

Расчет воздухообмена в многоэтажных зданиях с использованием электронно-вычислительных машин

Инж. К. С. СВЕТЛОВ

УДК 697.95:091.2

Расчет воздухообмена в зданиях производят с помощью аналоговых устройств, графоаналитических и, в некоторых случаях, аналитических методов [1], [2].

В основу таких расчетов положено математическое описание движения воздуха через элементы системы воздухообмена и граничные условия, учитывающие одновременно действие ветра, разность температур внутри и снаружи зданий и работу вентиляционных устройств.

Рассмотрение и математическое описание процесса воздухообмена зданий как движения воздуха в единой гидравлической системе позволили использовать для расчета воздухообмена также и электронновычислительные машины [3] *. Элементы системы воздухообмена здания (окна, двери, вытяжные каналы и пр.) взаимосвязаны и образуют неплоские сети (сети с пересекающимися участками). Они отличаются от трубопроводных сетей большим числом элементов и неоднородной зависимостью потерь напора от расхода на участках. Для окон эта зависимость двучленна:

$$h = Ax + Bx^2,$$

для дверей, вытяжных каналов и открытых проемов — одночленна:

$$h = Sx^2,$$

где h — разность давлений по обе стороны элемента в $мм вод. ст.$;

x — расход воздуха в $кг/ч$;

A , B и S — удельные сопротивления (характеристики) элементов.

Расчет воздухообмена в здании — это решение задачи распределения потока в гидравлической неплоской сети, когда неизвестными являются расходы воздуха и направления его движения по отдельным ветвям схемы. Последнее обстоятельство затрудняет применение увязочного метода Андрияшева—Лобачева—Харди Кросса, используемого в настоящее время для расчета кольцевых трубопроводов на электронновычислительных машинах.

Этот метод предусматривает произвольное первоначальное распределение расходов по участкам. В случае, если такое распределение является далеким от истинного решения, время счета на маши-

не значительно увеличивается, что особенно существенно для неплоских схем и при большом числе элементов воздушной сети.

Другой метод, разработанный в Сибирском энергетическом институте АН СССР В. Я. Хасилевым [3], предусматривает в качестве первого этапа расчета линеаризацию квадратичных форм расчетных уравнений. Это дает возможность определить направление потоков по участкам и получить близкие начальные приближения для последующего уточнения решения одним из методов последовательных приближений. В качестве метода последовательных приближений используется при этом метод Ньютона. Он является точным и дает более быструю сходимость по сравнению с методом Андрияшева—Лобачева—Харди Кросса.

Оба метода легли в основу стандартных программ, разработанных в СЭИ СО АН СССР для ЭВМ типа БЭСМ-2М. Стандартная программа с уточнением решения по методу Ньютона использует программу решения систем линейных алгебраических уравнений по методу «окаймления» и программу решения систем нелинейных алгебраических уравнений по методу Ньютона [4].

При уточнении решения по методу Андрияшева—Лобачева—Харди Кросса был изменен алгоритм, используемый в настоящее время. Усовершенствование алгоритма состоит в следующем:

1) увязочный расход для колец находят с учетом второй производной — модификация метода Ньютона, предложенная Л. Выханду [5], что ускоряет процесс вычислений;

2) на каждом шаге последовательно увязывают напоры для колец, то есть увязочный расход для каждого следующего кольца по одной итерации определяется с учетом измененных расходов в результате увязки предыдущих колец;

3) погрешность вычислений оценивают по относительному изменению расходов на участках, а не по «невязке» напоров по контурам.

Для расчета воздухообмена на электронновычислительной машине необходимо составить схему движения воздуха и привести ее к циклическому виду, подсчитать удельные сопротивления для всех элементов воздушной системы и «фиктивные» давления на уровне всех воздухоприемных и выпускных элементов воздушной системы с учетом действия ветра и разности температур внутри здания и снаружи. После этой подготовительной работы составляется система алгебраических уравнений, описывающих движение воздуха в воздушной системе, которая кодируется и решается на ЭВМ по программам, упомянутым выше.

Основную трудность представляет составление исходных уравнений, особенно для сложных систем. При этом надо руководствоваться определенными правилами. Контурные уравнения представ-

* Данная работа выполнена в лаборатории теплоснабжения Сибирского энергетического института СО АН СССР в содружестве с лабораторией отопления и вентиляции жилых и общественных зданий НИИ санитарной техники.

