.

В силу сказанного, процесс формирования микроклимата в чистом помещении можно представить в виде ориентированного динамического графа $\Gamma(\tau)$, вершины которого — начальное, промежуточные и конечное состояния воздуха и внешние и внутренние возмущающие воздействия. Дугами графа $\Gamma(\tau)$ являются следующие отображения: $\alpha_{bij} = V \rightarrow X$ — процессы воздействия внешних и внутренних факторов на микроклимат; $\alpha_{ij} = X \rightarrow Y$, $\alpha_j = Y \rightarrow Y$ — процессы, происходящие при переходе из одного состояния воздуха в другое состояние, т. е. процессы при формировании микроклимата; $\alpha_{\alpha ij} = Y \rightarrow X$, Y — процессы сопротивляемости параметров микроклимата возмущающим воздействиям. Модель формирования микроклимата в виде ориентированного динамического графа можно описать следующим образом:

$$\Gamma(\tau) = (V(\tau), X(\tau), Y(\tau), A(\tau), B(\tau), \int_{ij}), \quad (2)$$

с отображениями:

$$\begin{aligned} \alpha_{bij} &= V(\tau) \rightarrow X(\tau); \\ \alpha_{ij} &= X(\tau) \rightarrow Y(\tau), \alpha_{jj} = Y(\tau) \rightarrow Y(\tau); \\ \alpha_{\alpha ij} &= Y(\tau) \rightarrow X(\tau). \end{aligned} \quad (3)$$

Введенные коэффициенты и линейный интегральный оператор изменяются во времени. Индексом i обозначается исходящая вершина графа, а индексом j принимающая вершина графа.

При построении графа $\Gamma(\tau)$ приняты следующие исходные данные:

- количество начальных (исходных) состояний микроклимата в чистом помещении равно 4, $n = 4$: $x_1(\tau) — t_{пв}$, $x_2(\tau) — \phi_{пв}$, $x_3(\tau) — со_{пв}$, $x_4(\tau) — FP_{пв}$,

$$X(\tau) = \{x_1(\tau), x_2(\tau), x_3(\tau), x_4(\tau)\}; \quad (4)$$

- количество промежуточных и конечных состояний микроклимата в чистом помещении равно 8, $m = 8$: $y_1(\tau) — t_{yb}$, $y_2(\tau) — t_{bb}$, $y_3(\tau) — \phi_{yb}$, $y_4(\tau) — \phi_{bb}$, $y_5(\tau) — со_{yb}$, $y_6(\tau) — со_{bb}$, $y_7(\tau) — FP_{yb}$, $y_8(\tau) — FP_{bb}$,

$$Y(\tau) = \{y_1(\tau), y_2(\tau), y_3(\tau), y_4(\tau), y_5(\tau), y_6(\tau), y_7(\tau), y_8(\tau)\}; \quad (5)$$

- количество воздействующих внешних и внутренних факторов (возмущающих воздействий) равно 6, $k = 6$: $v_1(\tau) — \Delta Q_{огр}$, $v_2(\tau) — \Delta Q_{инс}$, $v_3(\tau) — \Delta Q_{инф}$, $v_4(\tau) — K^P$, $v_5(\tau) — N^T$, $v_6(\tau) — K^Z$,

$$V(\tau) = \{v_1(\tau), v_2(\tau), v_3(\tau), v_4(\tau), v_5(\tau), v_6(\tau)\}. \quad (6)$$

Граф формирования микроклимата в чистом помещении представлен на рис. 3.

