

Математическое моделирование распределения воздуха в системах вентиляции жилых зданий

Михаил Александрович КРИВОШЕИН, кандидат технических наук, директор, e-mail: 22kma@mail.ru
ООО «Техвент», 644065 Омск, ул. Нефтезаводская, 38Е

Александр Дмитриевич КРИВОШЕИН, кандидат технических наук, доцент, e-mail: gshomsk@mail.ru
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)»,
644080 Омск, просп. Мира, 5

Аннотация. Рассмотрены основные положения математического моделирования воздушного режима жилых зданий, а также предложено решение этой задачи на основе теории гидравлических цепей. Приведены зависимости, описывающие взаимосвязь потерь давления и расхода воздуха для отдельных элементов систем вентиляции. Предложены формулы, позволяющие с более высокой точностью учитывать характеристики вентиляторов, приточных и вытяжных клапанов, оконных и дверных блоков, включаемых в аэродинамическую сеть систем вентиляции. Проведена оценка влияния на результаты математического моделирования способа задания зависимости расхода воздуха от перепада давления. Представлены примеры составления расчетных схем и графов некоторых систем вентиляции, алгоритм расчета, результаты моделирования воздушного режима зданий с учетом изменения характеристик вентиляционных элементов на стадии эксплуатации.

Ключевые слова: вентиляция, математическое моделирование, потери давления, расход воздуха, характеристики сопротивлений.

MATHEMATICAL MODELING OF AIR DISTRIBUTION IN VENTILATION SYSTEMS OF RESIDENTIAL BUILDINGS

Mikhail A. KRIVOSHEIN, e-mail: 22kma@mail.ru

Tekhvent, Neftrezavodskaya ul., 38E, Omsk 644065, Russian Federation

Alexander D. KRIVOSHEIN, e-mail: gshomsk@mail.ru

Siberian State Automobile and Highway University, Prospekt Mira, 5, Omsk 644080, Russian Federation

Abstract. The main provisions of mathematical modeling of air regime of residential buildings are considered; the solution of this problem on the basis of the theory of hydraulic circuits is also offered. The dependences describing the relationship of pressure losses and airflow rate for individual elements of ventilation systems are given. The formulas making it possible to take into account with higher accuracy the characteristics of fans, supply and exhaust valves, window and door units included in the aerodynamic network of ventilation systems are proposed. The influence of the method of setting the dependence of airflow on the pressure drop on the results of mathematical modeling is evaluated. Examples of calculation schemes and graphs of some ventilation systems, calculation algorithm, and simulation results of air conditions of buildings with due regard for changes in the characteristics of ventilation elements at the operation stage are presented.

Key words: ventilation, mathematical modeling, pressure loss, air flow rate, resistance characteristics.

Введение

Повышение герметичности ограждающих конструкций современных жилых зданий обусловило появление ряда проблем, связанных с обеспечением требуемого воздухообмена помещений и нарушением работы систем вентиляции зданий [1–10]. Как следствие — перетекание воздуха между квартирами, нарушение работы вытяжных вентиляционных каналов на стадии эксплуатации, повышение относитель-

ной влажности и ухудшение качества воздуха [7, 8].

Система вентиляции современного здания представляет собой достаточно сложную и разветвленную сеть воздухопроводов, приточных и вытяжных устройств (клапанов, вентиляторов), связанных между собой как непосредственно через общие каналы, так и посредством внутренних дверей, лестничных клеток, лифтовых шахт.

Анализ и прогнозирование экс-

плуатационного состояния подобных систем при различных сочетаниях внешних и внутренних воздействий возможно на основе математического моделирования с учетом фактических характеристик ограждающих конструкций и элементов систем вентиляции.

Не вдаваясь глубоко в историю вопроса, следует отметить несколько известных подходов к решению задач моделирования и расчета воздушного режима зданий. В частности, на основе тео-

