

стояния устойчивости прибортовых массивов Сарбайского и Соколовского карьеров позволяет повысить эффективность разработки железорудных месторож-

дений открытым способом, обеспечить безопасные условия труда и бесперебойный режим работы горнодобывающих предприятий АО «ССГПО».

Таблица 1 – Результаты наблюдений за положением реперов по станции I

№ репера	Y	X	Z
Результаты измерения электронным тахеометром Leica TCA 1201			
Rp-I	1235,494	5145,544	177,364
ПЕ-6"	2496,423	4811,434	-25,762
Результаты измерения GPS приемником Leica 1200			
Rp-I	1235,491	5145,546	177,359
ПЕ-6"	2496,419	4811,437	-25,767

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проект наблюдательных станций за состоянием устойчивости бортов и отвала Соколовского карьера: отчет о НИР / КарГТУ. Караганда, 2008. 92 с.
2. Проект наблюдательных станций за состоянием устойчивости бортов и отвалов Сарбайского карьера: отчет о НИР / КарГТУ. Караганда, 2008. 118 с.
3. Инструкция по наблюдениям за деформациями бортов, откосов уступов и отвалов на карьерах и разработке мероприятий по обеспечению их устойчивости. ВНИМИ Л., 1971.
4. Мозер Д.В. Совершенствование методики маркшейдерских наблюдений за состоянием карьерных откосов с применением глобальных спутниковых систем: автореф. ... канд. техн. наук: 11.03.10. Караганда: КарГТУ, 2010.
5. Урдубаев Р.А., Ожигина С.Б., Мозер Д.В., Турсбеков С.В. Исследование деформаций бортов глубоких карьеров глобальными спутниковыми системами // Труды 11 Междунар. науч.-техн. конф. «Новое в безопасности жизнедеятельности», (Защита человека в ЧС, охрана труда, экология, логистика, экономика, материаловедение демпфирующих сплавов). Алматы, 2009. С. 127-132.

УДК 622.411.332 (574.31)

**Ж.Г. ЛЕВИЦКИЙ,
А.В. СОКОЛОВ**

Приложение теоремы Лагранжа к анализу сложных вентиляционных систем

Управление проветриванием шахт в условиях горного производства является непрерывным процессом и, как правило, связано с развитием подготовительных и очистных работ, введением в эксплуатацию новых горизонтов, объединением вентиляционных систем, загорождением и старением выработок, изменением газового баланса, установкой или демонтажом регулирующих устройств, возникновением аварийных ситуаций и т. д. Решение перечисленных задач связано с анализом сетевых уравнений вида [1]

$$\begin{cases} \sum_{i \in S} q_i = 0; \\ \sum_{i \in L} R_i q_i^2 + h_L = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где $S = 1, 2, 3, \dots, N$ – нумерация узлов вентиляционной сети;

$L = 1, 2, 3, \dots, K$ – нумерация независимых контуров вентиляционной сети;

$i = 1, 2, 3, \dots, n$ – нумерация ветвей вентиляционной сети;

q_i – расход воздуха в i -й ветви;

R_i – аэродинамическое сопротивление i -й ветви;

h_L – напорная характеристика вентилятора в L -м контуре.

Их решение позволяет найти естественное распределение воздуха во всех элементах вентиляционной сети независимо от её сложности.

Как видно из (1), найти явную зависимость типа $Q_i = F(R_1, R_2, \dots, R_n)$, позволяющую упростить методику расчёта сложных вентиляционных сетей в про-

цессе управления распределением расходов воздуха, невозможно ввиду нелинейности системы. Если обратиться к вентиляционной системе как к графу, то следует отметить, что в силу жёсткой взаимосвязанности его ветвей изменение аэродинамической характеристики j -й выработки вызывает изменение потоков распределения в любом её элементе. Для парных связей эта зависимость имеет вид $q_i = f(R_j)$. Так как данная функция является непрерывной и имеет непрерывную производную, что вытекает из анализа системы (1), то для двух различных значений R_j при монотонном возрастании или убывании функции расхода воздуха в силу теоремы Лагранжа [2] будет иметь место равенство

$$\frac{q_i(R_{j,k}) - q_i(R_{j,n})}{R_{j,k} - R_{j,n}} = f'(R_\xi), \quad (2)$$

где $q_i(R_{j,n})$ и $q_i(R_{j,k})$ – начальное и конечное значение расходов воздуха в i -й выработке, соответствующее начальному и конечному значениям сопротивления j -й ветви;

$f'(R_\xi)$ – производная от функции расхода, соответствующая некоторому значению сопротивления R_ξ в промежутке между $R_{j,n}$ и $R_{j,k}$.