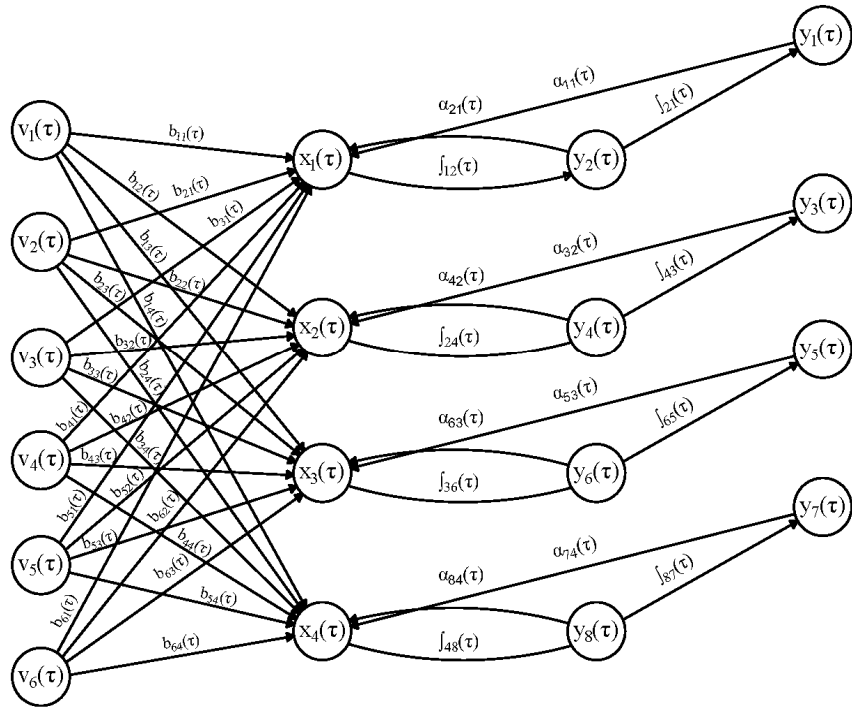


Рис. 3. Граф формирования микроклимата в чистом помещении

С учетом сопротивляемости параметров микроклимата возмущающим воздействиям коэффициент $\alpha_{ij}(\tau)$ имеет знак, противоположный коэффициенту, который учитывает влияние возмущающих воздействий на $b_{ij}(\tau)$.

В результате анализа графа формирования микроклимата в чистом помещении можно сделать вывод, что начальные состояния микроклимата в чистом помещении $x_i(\tau)$ формируются алгебраической суммой результатов влияния возмущающих воздействий и противодействием параметров микроклимата этим воздействиям.

В этом случае начальные состояния микроклимата в чистом помещении можно представить в виде системы уравнений следующим образом:

$$\begin{cases} x_1(\tau) = -\alpha_{21}(\tau)y_2(\tau) - \alpha_{11}(\tau)y_1(\tau) + b_{11}(\tau)v_1(\tau) + b_{21}(\tau)v_2(\tau) + \\ + b_{31}(\tau)v_3(\tau) + b_{41}(\tau)v_4(\tau) + b_{51}(\tau)v_5(\tau) + b_{61}(\tau)v_6(\tau), \\ x_2(\tau) = -\alpha_{42}(\tau)y_4(\tau) - \alpha_{32}(\tau)y_3(\tau) + b_{12}(\tau)v_1(\tau) + b_{22}(\tau)v_2(\tau) + \\ + b_{32}(\tau)v_3(\tau) + b_{42}(\tau)v_4(\tau) + b_{52}(\tau)v_5(\tau) + b_{62}(\tau)v_6(\tau), \\ x_3(\tau) = -\alpha_{63}(\tau)y_6(\tau) - \alpha_{53}(\tau)y_5(\tau) + b_{13}(\tau)v_1(\tau) + b_{23}(\tau)v_2(\tau) + \\ + b_{33}(\tau)v_3(\tau) + b_{43}(\tau)v_4(\tau) + b_{53}(\tau)v_5(\tau) + b_{63}(\tau)v_6(\tau), \\ x_4(\tau) = -\alpha_{84}(\tau)y_8(\tau) - \alpha_{74}(\tau)y_7(\tau) + b_{14}(\tau)v_1(\tau) + b_{24}(\tau)v_2(\tau) + \\ + b_{34}(\tau)v_3(\tau) + b_{44}(\tau)v_4(\tau) + b_{54}(\tau)v_5(\tau) + b_{64}(\tau)v_6(\tau). \end{cases} \quad (7)$$