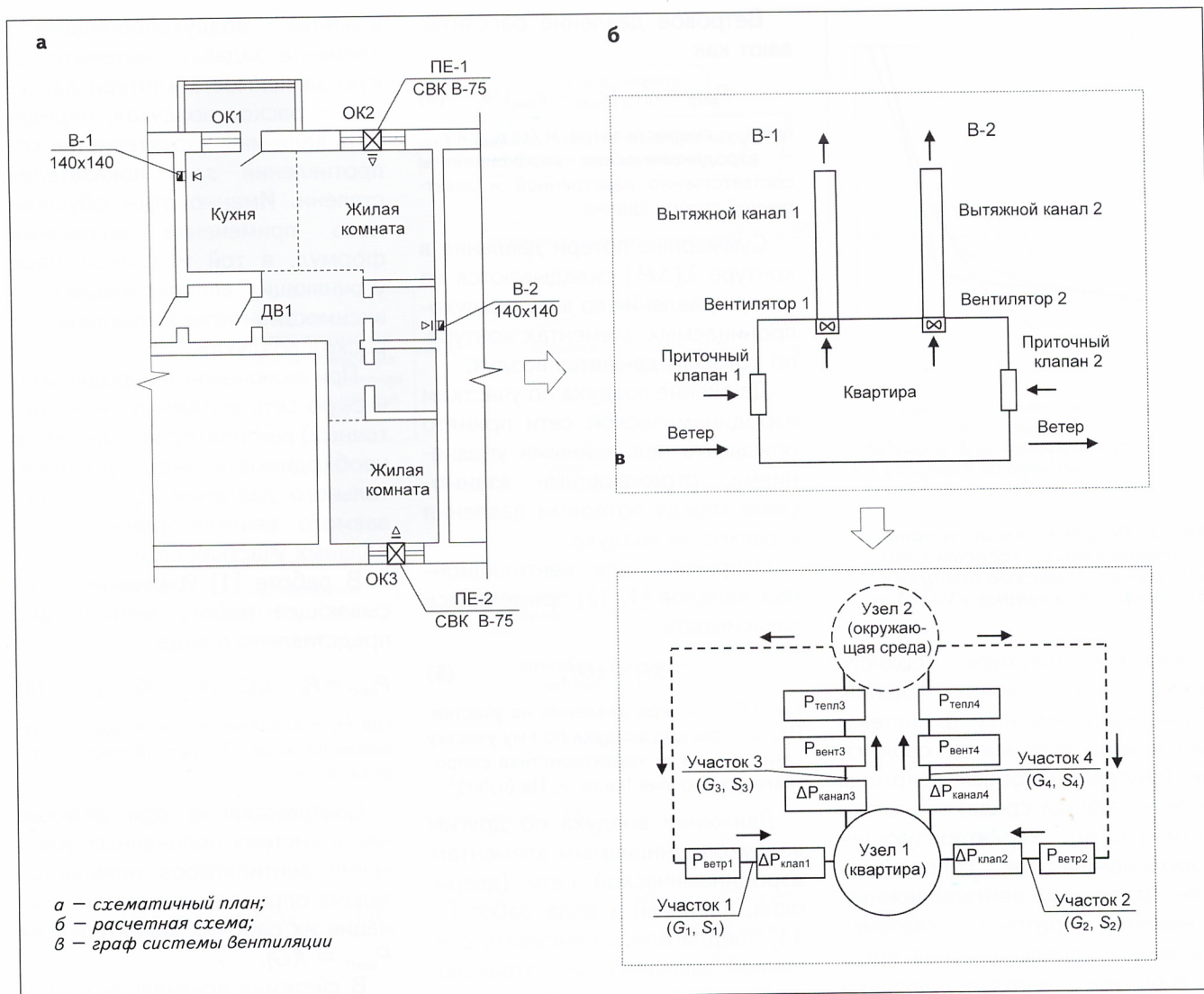


Рис. 1. Граф системы вентиляции двухкомнатной квартиры верхнего этажа многоквартирного жилого дома

рии гидравлических цепей [11–15] либо методами вычислительной гидродинамики [16–20].

В данной статье рассмотрено решение задачи моделирования воздушного режима зданий на основе теории гидравлических цепей.

Общие положения

В общем случае здание с ограждающими конструкциями и системой вентиляции представляется в виде аэродинамической сети заданной конфигурации, составленной с учетом реальной топологии и геометрических размеров ее элементов.

Отдельные помещения рассматривают в виде узлов (блоков), соединенных между собой связями (участками сети). Связи характеризуют сопротивление ограждающих конструкций, вентиляционных каналов, приточных или вытяжных решеток, клапанов и других элементов системы вентиляции.

К узлам под воздействием перепада давлений подходит и уходит определенное количество воздуха; воздушный баланс каждого из узлов остается нулевым (количество поступившего воздуха равно ушедшему).

На основе расчетной схемы аэ-

родинамической сети составляется граф системы вентиляции, для которого определяется число независимых контуров, по которым происходит движение воздуха. Сумма перепадов давлений в каждом контуре равна нулю [1, 11, 12, 14–16] (должно выполняться условие равенства создаваемых и теряемых давлений):

$$\Sigma(P_i) = \Sigma(\Delta P_i), \quad (1)$$

где $\Sigma(P_i)$ – сумма создаваемых давлений в контуре, Па; $\Sigma(\Delta P_i)$ – сумма потерь давления на всех участках контура, Па.

В качестве примера на рис. 1 показан схематичный план двух-



Рис. 2. Результаты испытаний и аппроксимация зависимости «давление — расход воздуха» для оконного клапана «VentAir»

комнатной квартиры верхнего этажа многоэтажного здания. Расчетная схема и граф системы вентиляции включают в себя узлы (внутренний объем квартиры и окружающая среда) и участки сети (связи), характеризующие аэродинамическое сопротивление отдельных вентиляционных элементов (приточные клапаны, вытяжные каналы, вентиляторы).

В общем случае при наличии в контуре вентилятора, тепловых и ветровых перепадов давлений уравнение (1) примет вид

$$P_{\text{тепл}} \pm P_{\text{ветр}} + P_{\text{вент}} = \Sigma(\Delta P_i), \quad (2)$$

где $P_{\text{тепл}}$ — тепловой перепад давлений, Па; $P_{\text{ветр}}$ — ветровое давление, Па, принимаемое со знаком плюс для наветренной и со знаком минус для заветренной стороны здания; $P_{\text{вент}}$ — давление, создаваемое вентилятором, Па.

Тепловой перепад определяется по формуле

$$P_{\text{тепл}} = (\rho_n - \rho_v)gh_p, \quad (3)$$

где ρ_n , ρ_v — плотность соответственно наружного и внутреннего воздуха при расчетных температурах, $\text{кг}/\text{м}^3$; g — ускорение свободного падения ($g = 9,81 \text{ м}/\text{с}^2$); h_p — расстояние по вертикали от центра приточного устройства до устья вытяжной вентиляционной шахты или оголовка вентиляционного канала, м.

Ветровое давление рассчитывают как

$$P_{\text{ветр}} = v_n^2 \rho_n (c_{\text{нав}} - c_{\text{зав}})/4, \quad (4)$$

где v_n — скорость ветра, $\text{м}/\text{с}$; $c_{\text{нав}}$ и $c_{\text{зав}}$ — аэродинамические коэффициенты соответственно наветренной и заветренной сторон здания.

Суммарные потери давления в контуре $\Sigma(\Delta P_i)$ складываются из потерь давления во всех воздухопроницаемых элементах контура, по которым движется воздух.

Движение воздуха по участкам аэродинамической сети принято описывать нелинейными уравнениями, отражающими взаимосвязь между потерями давления и расходом воздуха.