Если на некоторый момент времени задано начальное воздухораспределение $q_i(R_{j,n})$, соответствующее исходному значению сопротивлений выработок, то при изменении j -го сопротивления на некоторую величину новое значение расхода воздуха может быть найдено из условия (2), т.е.

$$q_i(R_{j,k}) = q_i(R_{j,n}) + f'(R_g)(R_{j,k} - R_{j,n}). \quad (3)$$

Таким образом, выражение (3) является уравнением взаимосвязанности вентиляционных потоков в форме Лагранжа и с его помощью при известных значениях $f'(R_g)$, где $R_{j,n} < R_g < R_{j,k}$, можно оценить влияние j -го элемента на i -й управляемый поток воздуха.

В то же время в существующей технической литературе нет приемлемых зависимостей для определения $f'(R_g)$. Последние вычисляются в каждом конкретном случае, исходя из общих свойств описываемого объекта исследования и условий задачи.

Учитывая, что все изменения, протекающие в вентиляционной сети, взаимосвязаны, можно предположить, что отношение производных, соответствующих базовому состоянию сети, к производным на промежутке при изменении R_j будет величиной постоянной или близкой к этому значению для всех ветвей исходной системы независимо от её сложности.

Поскольку геометрическая интерпретация производной в точке равна тангенсу наклона касательной в

данной точке, а производная на промежутке соответствует тангенсу угла наклона стягивающей хорды (рисунок 1), то высказанные предположения могут быть записаны следующим образом:

$$\frac{tg \beta_1}{tg \alpha_1} = \frac{tg \beta_2}{tg \alpha_2} = \frac{tg \beta_3}{tg \alpha_3} = \dots = \frac{tg \beta_n}{tg \alpha_n};$$

$$tg \alpha_i = \frac{dq_i}{dR_j} \Big|_{R_j = R_{j,n}}; \quad (4)$$

$$tg \beta_i = \frac{dq_i}{dR_j} \Big|_{R_j = R_g, R_{j,n} < R_g < R_{j,k}}.$$

Рассмотрим вентиляционную сеть, состоящую из 23 ветвей и 15 узлов (рисунок 2). В качестве переменного параметра примем аэродинамическое сопротивление ветви 4-8. Базовые значения расходов воздуха для всех ветвей расчётной схемы при $R_{4,8} = 1,0$ даПа·с²/м⁶ приведены в таблице 1. Депрессии вентиляторов принимались равными $h_1 = 280$ даПа и $h_2 = 320$ даПа.