Из этих уравнений получаются выражения для промежуточного и конечного состояний микроклимата в чистом помещении. Например, конечные параметры, являющиеся критерием качества микроклимата, после преобразования системы уравнений (7) можно представить следующим образом:

$$\begin{cases} y_1(\tau) = [-x_1(\tau) - \alpha_{21}(\tau)y_2(\tau) + b_{11}(\tau)v_1(\tau) + b_{21}(\tau)v_2(\tau) + \\ + b_{31}(\tau)v_3(\tau) + b_{41}(\tau)v_4(\tau) + b_{51}(\tau)v_5(\tau) + b_{61}(\tau)v_6(\tau)] / \alpha_{11}(\tau), \\ y_3(\tau) = [-x_2(\tau) - \alpha_{42}(\tau)y_4(\tau) + b_{12}(\tau)v_1(\tau) + b_{22}(\tau)v_2(\tau) + \\ + b_{32}(\tau)v_3(\tau) + b_{42}(\tau)v_4(\tau) + b_{52}(\tau)v_5(\tau) + b_{62}(\tau)v_6(\tau)] / \alpha_{32}(\tau), \\ y_5(\tau) = [-x_3(\tau) - \alpha_{63}(\tau)y_6(\tau) + b_{13}(\tau)v_1(\tau) + b_{23}(\tau)v_2(\tau) + \\ + b_{33}(\tau)v_3(\tau) + b_{43}(\tau)v_4(\tau) + b_{53}(\tau)v_5(\tau) + b_{63}(\tau)v_6(\tau)] / \alpha_{53}(\tau), \\ y_7(\tau) = [-x_4(\tau) - \alpha_{84}(\tau)y_8(\tau) + b_{14}(\tau)v_1(\tau) + b_{24}(\tau)v_2(\tau) + \\ + b_{34}(\tau)v_3(\tau) + b_{44}(\tau)v_4(\tau) + b_{54}(\tau)v_5(\tau) + b_{64}(\tau)v_6(\tau)] / \alpha_{74}(\tau). \end{cases} \quad (8)$$

Результаты и обсуждение

Решение частных задач, поставленных в статье, позволяет построить граф формирования микроклимата, получить аналитические зависимости, связывающие между собой параметры воздуха чистого помещения. Математические модели (7) и (8) отражают связь между входными и выходными переменными и параметрами микроклимата. Они описывают процесс формирования микроклимата и позволяют определить его параметры $t_{ув}$, $\phi_{ув}$, $CO_{ув}$, $FP_{ув}$ с учетом динамики их изменения в результате влияния возмущающих воздействий $\Delta Q_{огр}$, $\Delta Q_{инс}$, $\Delta Q_{инф}$, K^P , N^T , K^Z . Но эти модели не отражают связи параметров температурно-влажностного режима и чистоты воздуха с состоянием СВКВ. Для этого на следующем этапе исследований энергосберегающего регулирования СВКВ по фактической нагрузке разрабатывается модель адаптивного регулирования СВКВ на основе метода пространства состояний, который позволяет исследовать сущность динамической связи между входными возмущающими воздействиями и переменными выхода, определять состояние СВКВ с учетом результатов, полученных в данной статье.

Граф формирования микроклимата в чистом помещении, представленный в данной статье, может быть успешно применен при построении искусственной нейронной сети, предназначенной для адаптивного регулирования СВКВ по фактической нагрузке. Вершины полученного графа являются основой для моделирования нейронов в искусственной нейронной сети, а разработанная графоаналитическая модель параметров микроклимата представляет собой структурную единицу представления данных в нейронной сети. При этом граф формирования микроклимата можно изменять в режиме реального времени, оптимизировать, настраивать в соответствии с изменением параметров наружного и внутреннего воздуха, тепловлажностной нагрузки, скорости генерации загрязнений в чистом помещении. Все эти параметры могут храниться в виде файлов, а затем извлекаться из них.

Анализ полученных результатов показывает их сходимость с результатами аналогичных исследований [8, 27], при этом полученные результаты

учитывают не только термодинамические параметры воздуха, но и содержание углекислого газа в воздухе, чистоту воздуха в помещении.

Таким образом, получена графоаналитическая модель параметров микроклимата в чистых помещениях, которая может быть использована при обработке данных нейронной сетью, предназначенной для адаптивного регулирования СВКВ по фактической нагрузке.

Выводы

1. Проведен обзор литературы по вопросам интеллектуального управления СВКВ, регулирования СВКВ по уровню потребности, применения теории графов в области СВКВ.

2. Определены параметры наружного и внутреннего воздуха, влияющие на микроклимат в чистых помещениях.

3. Разработана графоаналитическая модель параметров микроклимата в чистых помещениях, учитывающая как термодинамические параметры воздуха, так и содержание углекислого газа, чистоту воздуха и включающая в себя граф формирования микроклимата и аналитические зависимости для начального состояния и для конечных параметров микроклимата.