Например, для вентиляционных каналов [1, 12] применялась зависимость

$$\Delta P_i = s_i G_i^2, \quad (5)$$

где ΔP_i — потери давления на участке, Па; G_i — расход воздуха по i -му участку сети, $\text{кг}/\text{ч}$; s_i — характеристика сопротивления i -го участка сети, $\text{Па} \cdot (\text{ч}/\text{кг})^2$.

Движение воздуха по другим воздухопроницаемым элементам аэродинамической сети (двери, окна, клапаны) в ряде работ [7, 14] предлагалось описывать степенной зависимостью, отражающей взаимосвязь между потерями давления и расходом воздуха

$$\Delta P_i = s_i G_i^\beta, \quad (6)$$

где β — показатель фильтрации.

Для оконных блоков и дверей в работе [1] использовано выражение

$$\Delta P_i = s_1 G_i + s_2 G_i^2. \quad (7)$$

Сложность реализации изложенного подхода заключается в том, что перемещение воздуха через отдельные элементы рассматриваемой аэродинамической сети характеризуется разным режимом течения. Соответственно для корректного описания зависимости между перепадом давления и расходом воздуха необходимо в каждом кон-

кретном воздухопроницаемом элементе задавать математическую зависимость «потери давления — расход воздуха», определять величины характеристик сопротивлений s_i и показателей степени. Именно этим обусловлено применение различных формул, в той или иной мере уточняющих аппроксимацию зависимости «потери давления — расход воздуха».

При включении в аэродинамическую сеть вытяжных (или приточных) вентиляторов появляется необходимость учета дополнительного давления $P_{\text{вент}}$, создаваемого вентиляторами на отдельных участках сети.

В работе [1] уравнение, описывающее работу вентилятора, представлено в виде

$$P_{\text{вент}} = P_0 - s_1(G_i/\rho) - s_2(G_i/\rho)^2, \quad (8)$$

где P_0 — давление вентилятора при нулевом расходе, Па; ρ — плотность воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Соответственно при включении в систему нелинейных уравнений вентиляторов появляется задача определения и аппроксимации их рабочих характеристик $P_{\text{вент}} = f(G)$.

В системах вентиляции с применением приточных и вытяжных клапанов, изменяющих свои характеристики в зависимости от степени открытия регулирующей заслонки или положения ветрозащитной планки, задача моделирования воздушного режима зданий осложняется еще и необходимостью составления уравнений «потери давления — расход воздуха» для этих устройств, что в ряде случаев требует задания характеристик с переломными точками.

Следует отметить, что при расчете систем вентиляции с использованием ЭВМ в формулах (5) — (8) требовалось введение абсолютной величины G_i (по модулю):

$$\Delta P_i = s_i |G_i| G_i; \quad (9)$$

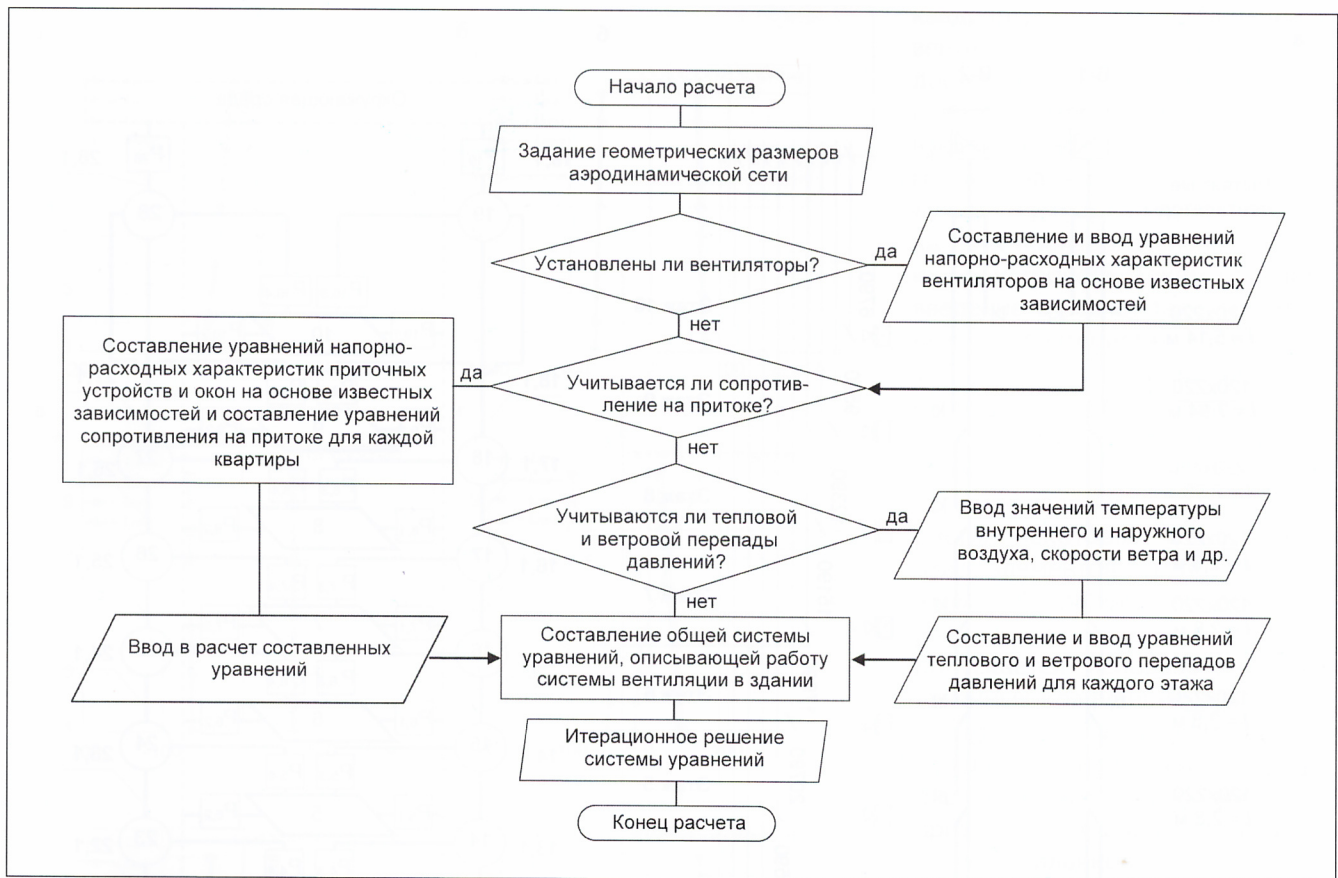


Рис. 3. Алгоритм расчета системы вентиляции [15]

