

УДК 622.411.332

Ж.Г. Левицкий, А.Д. Нургалиева

ВЗАИМОСВЯЗАННОСТЬ ПОТОКОВ ВОЗДУХА В ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ СЕТИ С АКТИВНЫМ РЕГУЛЯТОРОМ

Так как вентиляционная сеть является жестко связанным графом, то любое изменение аэродинамической характеристики j -й выработки вызовет в той или иной мере изменение потокораспределения в любом элементе схемы. В [1] показано, что оценка влияния j -го пассивного регулятора на i -ю управляющую ветвь может быть найдена на основе формулы Лагранжа или на базе разложения искомой величины $q_i(h)$ в ряд Маклорена. Следует ожидать, что при использовании активных регуляторов характер изменения расходов воздуха будет описываться зависимостью вида (1), которая может быть построена на основе использования формулы Лагранжа [2], т.е.:

$$q_i(h_{a,p.}) = q_i(h_{j,n}) + f'(h_\xi)(h_{a,p.} - h_{j,n}), \quad (1)$$

где $q_i(h_{a,p.})$ – конечный расход воздуха, соответствующий состоянию активного регулятора при заданном значении $h_{a,p.}$, m^3/c ;

$q_i(h_{j,n})$ – начальное значение расходов воздуха в i -й выработке при условии, что на момент включения вентилятора в работу $h_{j,n}=0$, m^3/c ;

$f'(h_\xi)$ – производная от функции расхода, соответствующая некоторому значению депрессии источника тяги в промежутке между $h_{j,n}$ и $h_{a,p.}$;

$h_{a,p.}$ – текущая величина изменения депрессии активного регулятора, Па;

$h_{j,n}$ – депрессия источника тяги в начальный момент, Па.

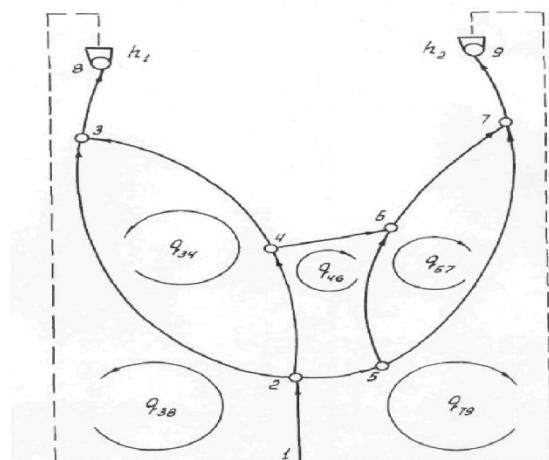


Рис.1. Расчетная пятиконтурная вентиляционная система

Из выражения (1) следует, что для определения конечного расхода воздуха в i -й ветви, необходимо знать закономерность изменения величины $f'(h_\xi)$. При использовании разложения в ряд Маклорена необходимо знать производные не только первого, но и более высокого порядков. Для исследования указанных особенностей при построении

функциональных зависимостей, связанных с изменением депрессии h_6 , рассмотрим расчетную вентиляционную схему, представленную на рис.1.

Исследуем влияние вентилятора, установленного в ветви 4-6 и работающего без перемычки, на потокораспределение в сети. Характеристики вентиляторов заданы в виде:

$$h_1 = 2347 - 0,15 \cdot q_{38}^2; \quad h_2 = 2870 - 0,36 \cdot q_{79}^2.$$

Таблица 1. Исходные данные к расчетной схеме (рис.1)

Код ветви	$R, nc^2/m^8$	$q, m^3/c$	Код ветви	$R, nc^2/m^8$	$q, m^3/c$
1-2	0,05	120	4-6	0,4	10
2-3	0,2	50	5-6	0,4	20
2-4	0,4	30	5-7	1,15	20
2-5	0,15	40	6-7	0,333	30
4-3	0,35	20	7-9	0,22	50
3-8	0,08	70			

Для оценки влияния активного регулятора, установленного в ветви 4-6, на изменение расходов воздуха в расчетной схеме, воспользуемся разложением искомых расходов в ряд Маклорена:

$$q_i = q_{i,0} + h_j \frac{\partial q_i}{\partial h_j} + \frac{1}{2} h_j^2 \frac{\partial^2 q_i}{\partial h_j^2} + \dots + \frac{1}{n!} h_j^n \frac{\partial^{(n)} q_i}{\partial h_j^{(n)}}, \quad (2)$$

где $q_{i,0}$ – расход воздуха в i -й выработке до изменения депрессии в j -й ветви, m^3/c ;

h_j – текущая величина изменяющейся депрессии активного регулятора в j -й ветви, Па.