4. Выявлено, что начальные состояния микроклимата в помещении формируются алгебраической суммой результатов влияния возмущающих воздействий и противодействием параметров микроклимата этим воздействиям.

5. Выполнен анализ полученных результатов, показана их сходимость с результатами аналогичных исследований.

6. Результаты исследования могут быть использованы разработчиками систем адаптивного регулирования СВКВ помещений по фактической нагрузке (по потребности) с применением искусственных нейронных сетей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Табунициков Ю. А. Прорывные IT-технологии: интеллектуальные автоматизированные системы управления энергопотреблением и микроклиматом зданий // Энергосбережение. 2020. № 1. С. 14—25.

2. Кувшинов Ю. Я., Мансуров Р. Ш. Интеллектуальная система управления процессами формирования микроклимата помещений // АВОК. 2011. № 8. С. 17—23.

3. Глебов Р. С., Туманов М. П., Антюшин С. С. Система интеллектуального управления микроклиматом // Программное и информационное обеспечение систем различного назначения на базе персональных ЭВМ // Межвузовский сборник научных трудов. 2012. Вып. 15. М. : МГУПИ, 2012. С. 50—57.

4. Бродач М. М., Шилкин Н. В. Нейросети: возможности использования алгоритмов самообучения в системах управления теплоэнергоснабжением зданий // АВОК. 2019. № 4. С. 40—44.

5. Благодаров Д. А., Костин А. А., Сафонов Ю. М., Тарасов А. С. Интеллектуальные методы управления в системах вентиляции и кондиционирования воздуха // Вестник ИГЭУ. 2013. № 6. С. 1—4.

6. Krauss J., Bauer M., Bichsel J., Morel N. Energy and HVAC: NEUROBAT — a SelfCommissioned Heating Control System Using Neural Networks // Sensors in Intelligent Buildings. 2005. No. 2. Pp. 63—83.

7. Wang Y., Velswamy K., Huang B. A long-short term memory recurrent neural network based reinforcement learning controller for office heating ventilation and air conditioning systems // Processes. 2017. Vol. 5. Iss. 3. Pp. 1—18.

8. Карелина Е. Б. Разработка интеллектуального комплекса для адаптивного управления параметрами микроклимата процессов хранения муки: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. М. : МГУПП, 2018. 23 с.

9. Подобед М. Ю., Сарока В. В. Адаптивное управление системой кондиционирования воздуха по обобщающему критерию температурного режима // Труды БГТУ. 2018. Серия 3. № 1. С. 67—71.