$$\Delta P_i = s_1 G_i + s_2 |G_i| G_i \quad (10)$$

или

$$\Delta P_i = s_i |G_i|^{\beta-1} G_i. \quad (11)$$

Введение модуля G_i необходимо для случаев, когда фактическое направление движения воздуха противоположно заданному. Отсутствие модуля в данных формулах исключает возможность изменения направления движения, так как возведение отрицательного расхода в четную степень приводит к положительному значению данной величины.

Также введение модуля указывало на то, что при отрицательных значениях расхода воздуха (случаи, когда направление движения противоположно заданному) движение воздуха будет определяться аналогичной зависимостью. В некоторых эле-

ментах аэродинамической сети (например, движение воздуха по вентиляционным каналам) данное условие справедливо, однако в ряде случаев, при изменении направления движения воздуха, зависимость может изменяться. Простейший пример — обратный клапан, который при движении воздуха в обратном направлении закрывается, и при любых перепадах давлений расход воздуха близок к нулю. Таким образом, для полного описания работы элемента сети необходимо вводить в расчет несколько формул (одну в области отрицательных расходов, другую — в области положительных).

Задача моделирования распределения воздуха в системах вентиляции зданий сводится к составлению системы нелинейных уравнений (уравнений всех независимых контуров системы)

на основе расчетной схемы системы вентиляции и к последующему решению системы уравнений с использованием различных математических методов.

Предлагаемое решение

Расширение возможностей современной вычислительной техники и совершенствование стандартных программных продуктов позволяют упростить подход к формированию систем нелинейных уравнений, обеспечить более точное и универсальное описание зависимостей «потери давления — расход воздуха».

Предлагается при моделировании воздушного режима здания для описания «потери давления — расход воздуха» любого вентиляционного элемента использовать известную зависимость в виде алгебраического многочлена [11]

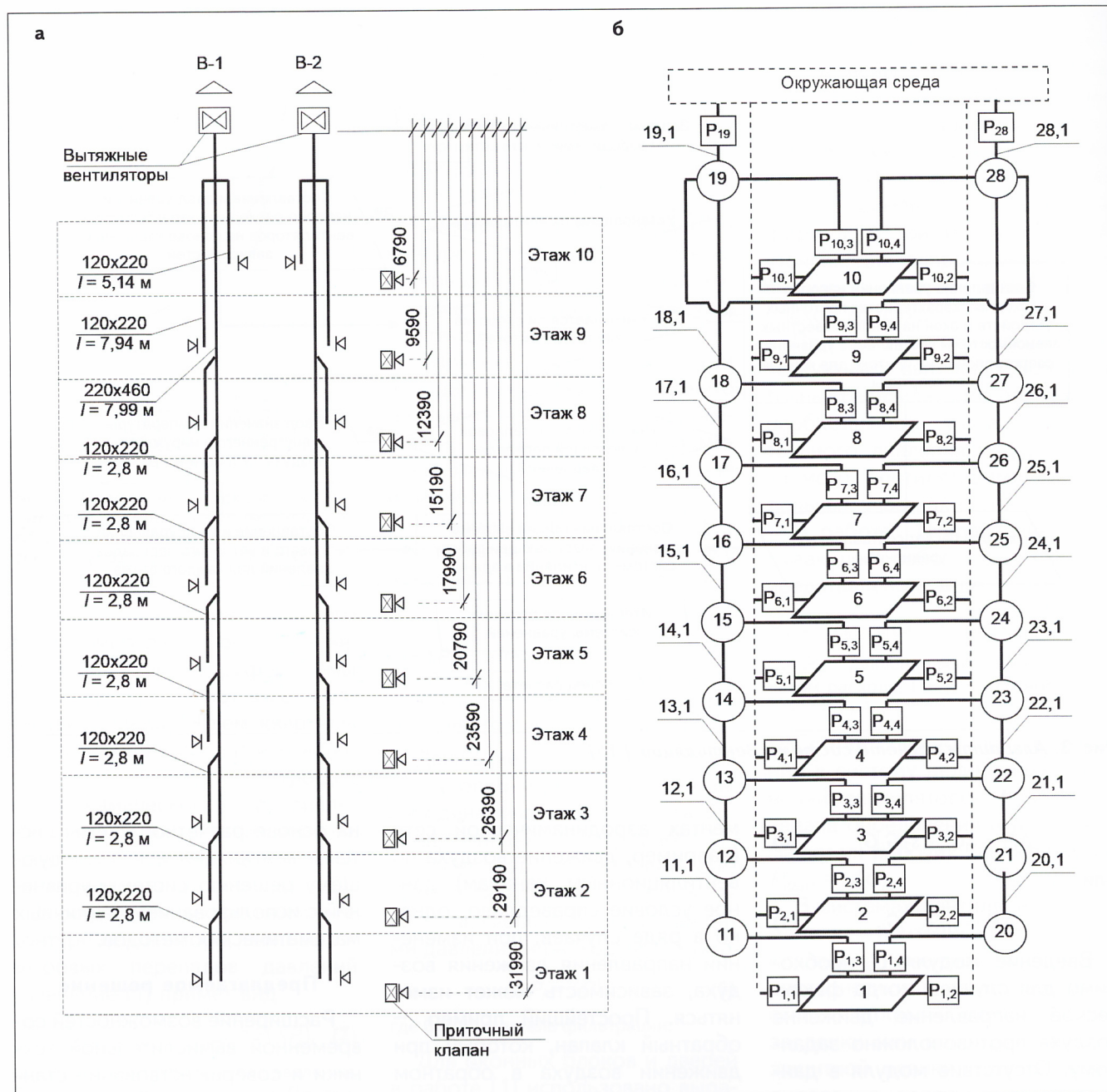


Рис. 4. Расчетная схема (а) и граф (б) гибридной системы вентиляции 10-этажного многоквартирного жилого дома