Для определения производных составим систему уравнений, описывающих заданную расходную схему:

$$\begin{cases} R_{12}(q_{38} + q_{79})^2 + R_{23}(q_{38} - q_{43})^2 + R_{38}q_{38}^2 \\ = 2347 - 0,15 q_{38}^2; \\ R_{24}(q_{43} + q_{46})^2 + R_{43}q_{43}^2 - R_{23}(q_{38} - q_{43})^2 \\ = 0; \\ R_{24}(q_{43} + q_{46})^2 + R_{46}q_{46}^2 - R_{56}(q_{67} - q_{46})^2 - \\ - R_{25}(q_{79} - q_{46})^2 = h; \\ R_{56}(q_{67} - q_{46})^2 + R_{67}q_{67}^2 - R_{57}(q_{79} - q_{67})^2 \\ = 0; \\ R_{12}(q_{38} + q_{79})^2 + R_{25}(q_{79} - q_{46})^2 + R_{79}q_{79}^2 + \\ + R_{57}(q_{79} - q_{67})^2 = 2870 - 0,36 q_{79}^2, \end{cases} \quad (3)$$

где q_{43} , q_{38} , q_{46} , q_{67} , q_{79} – независимые расходы

Таблица 2. Результаты расчета производных

Код ветви	Базовый расход m^3/c	Производные от расходов		
		$\frac{\partial q}{\partial h} \cdot 10^3$	$\frac{\partial^2 q}{\partial h^2} \cdot 10^6$	$\frac{\partial^3 q}{\partial h^3} \cdot 10^9$
1-2	120	0,879	-4,257	3,503
2-3	50	7,095	0,708	0,587
2-4	30	12,810	-7,829	11,620
2-5	40	-19,026	2,864	-8,709
4-3	20	-11,830	-0,509	-2,366
3-8	70	-4,735	0,199	-1,779
4-6	10	24,640	-7,319	13,991
5-6	20	-16,680	0,314	-7,287
5-7	20	-2,344	2,549	-1,422
6-7	30	7,958	-7,005	6,703
7-9	50	5,614	-4,456	5,282

воздуха.

В третье уравнение системы (3) в соответствии с условием задачи введен изменяющийся параметр h .

Продифференцировав данную систему по изменяющемуся параметру после соответствующих подстановок вместо R и q их базовых значений, получим линейную систему уравнений относительно определяемых производных:

$$\begin{cases} 64,2 \frac{\partial q_{38}}{\partial h} - 20 \frac{\partial q_{43}}{\partial h} + 12 \frac{\partial q_{79}}{\partial h} = 0; \\ -20 \frac{\partial q_{38}}{\partial h} + 58 \frac{\partial q_{43}}{\partial h} + 24 \frac{\partial q_{46}}{\partial h} = 0; \\ 24 \frac{\partial q_{43}}{\partial h} + 60 \frac{\partial q_{46}}{\partial h} - 16 \frac{\partial q_{67}}{\partial h} - 12 \frac{\partial q_{79}}{\partial h} = 1; \\ -16 \frac{\partial q_{46}}{\partial h} + 81,98 \frac{\partial q_{67}}{\partial h} - 46 \frac{\partial q_{79}}{\partial h} = 0; \\ 12 \frac{\partial q_{38}}{\partial h} - 12 \frac{\partial q_{46}}{\partial h} - 46 \frac{\partial q_{67}}{\partial h} + 128 \frac{\partial q_{79}}{\partial h} = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Решая систему, находим производные первого

порядка. Производные более высокого порядка вычисляются дальнейшим последовательным дифференцированием выражения (3). В табл. 2 представлены результаты этих расчетов.

Используя данные табл. 2 и имея в виду (4), можно составить расчетные формулы по определению расхода воздуха в любом элементе рассматриваемой схемы в случае изменения депрессии активного регулятора в ветви 4-6.