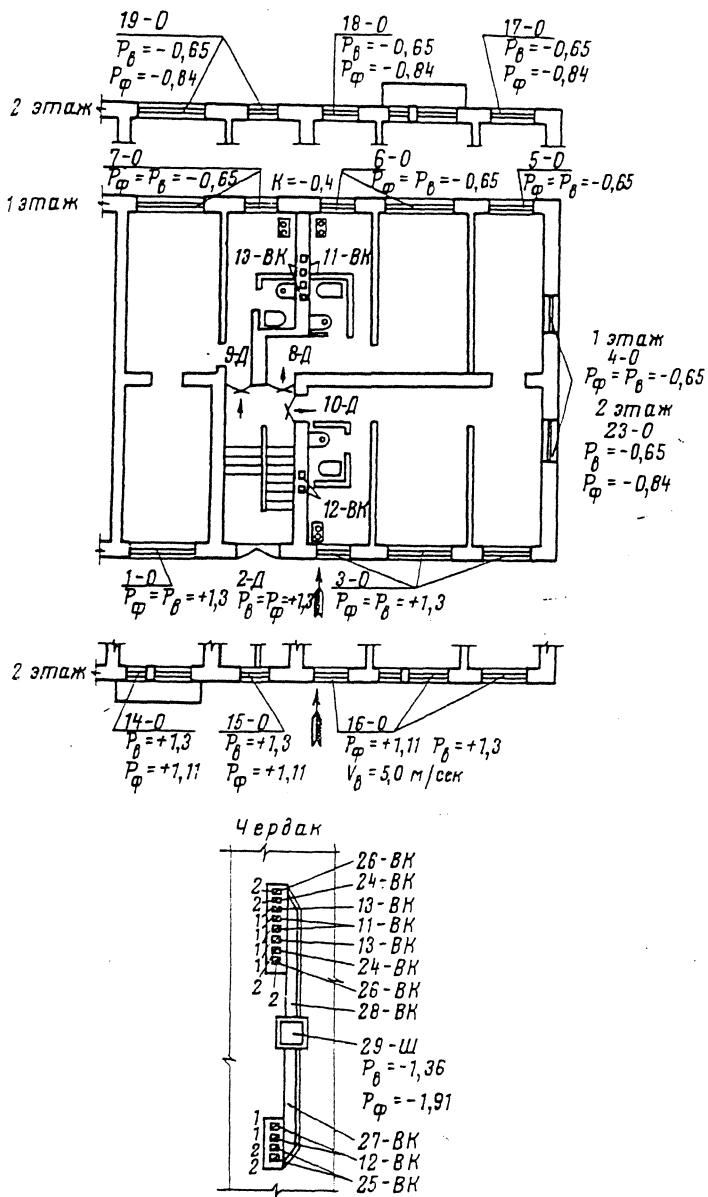


Рис. 1. План двухэтажной шестиквартирной секции
1, 2, 3 — номера неизвестных расходов; О — окно; Д — дверь;
BK — вытяжной канал; Ш — шахта; P_ϕ — «фиктивное» давление
в $\text{кг}/\text{м}^2$; P_ψ — ветровое давление в $\text{кг}/\text{м}^2$

ляют в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 S_1' x_1 + S_1' x_1^2 + S_2' x_2 + S_2' x_2^2 + \dots + \\
 + S_n' x_n + S_n' x_n^2 = H; \\
 S_1' x_1^2 \pm S_2' x_2^2 \pm S_3' x_3^2 \pm \dots \pm S_n' x_n^2 = 0.
 \end{aligned}$$

Уравнения такого вида могут быть линеаризованы с использованием разработанных программ. Необходимо, чтобы контурные уравнения были линейно-независимы, то-есть отличались друг от друга хотя бы одним членом. При небольшом навыке эта работа не представляет особых трудностей и резко сокращается при вариантах просчетах одной и той же системы воздухообмена.

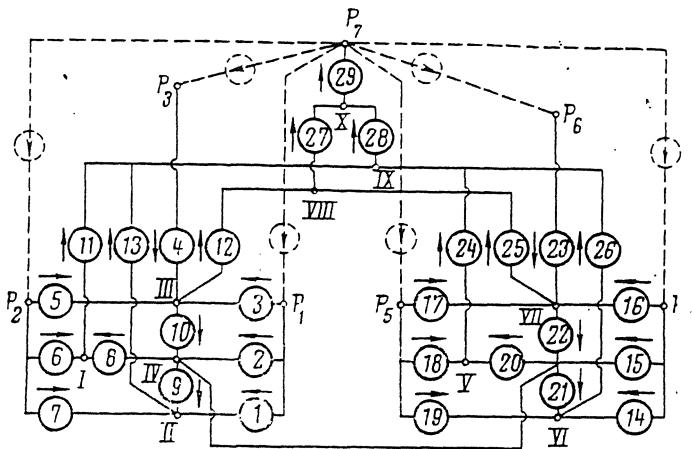


Рис. 2. Схема воздушной сети
1 — О — марка элемента; P_1 , P_2 — «фиктивное» давление; I, II — номера узлов

