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 управляемую 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.:

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

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

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

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

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

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

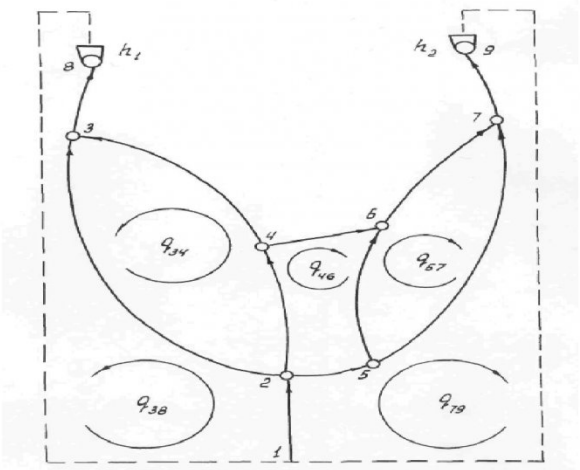

Рис.1. Расчетная пятиконтурная вентиляционная система

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 $h_в$, 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, $нс^2/м^8$	q, $м^3/с$	Код ветви	R, $нс^2/м^8$	q, $м^3/с$
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:

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

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

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

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

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

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

Таблица 2. Результаты расчета производных

Код ветви	Базовый расход $м^3/с$	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 $f'(h_\xi)$ на рассматриваемом промежутке изменения расходов воздуха соответствует $tg\beta$, то есть тангенсу угла наклона стягивающей хорды, а производная в базовой точке $f'(h)$ равна $tg\alpha$, то есть тангенсу наклона касательной к кривой в базовой точке распределения расходов воздуха в расчетной схеме при $h_{a.p.}$=0, то высказанные вы-

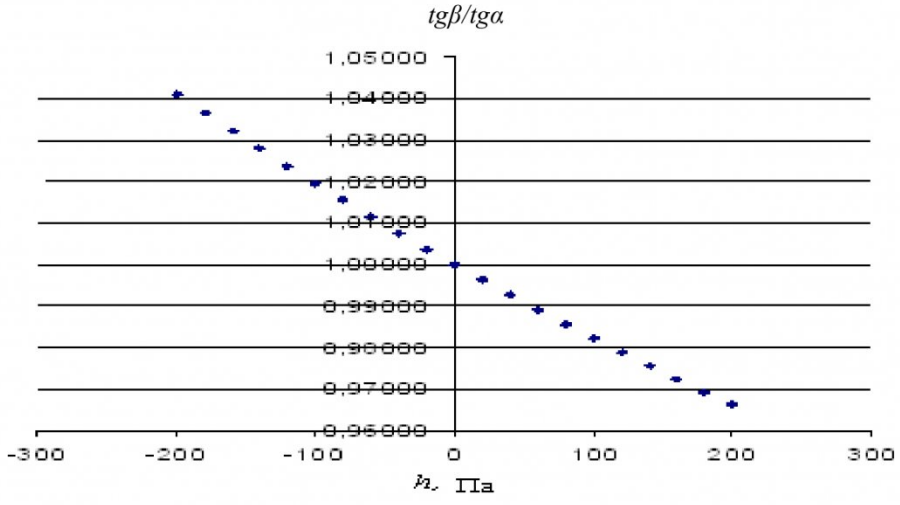

Рис. 2. Усредненная зависимость отношения $tg\beta/tg\alpha$ от изменения депрессии воздухопровода в процессе работы активного регулятора

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 $h_{a.p.}$, *Па*	Расходы воздуха в ветвях расчетной схемы q, $м^3/с$														
	4-3					4-6					5-7				
	по Маклорену	по формуле (9)	по стандартной методике	отклонение по отношению к стандартной методике, %		по Маклорену	по формуле (9)	по стандартной методике	отклонение по отношению к стандартной методике, %		по Маклорену	по формуле (9)	по стандартной методике	отклонение по отношению к стандартной методике, %	
				по Маклорену	по формуле (9)				по Маклорену	по формуле (9)				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	-,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	-,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:

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

где i=1, 2, …, n – нумерация ветвей в расходной схеме;

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

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

$$tg\beta = \frac{q_к - q_н}{h_{a.p.} - h_н}$$

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

$$tg\beta = \frac{q_к - q_н}{h_{a.p.}}. \qquad (6)$$

Для определения конечных расходов $q_к$ 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 $tg\beta$, используя данные табл. 2 и найденные значения расходов воздуха, выполнены по формуле (6). Значения $tg\alpha$ вычислялись для базового состояния распределения воздуха в вентиляционной сети при условии, что $h_в$=0 и соответствуют первым производным, представленным в табл. 2.

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

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

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

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

Из графика параметр k определяется следующим образом:

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

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=–18,69·10^{-5}.

С учетом изложенного, из (7) следует, что

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

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

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

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:

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

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

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

необходимо определить новый угловой коэффициент k.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Левицкий Ж.Г.* Аэромеханика вентиляционных потоков. – Караганда: 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 аэрологии и охраны труда (Карагандинский государственный технический университет)
Email:LG_36@mail.ru

Нургалиева
Асель Данияловна
- магистр техн. наук, ст. преп. каф. рудничной аэрологии и охраны труда (Карагандинский государственный технический университет)
Email: m611adn@mail.ru