Например, для независимых расходов с точностью до четырех членов разложения будем иметь следующие функциональные зависимости:

$$q_{43} = 20 - 11,830 \cdot 10^{-3} h - 0,509 \cdot 10^{-6} \frac{h^2}{2} - 2,366 \cdot 10^{-9} \frac{h^3}{6};$$

$$q_{38} = 70 - 4,735 \cdot 10^{-3} h + 0,199 \cdot 10^{-6} \frac{h^2}{2} - 1,779 \cdot 10^{-9} \frac{h^3}{6};$$

$$q_{46} = 10 + 2,464 \cdot 10^{-3} h - 7,319 \cdot 10^{-6} \frac{h^2}{2} + 13,991 \cdot 10^{-9} \frac{h^3}{6};$$

$$q_{67} = 30 + 7,958 \cdot 10^{-3} h - 7,005 \cdot 10^{-6} \frac{h^2}{2} + 6,703 \cdot 10^{-9} \frac{h^3}{6};$$

$$q_{79} = 50 + 5,614 \cdot 10^{-3} h - 4,456 \cdot 10^{-6} \frac{h^2}{2} + 5,282 \cdot 10^{-9} \frac{h^3}{6}.$$

Аналогично могут быть получены расчетные формулы для остальных расходов воздуха. Таким образом, полученные значения расходов воздуха для всего исследуемого диапазона изменения депрессии активного регулятора от -200 до +200 Па вполне надежны и могут быть использованы для дальнейшего анализа.

При построении функциональной зависимости по формуле Лагранжа следует обратить внимание на то, что геометрическая интерпретация производной $f'(h_\beta)$ на рассматриваемом промежутке изменения расходов воздуха соответствует $\operatorname{tg}\beta$, то есть тангенсу угла наклона стягивающей хорды, а производная в базовой точке $f'(h)$ равна $\operatorname{tg}\alpha$, то есть тангенсу угла наклона касательной к кривой в базовой точке распределения расходов воздуха в расчетной схеме при $h_{a,p}=0$, то высказанные вы-

$\operatorname{tg}\beta/\operatorname{tg}\alpha$

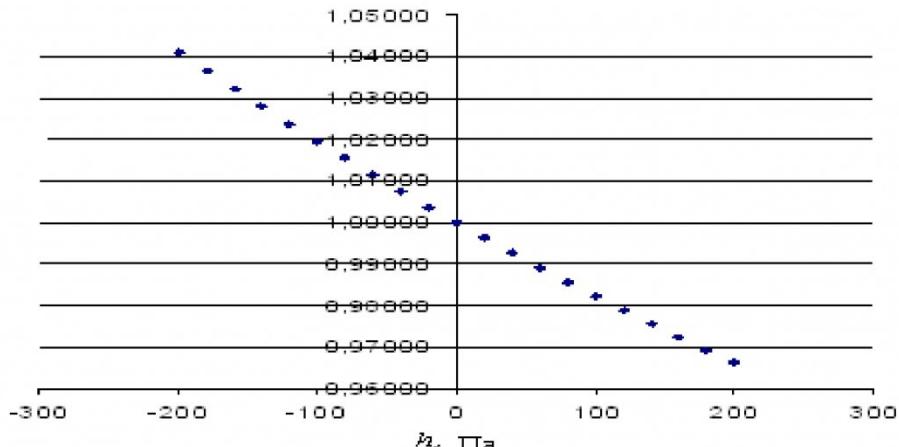


Рис. 2. Усредненная зависимость отношения $\operatorname{tg}\beta/\operatorname{tg}\alpha$ от изменения депрессии воздухопровода в процессе работы активного регулятора

Таблица 3. Сравнительные данные расходов воздуха в ветвях расчетной схемы рис.1 при изменении депрессии активного регулятора в элементе 4-6