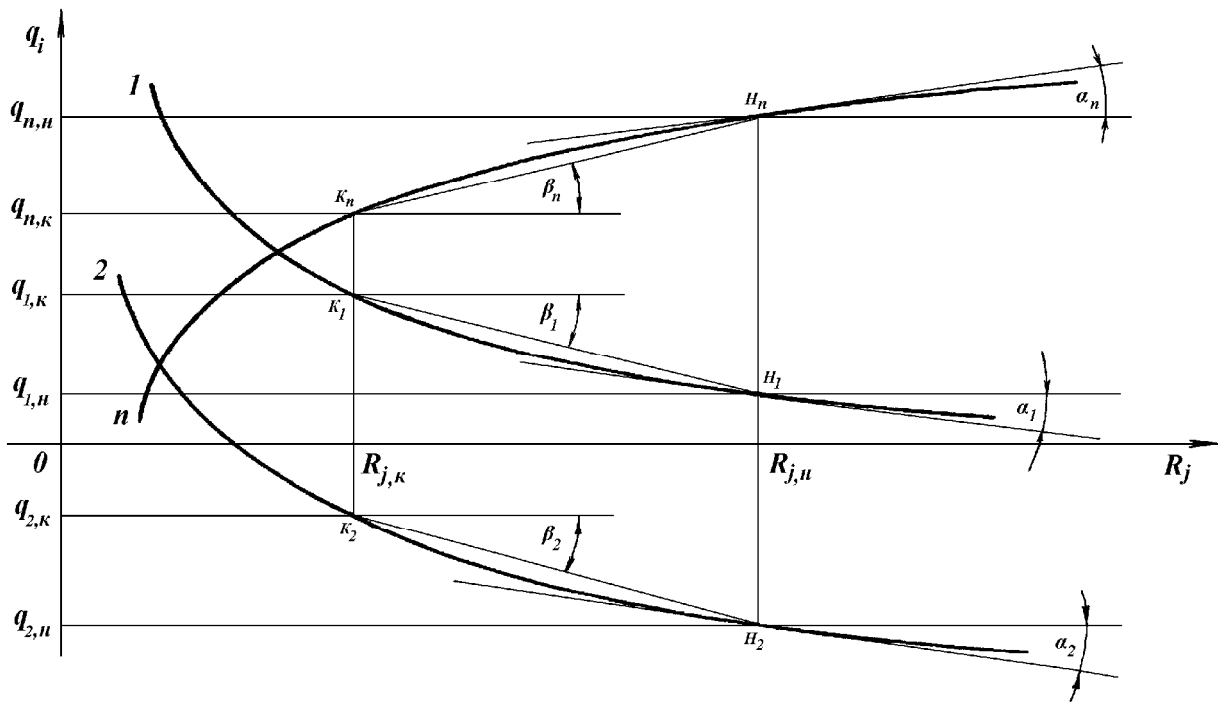


Рисунок 1 – Отображение влияния j -го регулятора на изменения расходов воздуха в управляемых ветвях

Таблица 1 – Базовые значения к расчётной схеме рисунка 2

Код ветви	R , даПа·с ² /м ⁶	q , м ³ /с	$\frac{dq}{dR_{q8}}$	Код ветви	R , даПа·с ² /м ⁶	q , м ³ /с	$\frac{dq}{dR_{q8}}$
1,2	0,005	104,76	-0,8950	7,10	0,052	28,35	1,5943
2,3	0,045	31,18	0,3996	8,10	0,090	9,79	1,6371
2,6	0,015	45,36	0,4648	8,15	0,026	17,90	-1,9939
2,4	0,025	28,22	-1,7594	10,13	0,0078	18,56	-0,0428
3,12	0,016	19,99	0,1101	9,11	0,016	33,32	1,0071
3,5	0,008	11,19	0,2895	12,14	0,0325	34,98	0,1345
6,7	0,065	8,24	-0,2773	11,14	0,084	18,09	-0,2446
4,7	0,038	20,11	1,8715	11,13	0,075	15,23	1,2518
4,8	1,000	8,11	-3,6310	13,15	0,0125	33,79	1,2090
5,9	0,075	3,80	-0,2650	15,17	0,64	51,69	-0,7849
6,9	0,010	37,12	0,7421	14,16	0,48	53,07	-0,1101
5,12	0,024	14,99	0,0245				

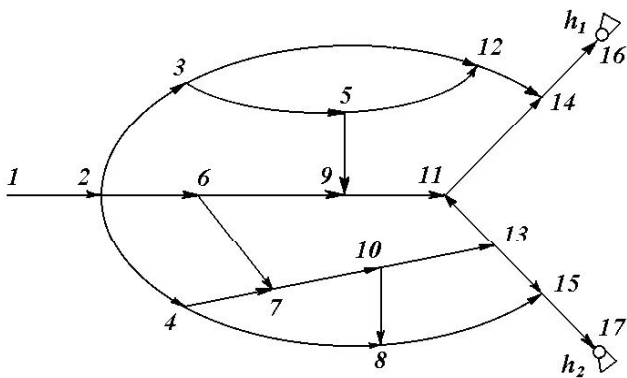


Рисунок 2 – Расчётная вентиляционная сеть с двумя вентиляторами

В качестве независимых расходов примем расходы воздуха в следующих ветвях заданной расчётной схемы: $q_{1,2}$; $q_{2,4}$; $q_{2,6}$; $q_{3,5}$; $q_{4,8}$; $q_{5,9}$; $q_{6,7}$; $q_{8,10}$; $q_{13,15}$. В этом случае система уравнений, описывающих расчётную вентиляционную сеть для принятых независимых расходов, имеет вид:

$$\begin{cases} R_{1,2}q_{1,2}^2 + R_{2,3}(q_{1,2} - q_{2,4} - q_{2,6})^2 + R_{3,12}(q_{1,2} - q_{2,4} - q_{2,6} - q_{3,5})^2 + R_{12,14}(q_{1,2} - q_{2,4} - q_{2,6} - q_{5,9})^2 + R_{14,16}(q_{1,2} - q_{4,8} - q_{10,8} - q_{13,15})^2 = h_1; \\ R_{2,6}q_{2,6}^2 + R_{6,9}(q_{6,9} - q_{6,7})^2 - R_{5,9}q_{5,9}^2 - R_{3,5}q_{3,5}^2 - R_{2,3}(q_{1,2} - q_{2,4} - q_{2,6})^2 = 0; \\ R_{3,5}q_{3,5}^2 + R_{5,12}(q_{3,5} - q_{5,9})^2 - R_{3,12}(q_{1,2} - q_{2,4} - q_{2,6} - q_{3,5})^2 = 0; \\ R_{5,9}q_{5,9}^2 + R_{9,11}(q_{2,6} - q_{6,7} + q_{5,9})^2 + R_{11,14}(q_{2,6} + q_{5,9} + q_{2,4} - q_{4,8} - q_{10,8} - q_{13,15})^2 - R_{12,14}(q_{1,2} - q_{2,4} - q_{2,6} - q_{5,9})^2 + R_{5,12}(q_{3,5} - q_{5,9})^2 = 0; \\ R_{2,4}q_{2,4}^2 + R_{4,7}(q_{2,4} - q_{4,8})^2 - R_{6,7}q_{6,7}^2 - R_{2,6}q_{2,6}^2 = 0; \\ R_{6,7}q_{6,7}^2 + R_{7,10}(q_{2,4} - q_{4,8} + q_{6,7})^2 + R_{10,13}(q_{2,4} - q_{4,8} + q_{6,7} - q_{10,8})^2 + R_{11,13}(q_{2,4} - q_{4,8} + q_{6,7} - q_{10,8} - q_{13,15})^2 + R_{9,11}(q_{2,6} - q_{6,7} + q_{5,9})^2 - R_{6,9}(q_{2,6} - q_{6,7})^2 = 0; \\ R_{4,8}q_{4,8}^2 - R_{10,8}q_{10,8}^2 - R_{7,10}(q_{2,4} - q_{4,8} - q_{6,7})^2 - R_{4,7}(q_{2,4} - q_{4,8})^2 = 0; \\ R_{10,8}q_{10,8}^2 + R_{8,15}(q_{4,8} + q_{10,8})^2 - R_{13,15}q_{13,15}^2 - R_{10,13}(q_{2,4} - q_{4,8} + q_{6,7} - q_{10,8})^2 = 0; \\ R_{1,2}q_{1,2}^2 + R_{2,4}q_{2,4}^2 + R_{4,8}q_{4,8}^2 + R_{8,15}(q_{4,8} + q_{10,8})^2 + R_{15,17}(q_{13,15} + q_{4,8} + q_{10,8})^2 = h_2. \end{cases}$$

Методика выполнения экспериментов по определению производных $dq/dR_{4,8}$ состояла в следующем. После дифференцирования данной системы по изменяющемуся параметру $R_{4,8}$, подстановки из таблицы 1 базовых значений расходов воздуха q_i и аэродинамических сопротивлений R_i для всех ветвей рассматриваемой схемы и приведения подобных получим систему линейных уравнений вида (5), решая которую находим искомые производные $dq/dR_{4,8}$. Результаты расчётов приведены в таблице 1.

Для определения параметра $f'(R_{4,8}) = \text{tg}\beta_i$ значение аэродинамического сопротивления влияющей ветви последовательно изменялось в диапазоне от $R_{4,8 \min} = 0,001 \text{ даПа}\cdot\text{с}^2/\text{м}^6$ до $R_{4,8 \max} = 100 \text{ даПа}\cdot\text{с}^2/\text{м}^6$ и на каждом шаге этого изменения по стандартной методике вычислялось новое распределение расходов воздуха. В свою очередь, для каждого фиксированного значения $R_{4,8}$ на основе найденного потокораспределения и известного базового расхода по формуле (2) вычислялись производные $f'(R_{4,8}) = \text{tg}\beta_i$, а также их отношение к $\text{tg}\alpha_i = f(R_{4,8})$ т.е. $f'(R_{4,8})/f(R_{4,8})$.