$$f_i(x_i) = s'_i x_i + s''_i x_i^2 + s'''_i x_i^3 \dots \quad (12)$$

Применительно к рассматриваемой задаче для i -го элемента вентиляционной сети можно записать

$$\Delta P_i = s_{i,1} G_i + s_{i,2} G_i^2 + s_{i,3} G_i^3 + \dots + s_{i,k} G_i^k \quad (13)$$

В данном случае нет необходимости во введении модуля или

нескольких формул для одного элемента сети, так как аппроксимирующая функция позволяет описать значения расходов, находящиеся как в положительной, так и в отрицательной областях. Исключением являются вентиляционные каналы и воздуховоды, для которых следует пользоваться формулой (5). Коэффициенты $s_{i,1}, s_{i,2}, s_{i,3}, \dots, s_{i,k}$ определяют

путем аппроксимации характеристик устройств, полученных по результатам испытаний или справочным данным. Количество коэффициентов зависит от степени полиномиальной зависимости, наиболее близко описывающей работу устройства. При этом возможно указывать диапазоны расходов воздуха, при которых допускается использование зависи-

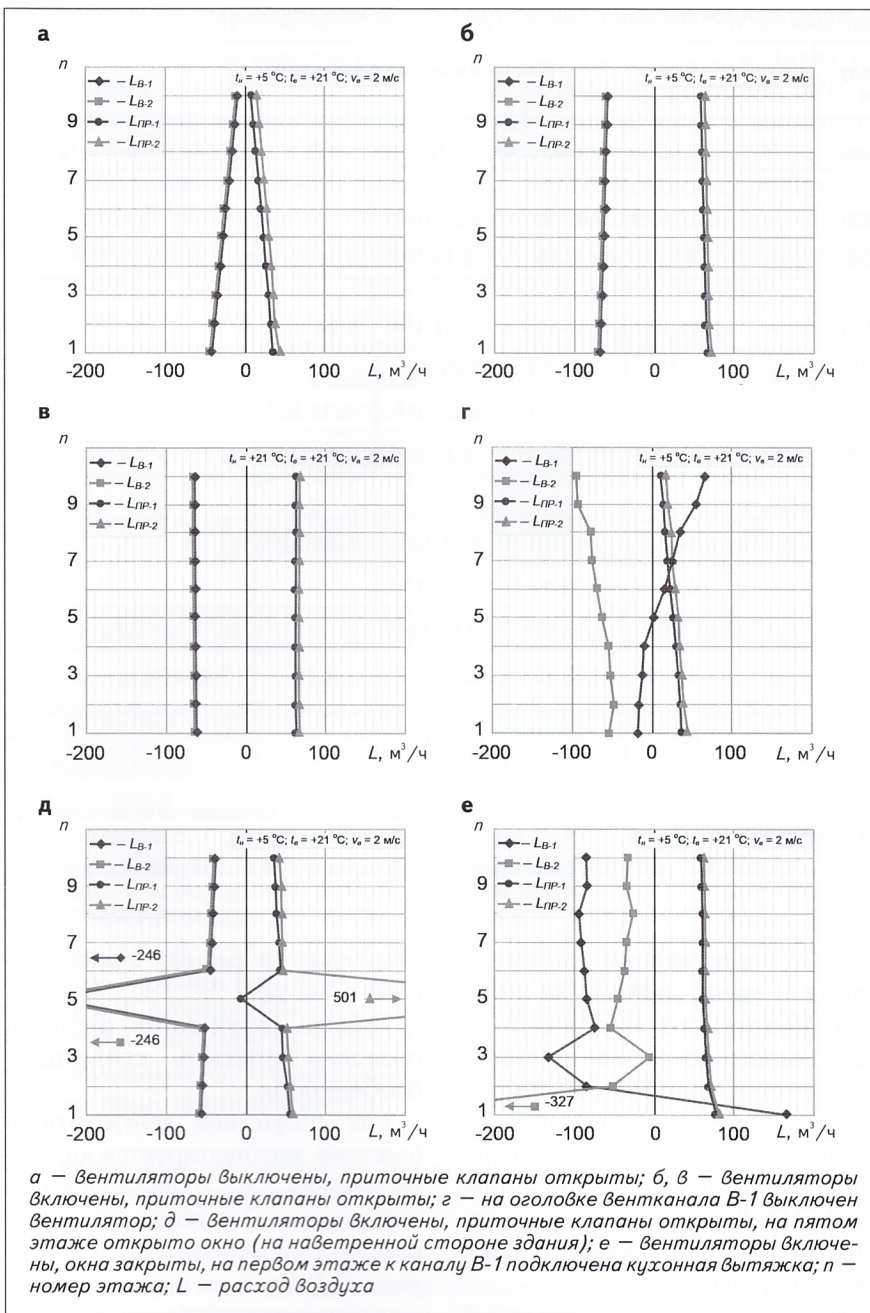


Рис. 5. Результаты расчета гибридной системы вентиляции многоквартирного жилого дома

мостей с полученными коэффициентами.