Изменение депрессии активного регулятора $h_{a.p.}, \text{Pa}$	Расходы воздуха в ветвях расчетной схемы $q, \text{м}^3/\text{с}$														
	4-3				4-6				5-7						
	по формуле (9)		по стандартной методике		отклонение по отношению к стандартной методике, %		по формуле (9)		по стандартной методике		отклонение по отношению к стандартной методике, %		по формуле (9)		
	по Маклорену	по формуле (9)	по стандартной методике	по Маклорену	по формуле (9)	по стандартной методике	по Маклорену	по формуле (9)	по стандартной методике	по Маклорену	по формуле (9)	по стандартной методике	по Маклорену	по формуле (9)	
-200	22,36	22,45	22,358	0,01	0,4	4,91	4,89	4,907	0,07	-0,3	20,52	20,49	20,519	0,003	-0,14
-180	22,12	22,20	22,122	-0,01	0,35	5,43	5,42	5,433	-0,06	-0,24	20,46	20,44	20,462	-0,1	-0,11
-160	21,89	21,95	21,887	0,015	0,29	5,95	5,94	5,955	-0,09	-0,26	20,41	20,39	20,406	0,02	-0,08
-140	21,65	21,70	21,651	-0,005	0,22	6,47	6,46	6,474	-0,06	-0,21	20,35	20,34	20,351	-0,005	-0,05
-120	21,42	21,45	21,415	0,02	0,16	6,99	6,98	6,988	0,03	-0,12	20,30	20,29	20,297	0,01	-0,03
-100	21,18	21,21	21,180	0,002	0,14	7,50	7,49	7,499	0,01	-0,12	20,25	20,24	20,244	0,03	-0,02
-80	20,94	20,96	20,944	-0,02	0,08	8,00	8,00	8,006	-0,08	-0,08	20,20	20,19	20,193	0,04	-0,01
-60	20,71	20,72	20,708	0,01	0,06	8,51	8,51	8,510	-0,001	-0,001	20,15	20,14	20,142	0,04	-0,01
-40	20,47	20,48	20,472	-0,008	0,04	9,01	9,01	9,011	-0,008	-0,008	20,10	20,09	20,093	0,04	-0,01
-20	20,24	20,24	20,235	0,02	0,02	9,51	9,51	9,508	0,02	0,02	20,05	20,05	20,044	0,03	0,03
0	20,00	20,00	19,999	0,006	0,006	10,00	10,00	10,002	-0,02	-0,02	20,00	20,00	19,997	0,02	0,02
20	19,76	19,76	19,759	0,005	0,005	10,49	10,49	10,494	-0,04	-0,04	19,95	19,95	19,950	-0,002	-0,002
40	19,53	19,53	19,525	0,02	0,02	10,98	10,98	10,982	-0,02	-0,02	19,91	19,91	19,905	0,02	0,02
60	19,29	19,30	19,288	0,01	0,06	11,47	11,46	11,468	0,01	-0,07	19,86	19,86	19,861	-0,003	-0,003
80	19,05	19,07	19,051	-0,003	0,1	11,95	11,94	11,951	-0,01	-0,1	19,82	19,82	19,817	0,01	0,01
100	18,81	18,84	18,813	-0,015	0,14	12,43	12,42	12,432	-0,02	-0,1	19,78	19,77	19,775	0,03	-0,02
120	18,58	18,61	18,575	0,03	0,19	12,91	12,89	12,911	-0,005	-0,16	19,74	19,73	19,733	0,03	-0,02
140	18,34	18,39	18,336	0,02	0,29	13,38	13,36	13,387	-0,05	-0,2	19,70	19,68	19,693	0,04	-0,06
160	18,10	18,16	18,098	0,01	0,34	13,86	13,82	13,860	-0,003	-0,3	19,66	19,64	19,653	0,03	-0,07
180	17,86	17,94	17,859	0,007	0,45	14,33	14,29	14,332	-0,01	-0,3	19,62	19,59	19,615	0,03	-0,14
200	17,62	17,72	17,6195	0,003	0,57	14,80	14,74	14,8015	-0,01	-0,4	19,58	19,55	19,5772	0,01	-0,14

ше предположения могут быть представлены в виде функции:

$$\frac{\operatorname{tg}\beta_i}{\operatorname{tg}\alpha_i} = f(h), \quad (5)$$

где $i=1, 2, \dots, n$ – нумерация ветвей в расходной схеме;

$\operatorname{tg}\alpha_i$ и $\operatorname{tg}\beta_i$ – значения тангенсов углов наклона касательной и стягивающей хорды для i -й ветви в расчетной схеме.

Т. к. $f'(h_\xi) = \operatorname{tg}\beta$, то, имея в виду (5), получим $\operatorname{tg}\beta = \operatorname{tg}\alpha \cdot f(h)$. При любом изменении h тангенс угла наклона стягивающей хорды находится из выражения:

$$\operatorname{tg}\beta = \frac{q_k - q_n}{h_{a.p.} - h_n}$$

Т. к. $h_n = 0$, то данная зависимость упрощается до вида:

$$\operatorname{tg}\beta = \frac{q_k - q_n}{h_{a.p.}}. \quad (6)$$

Для определения конечных расходов q_k при изменении депрессии $h_{a.p.}$ в j -й ветви по стандартной методике необходимо прибавлять депрессию выработки и в расчет вводится величина $h = h_{a.p.} + h_{выр.}$.