В таблице 2 представлены результаты выполненных расчётов по определению отношения $f'(R_{4,8})/f(R_{4,8})$ для выбранной группы расходов воздуха заданной вентиляционной схемы.

$$\begin{cases} 27,454 \frac{dq_{1,2}}{dR_{4,8}} - 28,014 \frac{dq_{2,4}}{dR_{4,8}} - 2,137 \frac{dq_{2,6}}{dR_{4,8}} - 0,32 \frac{dq_{3,5}}{dR_{4,8}} - 25,474 \frac{dq_{4,8}}{dR_{4,8}} - 1,137 \frac{dq_{5,9}}{dR_{4,8}} - 25,474 \frac{dq_{10,8}}{dR_{4,8}} - 0,422 \frac{dq_{13,15}}{dR_{4,8}} = 0; \\ -1,403 \frac{dq_{1,2}}{dR_{4,8}} + 1,403 \frac{dq_{2,4}}{dR_{4,8}} + 2,084 \frac{dq_{2,6}}{dR_{4,8}} - 0,09 \frac{dq_{3,5}}{dR_{4,8}} - 0,285 \frac{dq_{5,9}}{dR_{4,8}} - 0,371 \frac{dq_{6,7}}{dR_{4,8}} = 0; \\ -0,32 \frac{dq_{1,2}}{dR_{4,8}} + 0,32 \frac{dq_{2,4}}{dR_{4,8}} + 0,32 \frac{dq_{2,6}}{dR_{4,8}} + 0,77 \frac{dq_{3,5}}{dR_{4,8}} - 0,36 \frac{dq_{5,9}}{dR_{4,8}} = 0; \\ -1,137 \frac{dq_{1,2}}{dR_{4,8}} + 2,656 \frac{dq_{2,4}}{dR_{4,8}} + 3,19 \frac{dq_{2,6}}{dR_{4,8}} + 0,36 \frac{dq_{3,5}}{dR_{4,8}} - 1,52 \frac{dq_{4,8}}{dR_{4,8}} - 12,11 \frac{dq_{5,9}}{dR_{4,8}} - 1,52 \frac{dq_{10,8}}{dR_{4,8}} - 1,52 \frac{dq_{13,15}}{dR_{4,8}} = 0; \quad (5) \\ 1,47 \frac{dq_{2,4}}{dR_{4,8}} - 0,68 \frac{dq_{2,6}}{dR_{4,8}} - 0,76 \frac{dq_{4,8}}{dR_{4,8}} - 0,536 \frac{dq_{6,7}}{dR_{4,8}} = 0; \\ 0,477 \frac{dq_{2,4}}{dR_{4,8}} + 0,162 \frac{dq_{2,6}}{dR_{4,8}} - 0,477 \frac{dq_{4,8}}{dR_{4,8}} + 0,533 \frac{dq_{5,9}}{dR_{4,8}} + 0,85 \frac{dq_{6,7}}{dR_{4,8}} + 1,142 \frac{dq_{10,8}}{dR_{4,8}} = 0; \\ -2,238 \frac{dq_{2,4}}{dR_{4,8}} + 10,348 \frac{dq_{4,8}}{dR_{4,8}} + 1,474 \frac{dq_{6,7}}{dR_{4,8}} = -32,886; \\ -0,145 \frac{dq_{2,4}}{dR_{4,8}} + 0,61 \frac{dq_{4,8}}{dR_{4,8}} - 0,145 \frac{dq_{6,7}}{dR_{4,8}} + 1,491 \frac{dq_{10,8}}{dR_{4,8}} + 0,422 \frac{dq_{13,15}}{dR_{4,8}} = 0; \\ 0,524 \frac{dq_{1,2}}{dR_{4,8}} + 0,706 \frac{dq_{2,4}}{dR_{4,8}} + 41,657 \frac{dq_{4,8}}{dR_{4,8}} + 33,547 \frac{dq_{10,8}}{dR_{4,8}} + 33,082 \frac{dq_{13,15}}{dR_{4,8}} = -32,886, \end{cases}$$