Аналогичным образом предлагается описывать зависимость давления вентилятора от расхода, только в этом случае будет добавлен коэффициент s_0 , который соответствует максимальному давлению вентилятора (давлению при нулевом расходе):

$$P_{\text{вент}} = s_0 + s_1 G + s_2 G^2 + s_3 G^3 + \dots + s_k G^k, \quad (14)$$

где s_0 — нулевой коэффициент, соответствующий давлению вентилятора при нулевом расходе.

Формула (14) позволяет ввести характеристику вентиляторов как в области отрицательных расходов (II квадрант), так и в области отрицательных давлений (IV

квадрант). При подсоединении к вентилятору обратного клапана достаточно вычесть из коэффициентов s_i вентилятора соответствующие коэффициенты обратного клапана, в результате чего получится суммарная характеристика двух последовательно работающих устройств. Таким образом, введение в расчет таких суммарных характеристик позволяет уменьшить количество членов в системе нелинейных уравнений.

В таблице приведены коэффициенты s_i , полученные в результате аппроксимации характеристик некоторых вентиляционных элементов. Для каждого элемента представлен диапазон расходов воздуха, при котором допускается использование полученных коэффициентов.

Варианты аппроксимации и результаты испытаний «потери давления — расход воздуха» для приточного клапана с ветрозащитной планкой показаны на рис. 2. Как видно из рисунка, при использовании полинома пятой степени с помощью формулы (14) можно практически без отклонений описать результаты экспериментальной зависимости с точкой перелома 10 Па.

Реализация изложенного подхода позволяет унифицировать формирование систем нелинейных уравнений и обеспечить более точное описание зависимостей «потери давления — расход воздуха» практически для любых вентиляционных элементов.

Алгоритм реализации изложенного подхода применительно к системам вентиляции жилых зданий с учетом ветровых и тепловых перепадов давлений, переменных характеристик сопротивлений отдельных вентиляционных элементов приведен на рис. 3 [15].

Последовательность моделирования воздушного режима здания выглядит следующим образом:

Коэффициенты s_i , полученные в результате аппроксимации характеристик вентиляционных элементов

Вентиляционный элемент	Расход воздуха, м ³ /ч		Полученные коэффициенты						
	L_{\min}	L_{\max}	s_0	s_1	s_2	s_3	s_4	s_5	s_6
EMM 3-30 «Aereco»: в открытом режиме	0	100	—	$8,07 \cdot 10^{-2}$	$1,07 \cdot 10^{-2}$	$6,56 \cdot 10^{-5}$	—	—	—
в закрытом режиме	0	30	—	1,18	$9,15 \cdot 10^{-1}$	$-5,19 \cdot 10^{-2}$	$1,10 \cdot 10^{-3}$	—	—
КИВ-125: в открытом режиме	0	150	—	$2,41 \cdot 10^{-1}$	$6,57 \cdot 10^{-3}$	$-4,97 \cdot 10^{-6}$	$1,24 \cdot 10^{-7}$	—	—
в закрытом режиме	0	30	—	5,43	$-1,59 \cdot 10^{-2}$	$1,25 \cdot 10^{-2}$	—	—	—
СВК-В75 в открытом режиме	-20	150	—	2,43	$-1,67 \cdot 10^{-1}$	$4,98 \cdot 10^{-3}$	$-6,32 \cdot 10^{-5}$	$3,68 \cdot 10^{-7}$	$-7,90 \cdot 10^{-10}$
Ventair	0	50	—	1,16	$-1,19 \cdot 10^{-2}$	$-9,46 \cdot 10^{-3}$	$4,72 \cdot 10^{-4}$	$-4,82 \cdot 10^{-6}$	—
Aldes airfix 125	0	50	—	1,00	—	—	—	—	—
	50	100	-5 019	$3,14 \cdot 10^2$	-7,23	$7,26 \cdot 10^{-2}$	$-2,61 \cdot 10^{-4}$	—	—
Обратный клапан Вентс КО 125	-30	0	—	6,29	$-1,38 \cdot 10^{-1}$	$-2,34 \cdot 10^{-3}$	—	—	—
	0	600	—	$1,50 \cdot 10^{-4}$	$1,94 \cdot 10^{-4}$	$-2,52 \cdot 10^{-10}$	—	—	—
Окно из ПВХ-профилей (глухарь) 1×1,5 м	0	3	—	$1,92 \cdot 10^1$	$4,98 \cdot 10^1$	$-2,19 \cdot 10^1$	7,73	$-7,98 \cdot 10^{-1}$	—
Открыта створка окна (прямоугольное отверстие 1×1,5 м)	0	800	—	$2,72 \cdot 10^{-2}$	$-7,69 \cdot 10^{-6}$	$6,17 \cdot 10^{-9}$	—	—	—

Примечания: 1. Коэффициенты определены в результате аппроксимации характеристик, представленных заводами-изготовителями, а также характеристик, полученных по результатам проведенных испытаний.

2. Отрицательные значения указывают на то, что воздух движется в противоположно заданном направлении и перепады давлений в этих случаях также будут отрицательными.

- составляется расчетная схема системы вентиляции здания;
- определяются расчетные параметры внутреннего и наружного воздуха, скорость ветра, тип и количество вентиляционных элементов, учитываемых при моделировании;
- на основе расчетной схемы составляется граф системы вентиляции;
- геометрические свойства графа записываются в виде системы нелинейных уравнений, связывающих матрицы инцидентности A , циклов B , расходов G , сопротивлений S , источников давления P ;
- проводится расчет системы нелинейных уравнений, определяются фактические расходы воздуха на всех участках аэродинамической сети.

Пример реализации

В качестве примера реализации изложенного подхода на

рис. 4 представлены расчетная схема и граф системы вентиляции 10-этажного многоквартирного жилого дома с вентиляторами, установленными на оголовках вытяжных каналов, и приточными вентиляционными клапанами (гибридная система вентиляции) [21]. Для данного случая составлена система, включающая в себя 70 уравнений.