Расчеты по определению $\operatorname{tg}\beta$, используя данные табл. 2 и найденные значения расходов воздуха, выполнены по формуле (6). Значения $\operatorname{tg}\alpha$ вычислялись для базового состояния распределения воздуха в вентиляционной сети при условии, что $h_6=0$ и соответствуют первым производным, представленным в табл. 2.

На графике (рис.2) нанесена усредненная зависимость $\operatorname{tg}\beta/\operatorname{tg}\alpha$ в процессе изменения депрессии активного регулятора.

Представленная на рис.2 зависимость $\operatorname{tg}\beta/\operatorname{tg}\alpha$ – есть функция от $h_{a.p.}$, т.е. $\operatorname{tg}\beta/\operatorname{tg}\alpha = f(h_{a.p.})$ и она может быть описана зависимостью вида:

$$(\operatorname{tg}\beta/\operatorname{tg}\alpha) - 1 = k \cdot h_{a.p.}, \quad (7)$$

где k – угловой коэффициент наклона данной функции к оси h .

Из графика параметр k определяется следующим образом:

$$k = \frac{\operatorname{tg}\beta / \operatorname{tg}\alpha - 1}{h_{a.p.}}.$$

Обработка результатов полученных значений k показала, что усредненное значение углового коэффициента для всех ветвей расчетной схемы при изменении активного источника тяги h в элементе 4-6 составляет величину $k=18,69 \cdot 10^{-5}$.

С учетом изложенного, из (7) следует, что

$$\operatorname{tg}\beta / \operatorname{tg}\alpha = 1 - 18,69 \cdot 10^{-5} h_{a.p.}$$

Откуда определяем $f'(h_\xi) = \operatorname{tg}\beta$, т.е.

$$\operatorname{tg}\beta = (1 - 18,69 \cdot 10^{-5} h_{a.p.}) \cdot \operatorname{tg}\alpha. \quad (8)$$

Возвращаясь к выражению (1) и имея в виду (8), получим искомую формулу, которая позволяет оценить влияние активного регулятора, работающего без перемычки, на изменение расхода воздуха в управляемых ветвях расчетной вентиляционной схемы:

$$q_i = q_{i_0} + \operatorname{tg}\alpha(-18,69 \cdot 10^{-5} h_{a.p.} + 1) \cdot h_{a.p.} \quad (9)$$

В табл. 3 приведены результаты сравнительных данных расходов воздуха в ветвях 4-3, 4-6, 5-7 рассматриваемой расчетной схемы в процессе изменения депрессии активного регулятора, расположенного в ветви 4-6.

Сравнивая данные расходов воздуха, найденные на основе зависимости (2), формулы (9) и по стандартной методике приходим к выводу, что сходимость их вполне удовлетворительная.

При установке активного регулятора в другие ветви угловой коэффициент k может несколько изменяться. Это связано с тем, что взаимодействие активного регулятора с основными источниками тяги находится в нелинейной зависимости. Поэтому установка активного регулятора в новой ветви изменяет его аэродинамическое воздействие на характер перераспределения воздуха в управляемых ветвях.

В этом случае для получения функциональной зависимости вида

$$q_i = q_{i_0} + \operatorname{tg}\alpha(-18,69 \cdot 10^{-5} h_{a.p.} + 1) \cdot h_{a.p.}$$

необходимо определить новый угловой коэффициент k .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Левицкий Ж.Г. Аэромеханика вентиляционных потоков. – Караганда: Караганда: КарГТУ, 2003. 228 с.
2. Левицкий Ж.Г., Нургалиева А.Д., Алимбаева Д.Ж. Анализ влияния активных регуляторов на изменение расходов воздуха в вентиляционной сети // Горное дело и металлургия в Казахстане. Состояние и перспективы. Алматы, 2006. С. 202-205.

Авторы статьи:

Левицкий

Жорж Георгиевич

- докт.техн.наук, проф. каф. рудничной аэробиологии и охраны труда (Карагандинский государственный технический университет)

Email: LG_36@mail.ru

Нургалиева

Асель Данияловна

- магистр техн. наук, ст. преп. каф. рудничной аэробиологии и охраны труда (Карагандинский государственный технический университет)

Email: m611adn@mail.ru