Таблица 2 – Сводные данные результатов расчёта параметров $f'(R_{\xi})/f'(R_{j,n})$ для выбранных расходов воздуха расчётной схемы рисунка 2

Код ветви	$f'(R_{\xi})/f'(R_{j,n})$ при изменении $R_{4,8}$, даПа·с ² /м ⁶									
	0,001	0,005	0,01	0,02	0,05	0,08	0,1	0,2	0,5	0,8
1,2	6,716	6,336	5,949	5,361	4,288	3,663	3,363	2,472	1,498	1,117
2,4	9,989	8,923	7,650	6,354	4,814	3,380	3,121	2,353	1,482	1,126
2,6	7,492	6,998	6,511	5,790	4,308	3,832	3,501	2,539	1,518	1,125
3,5	11,069	9,065	7,174	5,570	4,362	3,667	3,401	2,771	1,548	1,124
4,8	8,239	7,559	6,929	6,042	4,545	3,778	3,423	2,501	1,531	1,129
5,12	7,879	7,144	6,528	5,638	4,342	3,723	3,486	2,655	1,557	1,161
6,9	8,611	7,609	6,998	6,279	4,691	3,881	3,525	2,587	1,527	1,125
8,15	7,651	6,550	6,337	5,872	4,923	3,912	3,605	2,776	1,611	1,172
11,14	7,039	6,616	6,186	5,531	4,297	3,615	3,306	2,210	1,386	1,100
Код ветви	$f'(R_{\xi})/f'(R_{j,n})$ при изменении $R_{4,8}$, даПа·с ² /м ⁶									
	1,0	2,0	3,0	5,0	10,0	20,0	30,0	50,0	80,0	100
1,2	1,0	0,606	0,450	0,304	0,172	0,090	0,063	0,042	0,0268	0,0218
2,4	1,0	0,605	0,452	0,303	0,172	0,089	0,063	0,041	0,0266	0,0216
2,6	1,0	0,614	0,456	0,308	0,174	0,089	0,062	0,042	0,0271	0,0219
3,5	1,0	0,594	0,444	0,300	0,168	0,086	0,060	0,040	0,0258	0,0210
4,8	1,0	0,593	0,437	0,292	0,164	0,083	0,058	0,039	0,0252	0,0204
5,12	1,0	0,638	0,463	0,303	0,174	0,093	0,064	0,041	0,0230	0,0216
6,9	1,0	0,581	0,427	0,283	0,159	0,086	0,060	0,037	0,0241	0,0195
8,15	1,0	0,612	0,456	0,309	0,175	0,085	0,059	0,0423	0,0274	0,0220
11,14	1,0	0,589	0,435	0,292	0,164	0,082	0,057	0,040	0,0253	0,0205

Как показывают эксперименты, стабильность отношения $f'(R_{\xi})/f'(R_{j,n})$ возрастает с ростом аэродинамического сопротивления $R_{4,8}$ влияющей ветви.

Если проанализировать итоговые данные, легко убедиться в справедливости сделанных выше предположений. Действительно, начиная с $R_{4,8} \geq 0,001$ даПа·с²/м⁶ для каждого последующего фиксированного сопротивления, отношения $f'(R_{\xi})/f'(R_{j,n})$ с незначительными вариациями колеблются около среднего значения. Максимальная величина отклонения от среднего значения не превышает 15 % и имеет место для принятых верхней и нижней границы изменения $R_{4,8}$. По мере увеличения $R_{4,8}$ уменьшается разброс точек, что свидетельствует о правильности выбора исходных предпосылок для построения функциональной зависимости между отношением производных, с одной стороны, и изменяющимся аэродинамическим сопротивлением влияющей ветви, с другой.

Для наглядности и охвата всего диапазона данных таблицы 2, значения отношения $f'(R_{\xi})/f'(R_{j,n})$ от изменения сопротивления регулятора $R_{4,8}$ представлены на рисунке 3 в виде графика, где ось абсцисс является натуральным логарифмом сопротивления регулятора $R_{4,8}$.