Решение системы уравнений получено методом обобщенного приведенного градиента с использованием программы Microsoft Office Excel. Критериями решения являются расходы воздуха, подходящие и уходящие от узлов (допустимая невязка 0,1 м³/ч), и давления, создаваемые и теряемые в каждом независимом контуре графа (допустимая невязка 0,1 Па).

Результаты расчетов в виде распределения расходов приточного и удаляемого воздуха в

квартирах на разных этажах показаны на рис. 5.

Анализ результатов расчетов позволил отметить следующие особенности:

- при отсутствии вентиляторов (система эксплуатируется как естественная, с гравитационным побуждением) требуемый воздухообмен не обеспечивается (см. рис. 5а); одна из основных причин — достаточно большое аэродинамическое сопротивление приточных устройств;
- установка (включение) вентиляторов (в частности, Aereco VTZ 0) на оголовках вентиляционных шахт позволяет обеспечить величину требуемого воздухообмена как в расчетный (см. рис. 5б), так и в теплый (см. рис. 5в) периоды года; однако необходима установка вентиляторов с возможностью регулирования скорости их вращения с целью предотвращения превышения величины

требуемого воздухообмена при снижении температуры наружного воздуха;

- изменение проектного режима работы вентиляторов может кардинально изменить режим работы системы вентиляции; например, выключение одного из вентиляторов (см. рис. 5г) приводит к «опрокидыванию» направления движения воздуха верхних этажей и поступлению в квартиры «грязного» воздуха из сборного канала;
- открытие створок окон отдельных квартир также может существенно (в разы) изменять

их воздухообмен и снижение расхода удаляемого воздуха из других квартир (см. рис. 5д);

- при подключении к вытяжным каналам кухонных вытяжек (см. рис. 5е) возможно «опрокидывание» направления движения воздуха во втором вентиляционном канале данной квартиры.

Вывод

Реализация рассмотренного решения позволяет моделировать (прогнозировать) распределение воздуха в системах вентиляции зданий различного конструктивного решения, в том числе

с переменными характеристиками вентиляционных элементов и при различных сочетаниях внешних и внутренних воздействий.

Использование формул (13) и (14) обеспечивает универсальность подхода к аппроксимации зависимостей «давление (потери давления) — расход воздуха» для всех элементов аэродинамической сети и позволяет более точно определять расход воздуха и потери давления при математическом моделировании воздушного режима здания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Константинова В. Е. Воздушно-тепловой режим в жилых зданиях повышенной этажности. М. : Стройиздат, 1969. 135 с.
2. Ливчак И. Ф., Наумов А. Л. Вентиляция многоэтажных жилых зданий. М. : АВОК-ПРЕСС, 2005. 134 с.
3. Малявина Е. Г., Бирюков С. В., Дианов С. Н. Воздушный режим высотного жилого здания в течение года. Ч. 1. Воздушный режим при естественной вытяжной вентиляции // АВОК. 2004. № 8. С. 6–12.
4. Малявина Е. Г., Бирюков С. В., Дианов С. Н. Воздушный режим высотного жилого здания в течение года. Ч. 2. Воздушный режим при механической вытяжной вентиляции // АВОК. 2005. № 1. С. 26–33.
5. Табунщиков Ю. А. Микроклимат и энергосбережение: пора понять приоритеты // АВОК. 2008. № 5. С. 4–11.
6. Технические рекомендации по организации воздухообмена в квартирах жилых зданий. М. : АВОК-ПРЕСС, 2012. 26 с.
7. Кривошеин А. Д., Андреев И. В. Особенности проектирования систем естественной вентиляции с вертикальными сборными каналами // Проектирование и строительство в Сибири. 2008. № 6. С. 50–55.
8. Волов Г. Я. Устойчивость работы систем естественной вентиляции многоквартирных жилых зданий // АВОК. 2014. № 1. С. 30–37.
9. Бодров М. В., Кузин В. Ю. Анализ режимов работы систем естественной вентиляции многоквартирных жилых домов в теплый период года // Приволжский научный журнал. 2016. № 4(40). С. 26–32.
10. Шилкин Н. В., Шонина Н. А., Миллер Ю. В., Галуша А. Н. Гибридная вентиляция в многоэтажных жилых домах: варианты решения // АВОК. 2018. № 5. С. 12–18.
11. Меренков А. П., Хасилев В. Я. Теория гидравлических цепей. М. : Наука, 1985. 278 с.
12. Гинзбург Э. Я. Расчет отопительно-вентиляционных систем с помощью ЭВМ. М. : Стройиздат, 1979. 182 с.
13. Малявина Е. Г., Бирюков С. В., Дианов С. Н. Воздушный режим жилых зданий. Учет влияния воздушного режима на работу системы вентиляции жилых зданий // АВОК. 2003. № 6. С. 14–21.
14. Кривошеин А. Д. Прогнозирование работы систем естественной вентиляции жилых зданий с организованным притоком воздуха // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2011. № 4. С. 43–52.
15. Кривошеин М. А. Прогнозирование работы систем вентиляции жилых многоквартирных зданий с децентрализованным механическим удалением воздуха // Вестник СибАДИ. 2017. № 4–5(56–57). С. 116–126.
16. Etheridge D. W. Natural ventilation of buildings: theory, measurement and design [Естественная вентиляция зданий: теория, измерение и проектирование]. Chichester, UK; John Wiley & Sons, 2012. 428 p.
17. Acred A., Hunt G. R. A simplified mathematical approach for modelling stack ventilation in multi-compartment buildings [Упрощенный математический подход для моделирования вентиляции в многоэтажных зданиях] // Building and Environment. 2014. No. 71. Pp. 121–130.
18. Дацюк Т. А., Сауц А. В., Юрманов Б. Н., Таурит В. Р. Моделирование процессов вентиляции // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 5. С. 78.
19. Уляшева В. М. О корректности численного моделирования вентиляционных процессов // Известия вузов. Строительство. 2012. № 11–12 (647). С. 79–83.
20. Ferziger J. H., Peric M. Computational methods for fluid dynamics [Вычислительные методы в гидродинамике]. Berlin : Springer, 2002. 426 p.
21. Расчет и проектирование регулируемой естественной и гибридной вентиляции в многоэтажных жилых домах. М. : АВОК-ПРЕСС, 2018. 56 с.