При расчетах на ЭВМ точность оценивается по относительному изменению расходов на участках. Расчет считается законченным, когда относительное изменение расхода на всех участках $\frac{x_i - x_{i-1}}{x_i}$ меньше ϵ (где x_{i-1} и x_i — расходы на предыдущем и последующем приближениях).

Опыт работы показал, что на ЭВМ типа БЭСМ-2М по разработанным программам можно рассчитывать сети, состоящие из 100—150 элементов. Это ограничение налагает программа решения систем линейных алгебраических уравнений методом «окаймления» [4]. Время счета на машине при числе элементов воздушной системы меньше пятидесяти не более 5 мин.

По разработанным программам можно рассчитывать воздухообмен как при естественной, так и при механической вентиляции, а также системы с воздушным отоплением без учета охлаждения воздуха в каналах. «Фиктивные» давления при этом подсчитываются по методике, приведенной в литературе [1].

В качестве примера рассмотрим расчет воздухообмена двухэтажной шестиквартирной секции жилого дома с одинаковой планировкой этажей, выполненный методом гидравлической аналогии [1] при температуре наружного воздуха $t_n = 5^\circ\text{C}$ и скорости ветра 5 м/сек со стороны лестничной клетки. На рис. 1 показан план секции, на рис. 2 — циклическая схема воздушной сети. При составлении схемы окна одной квартиры, выходящие на одну сторону, заменили одним элементом. Два вытяжных канала каждой квартиры объединили в один по правилу суммирования проводимостей параллельных ветвей. Все элементы системы воздухообмена на плане (см. рис. 1) и соответствующие им — на схеме (см. рис. 2) пронумерованы.

Исходные зависимости для элементов воздушной сети, заимствованные из примера 5 [1], приведены в табл. 1, а «фиктивные» давления на уровне воздухоприемных и выпускных отверстий здания приведены на плане.

«Циклическая» схема воздушной сети получена

Таблица 1

Расчетные зависимости для элементов воздушной сети

№ п/п	Марка элемента	Расчетное уравнение движения воздуха
1	1-0	$0,83 \cdot 10^{-2} x + 0,207 \cdot 10^{-3} x^2$
2	2-Д	$0,88 \cdot 10^{-5} x^3$
3	3-0	$0,39 \cdot 10^{-2} x + 0,47 \cdot 10^{-4} x^2$
4	4-0; 23-0	$0,68 \cdot 10^{-2} x + 0,14 \cdot 10^{-3} x^2$
5	5-0; 17-0	$0,135 \cdot 10^{-1} x + 0,56 \cdot 10^{-3} x^2$
6	6-0; 7-0; 19-0	$0,55 \cdot 10^{-2} x + 0,92 \cdot 10^{-4} x^2$
7	8-Д; 9-Д; 10-Д	$0,242 \cdot 10^{-4} x^2$
8	20-Д; 21-Д; 22-Д	$0,242 \cdot 10^{-4} x^2$
9	11-ВК; 12-ВК; 13-ВК	$0,75 \cdot 10^{-5} x^2$
10	14-0	$0,665 \cdot 10^{-2} x + 0,125 \cdot 10^{-3} x^2$
11	15-0	$0,139 \cdot 10^{-1} x + 0,59 \cdot 10^{-3} x^2$
12	16-0	$0,345 \cdot 10^{-2} x + 0,42 \cdot 10^{-4} x^2$
13	18-0	$0,456 \cdot 10^{-2} x + 0,64 \cdot 10^{-4} x^2$
14	24-ВК; 25-ВК; 26-ВК	$0,58 \cdot 10^{-5} x^2$
15	27-ВК	$0,59 \cdot 10^{-6} x^2$
16	28-ВК	$0,18 \cdot 10^{-6} x^2$
17	29-Ш	$0,815 \cdot 10^{-7} x^2$

путем замыкания всех элементов внешних ограждающих конструкций на одну общую точку и введением источников давлений (показано пунктиром на рис. 2). Давление источников равно разности между «фиктивными» давлениями соединенных точек.