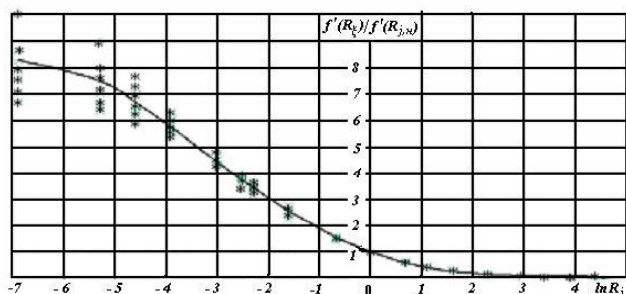


Рисунок 3 – Логарифмическая зависимость отношения $f'(R_{\xi})/f'(R_{j,n})$ от изменения сопротивления регулятора $R_{4,8}$

Установлено, что отношение производной $f'(R_{\xi})$ к производной в базовой точке $f'(R_{j,n})$, соответствующей состоянию сети при $R_{j,n} = 1,0$ даПа·с²/м⁶, $i = \overline{1, n}$, изменяется в ходе изменения R_j по одному и тому же закону для всех ветвей вентиляционной системы.

Для интерполяции экспериментальных данных был применён метод наименьших квадратов [3]. В качестве аппроксимирующей функции был выбран полином четвертой степени, так как он позволяет достаточно точно описать зависимость отношения $f'(R_{\xi})/f'(R_{j,n})$ от изменения сопротивления регулятора $R_{4,8}$, о чем свидетельствует стандартное отклонение $S_1 = 0,401$.

В силу того, что недостатком аппроксимации полиномом является расхождение с экспериментальными данными на концах диапазона (в данном случае при $R_{4,8} > 50$ даПа·с²/м⁶), а также в силу зависимости отношения $f'(R_{\xi})/f'(R_{j,n})$ от изменения сопротивления регулятора $R_{4,8}$, близкой к линейной на диапазоне $10 \leq R_{4,8} < 100$ даПа·с²/м⁶, то уместно на этом диапазоне аппроксимировать её прямой линией. В итоге имеем на интервале изменения регулятора $0,001 < R_j < 10$ даПа·с²/м⁶, зависимость описывается уравнением

$$f'(R_{\xi})/f'(R_{j,n}) = (1 - 0,714 \ln R_j + 0,163 (\ln R_j)^2 - (6,56 \times 10^{-4}) \cdot (\ln R_j)^3 - (3,47 \times 10^{-3}) (\ln R_j)^4) \quad (6)$$

В свою очередь на интервале $10 \leq R_j < 100$ даПа·с²/м⁶ уравнение примет вид:

$$f'(R_{\xi})/f'(R_{j,n}) = 0,18 - 0,032 \ln R_j. \quad (7)$$

Так как $f'(R_{\xi}) = \text{tg} \beta_i$, то выражение (3) с учётом (4) и (6) преобразуется к виду:

$$q_i = q_{i,0} + [-0,714 \ln R_j + 0,163 \cdot (\ln R_j)^2 - (6,56 \times 10^{-4}) \cdot (\ln R_j)^3 - (3,47 \times 10^{-3}) \cdot (\ln R_j)^4] \cdot \frac{dq_i}{dR_j} \cdot (R_j - 1). \quad (8)$$

Данное выражение справедливо для $0,001 < R_j < 10$ даПа·с²/м⁶. Тогда как на интервале $10 \leq R_j < 100$ даПа·с²/м⁶ имеем:

$$q_i = q_{i,0} + (0,18 - 0,032 \ln R_j) \cdot \frac{dq_i}{dR_j} \cdot (R_j - 1), \quad (9)$$

где $q_{i,0}$ – начальный базовый расход воздуха в i -й выработке, соответствующей значению $R_j = 1,0$ даПа·с²/м⁶.