REFERENCES

1. Konstantinova V. E. *Vozdushno-teplovoy rezhim v zhilykh zdaniyakh povy-shennoy etazhnosti* [Air and heat conditions in residential buildings with high floors]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1969. 135 p. (In Russian).
2. Livchak I. F., Naumov A. L. *Ventilyatsiya mnogoetazhnykh zhilykh zdaniy* [Ventilation of multi-story residential buildings]. Moscow, AVOK-PRESS Publ., 2005. 134 p. (In Russian).
3. Malyavina E. G., Biryukov S. V., Dianov S. N. The air regime of a high-rise residential building throughout the year. Part 1: air mode with natural exhaust ventilation. *AVOK*, 2004, no. 8, pp. 6–12. (In Russian).
4. Malyavina E. G., Biryukov S. V., Dianov S. N. The air regime of a high-rise residential building throughout the year. Part 2: air mode with mechanical exhaust ventilation. *AVOK*, 2005, no. 1, pp. 26. (In Russian).
5. Tabunshchikov Yu. A. Microclimate and energy conservation: time to understand priorities. *AVOK*, 2008, no. 5, pp. 4–11. (In Russian).
6. *Tekhnicheskie rekomendatsii po organizatsii vozdukhobmena v kvartirakh zhilykh zdaniy* [Technical recommendations for the organization of air exchange in apartments of residential buildings]. Moscow, AVOK-PRESS Publ., 2012. 26 p. (In Russian).
7. Krivoshein A. D., Andreev I. V. Design features of natural ventilation systems with vertical prefabricated channels. *Proektirovanie i stroitel'stvo v Sibiri*, 2008, no. 6, pp. 50–55. (In Russian).
8. Volov G. Ya. Sustainability of natural ventilation systems of multi-unit residential buildings. *AVOK*, 2014, no. 1, pp. 30–37. (In Russian).
9. Bodrov M. V., Kuzin V. Yu. Analysis of operating modes of natural ventilation systems of apartment buildings in the warm season. *Privolzhskiy nauchnyy zhurnal*, 2016, no. 4(40), pp. 26–32. (In Russian).
10. Shilkin N. V., Shonina N. A., Miller Yu. V., Galusha A. N. Hybrid ventilation in multi-story residential buildings: solution options. *AVOK*, 2018, no. 5, pp. 12–18. (In Russian).
11. Merenkov A. P., Khasilev V. Ya. *Teoriya gidravlicheskikh tsepey* [Theory of hydraulic circuits]. Moscow, Nauka Publ., 1985. 278 p. (In Russian).
12. Ginzburg E. Ya. *Raschet otopitel'no-ventilyatsionnykh sistem s pomoshch'yu EVM* [Calculation of heating and ventilation systems using computers]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1979. 182 p. (In Russian).
13. Malyavina E. G., Biryukov S. V., Dianov S. N. Air regime of residential buildings. Consideration of the influence of air regime on the operation of the ventilation system of residential buildings. *AVOK*, 2003, no. 6, pp. 14–21. (In Russian).
14. Krivoshein A. D. Prediction of operation of natural ventilation systems of residential buildings with organized air flow. *Izvestiya vyzov. Stroitel'stvo*, 2011, no. 4, pp. 43–52. (In Russian).
15. Krivoshein M. A. Prediction of the operation of ventilation systems of residential multi-apartment buildings with decentralized mechanical air removal. *Vestnik SibADI*, 2017, no. 4–5(56–57), pp. 116–126. (In Russian).
16. Etheridge D. W. *Natural ventilation of buildings: theory, measurement and design*. Chichester, UK, John Wiley & Sons, 2012. 428 p.
17. Acred A., Hunt G. R. A simplified mathematical approach for modelling stack ventilation in multi-compartment buildings. *Building and Environment*, 2014, no. 71, pp. 121–130.
18. Datsyuk T. A., Sauts A. V., Yurmanov B. N., Taurit V. R. Modeling of ventilation processes. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*, 2012, no. 5, pp. 78. (In Russian).
19. Ulyasheva V. M. On the correctness of numerical simulation of ventilation processes. *Izvestiya vyzov. Stroitel'stvo*, 2012, no. 11–12(647), pp. 79–83. (In Russian).
20. Ferziger J. H., Peric M. *Computational methods for fluid dynamics*. Berlin, Springer Publ., 2002. 426 p.
21. *Raschet i proektirovanie reguliruemoy estestvennoy i gibridnoy ventilyatsii v mnogoetazhnykh zhilykh domakh* [Calculation and design of regulated natural and hybrid ventilation in multi-storey residential buildings]. Moscow, AVOK-PRESS Publ., 2018. 56 c. (In Russian).

Для цитирования: Кривошеин М. А., Кривошеин А. Д. Математическое моделирование распределения воздуха в системах вентиляции жилых зданий // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 12. С. 72–80. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.12.72-80.

For citation: Krivoshein M. A., Krivoshein A. D. Mathematical Modeling of Air Distribution in Ventilation Systems of Residential Buildings. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2019, no. 12, pp. 72–80. (In Russian). DOI: 10.33622/0869-7019.2019.12.72-80. ■

ИНДЕКС ЖУРНАЛА «ИПС» В КАТАЛОГЕ АГЕНТСТВА «РОСПЕЧАТЬ»
И В АГЕНТСТВЕ «УРАЛ-ПРЕСС» – 70695.

ИНДЕКС В ОБЪЕДИНЕННОМ КАТАЛОГЕ «ПРЕССА РОССИИ» – 91622.