10. Sokolov V., Krol O., Andriichuk V. Improvement of HVAC systems based on adaptive predictive control // International Scientific Conference Ecological and Biological Well-Being of Flora and Fauna. 2023. No. 07020. Pp. 9.
11. Adaptive Control for Mechanical Ventilation for Improved Pressure Support / J. Reinders, B. Hunnekens, F. Heck, T. Oomen, N. van de Wouw // IEEE Transactions on Control Systems Technol. 2021. No. 29(1). Pp. 180—193.
12. Пешко М. С. Адаптивная система управления параметрами микроклимата процессов производства и хранения пищевых продуктов: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. М., 2015. 23 с.
13. Благовещенская М. М., Благовещенский И. Г., Мокрушин С. А., Благовещенский В. Г. Адаптивное управление параметрами микроклимата многофункциональной автоматизированной теплицы с интеллектуальной системой севооборота // Информатизация и автоматизация в пищевой промышленности. 2022. № 1. С. 66—71.
14. Rehr J., Schwingshackl D., Horn V. Model Predictive Control of Temperature and humidity in Heating, Ventilation and Air Conditioning Systems // IFIP Advances in Information and Communication Technology. 2014. No. 1. Pp. 285—295.
15. Андрийчук В. Н., Соколов В. И., Андрийчук Н. Д. Управление системами отопления, вентиляции и кондиционирования на основе MPC-подхода // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2022. № 5(157). С. 5—13.
16. Некрасов И. Н., Пудиков В. В., Шишкин Е. В. Алгоритм управления системами кондиционирования воздуха специальных объектов на основе энергосбережения // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. 2022. № 681. С. 115—118.
17. Linder F. Demand-Controlled Ventilation and Energy Efficiency // White Paper. 2013. No. 1. Pp. 20.
18. Глебов Р. С., Туманов М. П., Антюшин С. С. Динамическое изменение расхода воздуха в системах вентиляции // Промышленные АСУ и контроллеры. 2013. № 3. С. 7—11.
19. Kuchkin A., Nikolaev F. IoT-based Mine Ventilation Control System Architecture with Digital Twin // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing. 2020. No. 1. Pp. 1—5.
20. Ha Q., Vakiloraya V. Modeling and optimal control of an energy-efficient hybrid solar air conditioning system // Automation in Construction. 2014. No. 1. Pp. 31—41.
21. Laughman C. R., Qiao H., Bortoff S. A., Burns D. J. Simulation and optimization of integrated air-conditioning and ventilation systems. Building Simulation Conference. 2017. No. 1. Pp. 17—21.
22. Торгашина С. Н., Гадаборшева Т. Б., Косовцев В. Д., Чернобай Е. А. Математическая модель процесса теплообмена в солнечной системе теплоснабжения // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2021. Вып. 4(85). С. 192—200.
23. Nekrasov F. V. Mathematical Modeling of a Hybrid Ventilation System with a Technical Floor // AIP Conference Proceedings. 2023. No. 1. Pp. 10—20.
24. Марченко А. С., Сулин А. Б., Афанасьев С. М. Имитационное моделирование процессов в системах жизнеобеспечения // Вестник Международной академии холода. 2018. № 1. С. 67—73.
25. Мозохин А. Е. Методика обеспечения комфортного состояния микроклимата умного дома с использованием ансамбля нечетких искусственных нейронных сетей // Информатика и автоматизация. 2021. № 20. С. 1418—1447.
26. Liu H., Mao S., Li M., Lyu P. A GIS Based Unsteady Network Model and System Applications for Intelligent Mine Ventilation // Discrete Dynamics in Nature and Society. 2020 No. 5. Pp. 1—8.
27. Yao Y., Yu Y. Modeling and control in air-conditioning systems. Link, 2017. 479 p.

© Авсюкевич Д. А., Егоричев М. В., 2024

Поступила в редакцию
в июне 2024 г.

Ссылка для цитирования:

Авсюкевич Д. А., Егоричев М. В. Графоаналитическая модель параметров микроклимата в чистых помещениях // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2024. Вып. 3(96). С. 55—66. DOI: 10.35211/18154360_2024_3_55.

Об авторах:

Авсюкевич Дмитрий Алексеевич — д-р техн. наук, проф., старший преподаватель каф. энерго-снабжения объектов наземной космической инфраструктуры, Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского. Российская Федерация, 197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13; vka@mail.ru

Егоричев Максим Вячеславович — адъюнкт, Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского. Российская Федерация, 197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13

Dmitry A. Avsyukevich, Maxim V. Egorichev

Mozhaisky Military Space Academy

GRAPH-ANALYTICAL MODEL OF MICROCLIMATE PARAMETERS IN CLEAN ROOMS

A review of the literature is presented on the issues of intelligent control of the ventilation and air conditioning system (HVAC), regulation of HVAC according to the level of demand, and the application of graph theory in modeling the microclimate of premises. A graphic-analytical model of the microclimate parameters of clean rooms has been developed, taking into account the thermodynamic parameters of the air, carbon dioxide content, and air purity. Analytical dependencies for the initial state and final parameters of the microclimate were obtained. An analysis of the results obtained was carried out.

Key words: ventilation and conditioning system, energy efficiency, clean room, temperature-humidity regime, microclimate, actual load, graph theory.

For citation:

Avsyukevich D. A., Egorichev M. V. [Graph-analytical model of microclimate parameters in clean rooms]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2024, iss. 3, pp. 55—66. DOI: 10.35211/18154360_2024_3_55.

About authors:

Dmitry A. Avsyukevich — Doctor of Engineering Sciences, Professor, Mozhaisky Military Space Academy. 13, Zhdanovskaya st., Saint Petersburg, 197198, Russian Federation; vka@mail.ru

Maxim V. Egorichev — Adjunct, Mozhaisky Military Space Academy. 13, Zhdanovskaya st., Saint Petersburg, 197198, Russian Federation