Полученные зависимости (8) и (9) позволяют определять величину нового расхода воздуха в любой i -й ветви заданной расчётной схемы при изменении аэродинамического сопротивления регулятора $R_{4,8}$ в заданном диапазоне без необходимости решения многомерной нелинейной системы уравнений. Так, для ветви 2-4 зависимости для определения расхода воздуха при изменении сопротивления $R_{4,8}$ будут иметь вид:

– при изменении $R_{4,8}$ на интервале от 0,001 до 10 даПа·с²/м⁶

$$q_{2,4} = 28,22 + [1 - 0,714 \ln R_{4,8} + 0,163(\ln R_{4,8})^2 - (6,56 \times 10^{-4}) \cdot (\ln R_{4,8})^3 - (3,47 \times 10^{-3}) \cdot (\ln R_{4,8})^4] \cdot (-1,7594) \cdot (R_{4,8} - 1); \quad (10)$$

– при изменении $R_{4,8}$ на интервале от 10 до 100 даПа·с²/м⁶

$$q_{2,4} = 28,22 + (0,18 - 0,032 \ln R_{4,8}) \cdot (-1,7594) \cdot (R_{4,8} - 1). \quad (11)$$

При построении зависимостей вида (10) и (11) для любой i -й ветви заданной расчётной схемы в исходные формулы (8) и (9) начальные базовые значения расходов воздуха q_i и производные $\frac{dq_i}{dR_{4,8}}$, берутся из таблицы 1, которые определялись по изложенной выше методике. Аналогично могут быть получены расчётные формулы для остальных ветвей заданной вентиляционной схемы.

При изменении места расположения регулятора R_j для получения зависимостей вида (10) и (11) на основе формул (8) и (9) необходимо найти новое базовое значение расходов воздуха $q_{i,0}$, соответствующие значению сопротивления регулятора $R_j = 1,0$ даПа·с²/м⁶ для всех ветвей расчётной схемы.

Поскольку дифференцирование исходной системы уравнений, описывающих расчётную вентиляционную сеть, достаточно сложная процедура, то, придавая аэродинамическому сопротивлению регулятора R_j достаточно малое приращение, процесс вычисления базовых производных $\frac{dq_i}{dR_j}$ можно осуществлять с

достаточной для практики точностью по формуле

$$\frac{dq_i}{dR_j} \cong \frac{q_{i,n} - q_{i,k}}{R_{j,n} - R_{j,k}}, \quad (12)$$

где $q_{i,n}$ – базовый расход воздуха в i -й выработке при $R_{j,n} = 1,0$ даПа·с²/м⁶, м³/с;

$q_{i,k}$ – расход воздуха в i -й выработке при $R_{j,k} = 0,95$ даПа·с²/м⁶, м³/с.

Следует обратить внимание на то, что производные $\frac{dq_i}{dR_j}$, $j = \overline{1, p}$ являются условиями качественной оценки изменений, протекающих в вентиляционной сети под воздействием j -го регулятора. По их знаку легко выделить ветви, в которых расход воздуха

будет убывать или возрастать. Если $\frac{dq_i}{dR_j} > 0$, то в такой ветви с увеличением R_j будет увеличиваться и расход воздуха, что характеризует условно параллельную связь управляющей j -й ветви с управляемым потоком воздуха в i -й ветви. При $\frac{dq_i}{dR_j} < 0$ результат

будет противоположным, что характеризует условно последовательную связь регулятора с управляемым потоком воздуха.

Выполненные расчёты показали, что получаемые аппроксимирующие уравнения с достаточной для практики точностью характеризуют связанность потоков воздуха в сложной вентиляционной сети в широком диапазоне изменения аэродинамического сопротивления регулятора. При этом отпадает необходимость на каждом шаге изменения аэродинамического сопротивления регулятора решать многомерные нелинейные системы уравнений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Левицкий Ж.Г. Аэромеханика вентиляционных потоков. Караганда: КарГТУ, 2003. 228 с.
2. Гребенча М.К., Новоселов С.И. Курс математического анализа. М.: Высшая школа, 1960. 543 с.
3. Тарасевич Ю. Ю. Численные методы на Mathcad[®]. Астрахань: АПИУ, 2003. 70 с.

УДК 622.831

**В.Ф. ДЕМИН,
Т.К. ИСАБЕК,
В.В. ЖУРОВ,
В.В. ДЕМИН,
А.А. СКОРЯКИН**

Исследование влияния угла наклона анкера на напряженное состояние массива горных пород с прямоугольной выработкой

Вопрос устойчивости горных выработок при возрастании горного давления и увеличении напряженно-деформированного состояния массива в современных условиях имеет прикладное значение.

Важной задачей является определение напряженно-деформированного состояния массива с учетом влияющих факторов на устойчивость контуров горной выработки. В качестве расчетной схемы выбрана пря-