После такой подготовительной работы задаемся произвольными направлениями потоков (выбранные направления поставлены стрелками на рис. 2) и составляем систему уравнений по всем линейно-независимым контурам и узлам. В данном примере воздушная система состоит из $p=29$ элементов и $q=11$ узлов. Число независимых контуров составит:

$$k = p - q + 1 = 19.$$

Исходя из требований, изложенных выше, выбираем следующую систему линейнонезависимых контуров: I — 1, 13, 28, 29; II — 2, 9, 13, 28, 29; III — 3, 12, 27, 29; IV — 4, 12, 27, 29; V — 5, 12, 27, 29; VI — 6, 11, 28, 29; VII — 7, 13, 28, 29; VIII — 8, 9, 11, 13; IX — 9, 10, 12, 27, 28, 13; X — 14, 26, 28, 29; XI — 9, 13, 28, 29, 15; XII — 16, 25, 27, 29; XIII — 17, 25, 27, 29; XIV — 18, 24, 28, 29; XV — 19, 26, 28, 29; XVI — 23, 25, 27, 29; XVII — 9, 13, 24, 20; XVIII — 9, 13, 26, 21; XIX — 22, 25, 27, 28, 13, 9.

Контурные уравнения для V и VIII контуров запишутся следующим образом:

$$S_5 x_5 + S_5 x_5^2 + S_{12} x_{12}^2 + S_{27} x_{27}^2 + S_{29} x_{29}^2 - (P_2 - P_7) = 0;$$

$$S_8 x_8^2 - S_9 x_9^2 + S_{11} x_{11}^2 - S_{13} x_{13}^2 = 0,$$

или, подставляя численные значения коэффициен-

тов из табл. 1, получим

$$0,135 \cdot 10^{-1} x_5 + 0,56 \cdot 10^{-3} x_5^2 + 0,75 \cdot 10^{-5} x_{12}^2 + 0,59 \cdot 10^{-6} x_{27}^2 + 0,815 \cdot 10^{-7} x_{29}^2 - 1,24 = 0; \\ 0,242 \cdot 10^{-4} x_8^2 - 0,242 \cdot 10^{-4} x_9^2 + 0,75 \cdot 10^{-5} x_{11}^2 - 0,75 \cdot 10^{-5} x_{13}^2 = 0.$$

Уравнения по узлам имеют вид, например для 1 узла (рис. 2)

$$x_6 + x_8 - x_{11} = 0.$$

Полученная таким образом система уравнений масштабируется, кодируется и решается на ЭВМ.

В данном примере принят масштаб квадратичных сопротивлений $M_{S'} = 10^3$, масштаб давлений $M_p = 10^{-1}$.

По соотношениям

$$M_x = \sqrt{\frac{M_p}{M_{S'}}} \text{ и } M_{S'} = \frac{M_p}{M_x}$$

подсчитывается масштаб расходов M_x и масштаб линейных сопротивлений $M_{S'}$:

$$M_x = 10^{-2}; M_{S'} = 10.$$

Время, затраченное на подготовку данного примера для расчета на ЭВМ после составления системы уравнений, составило около двух часов, время счета на машине по обеим программам приблизительно две минуты при точности 0,4%. «Невязка» по контурным и узловым уравнениям близка к нулю.

Данные расчета по обеим программам совпадают и вместе с промежуточным результатом (решением линейной системы уравнений) приведены в табл. 2.

Таблица 2
Результаты расчета воздухообмена двухэтажной шестиквартирной секции

Марка элемента	Решение линейной системы	Решение нелинейной системы	Марка элемента	Решение линейной системы	Решение нелинейной системы
1-0	0,64	0,923	16-0	1,25	1,904
2-Д	2,81	5,077	17-0	0,078	0,115
3-0	1,2	1,837	18-0	0,423	0,633
4-0	0,191	0,317	19-0	0,27	0,412
5-0	0,096	0,159	20-Д	0,748	1,312
6-0	0,413	0,619	21-Д	0,539	1,025
7-0	0,333	0,519	22-Д	-0,336	0,647
8-Д	0,701	1,245	23-0	0,155	0,23
9-Д	0,501	0,94	24-ВК	1,17	1,945
10-Д	-0,26	0,395	25-ВК	1,181	2,896
11-ВК	1,114	1,865	26-ВК	1,598	2,564
12-ВК	1,74	2,71	27-ВК	3,562	5,606
13-ВК	1,47	2,371	28-ВК	5,357	8,745
14-0	0,788	1,126	29-Ш	8,919	14,351
15-0	0,273	0,487			

Знак минус в решении линейной системы у x_{10} и x_{22} означает, что направления потока через элементы 10—Д и 22—Д противоположны принятым первоначально. Для получения расходов воздуха через элементы (в $\text{кг}/\text{ч}$) результаты необходимо разделить на M_x .

Сравнение результатов расчета на ЭВМ и методом гидравлической аналогии показывает, что в среднем расхождение не превышает примерно 3%. Это объясняется «невязками» в узлах до 7% при расчете методом гидравлической аналогии.

Иркутск

ЛИТЕРАТУРА

1. Константинова В. Е. Расчет воздухообмена в жилых и общественных зданиях. Стойнзат, 1964.
2. Разумов Н. Н. Расчет инфильтрации воздуха в многоэтажных зданиях для любых климатических условий, «Водоснабжение и санитарная техника» № 1, 1964.
3. Хасилев В. Я. Элементы теории гидравлических цепей. Известия АН СССР, Серия «Энергетика и транспорт» № 1, 1964.
4. Сборник программ БЭСМ-2М (выпуск 1) под редакцией канд. техн. наук А. П. Меренкова, АН СССР Сибирское отделение, Энергетический институт, ВИНИТИ, Москва — Иркутск, 1964.
5. Загускин В. Л. Справочник по численным методам решения уравнений, Физматгиз, 1960.

Испытание системы вентиляции с вытяжкой из лестничной клетки

УДК 697.92

Инж. С. П. ТРЕБУКОВ

В статье канд. техн. наук В. Е. Константиновой и инж. С. П. Требукова «Рациональная вентиляция жилых зданий из объемных элементов»¹ предложена система естественной вытяжной вентиляции с вытяжкой через шахту в лестничной клетке в сочетании с периодически действующими квартирными вытяжными системами.

При этом на основании лабораторных исследований методом гидроаналогии был сделан вывод об отсутствии перетекания воздуха между квартирами разных этажей. Указывалось, что дополнительная инфильтрация воздуха через входную дверь и окна не оказывается на тепловом режиме лестничной клетки.

Для проверки выводов лабораторных испытаний в корпусе 8 десятого квартала Н. Черемушек в отопительный сезон 1963—1964 гг. были проведены испытания системы вытяжной вентиляции с вытяжкой из лестничной клетки (корпус 8—пятиэтажный сорокапятиквартирный жилой дом из объемных элементов). В нем смонтированы экспериментальные системы квартирного воздушного отсплления, совмещенного с приточной вентиляцией, и поквартирные вытяжные системы с механическим побуждением и выбросом воздуха по горизонтальному каналу через отверстие в наружной стене (во время описываемых испытаний приточные и вытяжные системы были выключены). Лестничная клетка отапливается воздухонагревателем, установленным у входной двери на первом этаже.

В средней секции здания выход на крышу переоборудован в вытяжную шахту. Крышка люка

закреплена в открытом положении, а по периметру шахты прорезана щель высотой 0,25 м.

Размеры шахты в плане $1,25 \times 1,9$ м, высота над плоской кровлей 1,5 м. Размеры люка $0,8 \times 0,8$ м. Шахта выполнена из асбофанеры по деревянному каркасу (рис. 1).

Испытания проводили в январе 1964 г. при $t_n = -4^\circ\text{C}$ и скорости ветра $v_b = 2 \text{ м/сек}$.

Расход воздуха определяли крыльчатым анемометром, распределение давлений по лестничной клетке — микроманометром ММН.

После этих испытаний были проведены замеры распределения давления в секции при закрытом люке. Результаты замеров распределения давлений представлены на рис. 2.

Расход воздуха в вытяжной шахте во время испытаний при режиме с вытяжкой из лестничной клетки колебался от 2500 до 3500 $\text{м}^3/\text{ч}$. При этом $t_{bh} = 19,2^\circ\text{C}$, $\varphi = 30\%$.

Как видно из рис. 2, при закрытом люке воздух перетекал из квартир 1—3 этажей в квартиры 4—5 этажей.

При открытом люке картина резко менялась — квартиры всех этажей оказывались под разрежением, перетекание воздуха с этажа на этаж прекращалось.

В таблице даны результаты расчета расхода воздуха G через квартирные двери размером $0,85 \times 2$ м (при ширине щелей 4 мм) в соответствии с замеренными перепадами давлений $\Delta p \text{ кгс/м}^2$ между квартирами и лестничной клеткой при открытом люке.

Обращает на себя внимание равномерность расходов воздуха по квартирам. Суммарный расход воздуха по квартирам 2080 $\text{кг}/\text{ч}$.

Таким образом, результаты испытаний подтвер-

¹ «Водоснабжение и санитарная техника» № 3, 1963.