

УДК 622.41.519.001.57

Семин Михаил Александрович
инженер отдела аэрологии и теплофизики,
Горный институт УрО РАН,
614007 г. Пермь, ул. Сибирская, 78А
e-mail: mishkasemin@gmail.com

Левин Лев Юрьевич
доктор технических наук,
заведующий отделом
аэрологии и теплофизики,
Горный институт УрО РАН
e-mail: aerolog_lev@mail.ru

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ
МОДЕЛИРОВАНИЯ АЭРОЛОГИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ В РУДНИЧНЫХ
ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СЕТЯХ
ПРИ РЕВЕРСИРОВАНИИ ГЛАВНЫХ
ВЕНТИЛЯТОРНЫХ УСТАНОВОК**

Аннотация:

В данной работе представлен анализ результатов экспериментального исследования воздухораспределения в реверсивном режиме проветривания на калийных рудниках Верхнекамского месторождения. Проведена классификация факторов, влияющих на воздухораспределение при реверсировании главного вентилятора. Выделены объективные факторы, связанные с аэродинамикой или термодинамикой воздушных потоков и поддающиеся научному анализу, и субъективные факторы, которые имеют причины технологического рода, связанные с неисправностями в работе рудника. Для исследования объективных факторов получена аналитическая формула, позволяющая определять величину местных аэродинамических сопротивлений между входящими и исходящими из сопряжений горными выработками произвольного вида, построен метод численного расчета воздухораспределения в вентиляционных сетях при реверсировании главного вентилятора. Для минимизации субъективных факторов сформулированы общие организационно-технические мероприятия по обеспечению нормативно-допустимых величин утечек воздуха при реверсировании ГВУ.

Ключевые слова: реверсирование, главная вентиляционная установка, рудничная вентиляция, математическое моделирование, местные аэродинамические сопротивления, организационно-технические мероприятия

DOI: 10.18454/2313-1586.2017.01.138

Semin Mike A.
engineer
of aerology and thermal physics department,
Mining Institute UB RAS,
614007 Perm, 78-A Sibirskaya st..
e-mail: mishkasemin@gmail.com

Levin Lev Yu.
Doctor of technical sciences,
the head of aerology
and thermal physics department,
Mining Institute UB RAS.
e-mail: aerolog_lev@mail.ru

**WORKING OUT AERODYNAMIC
PROCESSES MODELING METHODS
IN MINE VENTILATION NETWORKS
BY MAIN FAN INSTALLATIONS
REVERSAL**

Abstract:

In this paper the analysis of air distribution experimental investigation by main fan reversal is presented. Air flow and pressure measurements are accomplished in Verkhnekamsky field potash mines. Classification of factors influencing on air distribution is proposed. Basic objective factors, connected with aero-dynamics and thermo-dynamics of air flows that are appropriate for scientific analysis, as well as subjective factors, connected with failures in mine ventilation structures functioning are marked out. The analytical formula, which allows determination of shock losses in mine airways junction is obtained for objective factors investigation. Subjective factors investigation and minimization general organizational and technical measures on providing regulatory permissible values of air leakage in case of main fan reversal are formulated.

Key words: reversal ventilation mode, main fan, mine ventilation, mathematical modeling, shock losses, organizational and technical measures

Введение

«Правила безопасности при ведении горных работ...» предъявляют ряд требований к системе вентиляции рудничной атмосферы при реверсировании главной вентиляторной установки (ГВУ). Соблюдение данных требований необходимо для обеспечения безопасного вывода людей из рудника при ликвидации пожаров, задымлений и прочих аварий. В частности, накладываются ограничения на минимальную величину расходов

воздуха в горных выработках главных направлений, которая должна составлять не менее 60 % от расхода воздуха в нормальном режиме проветривания. Поэтому на этапах проектирования и реконструкции рудников встает вопрос о прогнозировании воздухораспределения в реверсивном режиме проветривания.

Наиболее существенным фактором, влияющим на воздухораспределение при изменении режима работы ГВУ, являются местные сопротивления. По оценкам [1 – 4], относительный вклад местных сопротивлений в общее сопротивление вентиляционной сети калийных рудников составляет 15 – 25 % и увеличивается при относительном увеличении площадей поперечного сечения горных выработок. Местные сопротивления, в отличие от сопротивлений трения линейных участков горных выработок, являются несимметричными относительно смены направления потока [3, 4]. В результате реальное воздухораспределение, получаемое на рудниках при изменении режима работы ГВУ, может существенно отличаться от теоретического воздухораспределения с учетом только линейной части сопротивления.

В настоящее время в литературе существует ряд методов расчета местных аэродинамических сопротивлений [5 – 7]. Однако их интеграция в сетевые методы расчета воздухораспределения вентиляционных сетей произвольного вида осложнена или вовсе невозможна. В ряде случаев методы позволяют точно рассчитывать перепады давлений для частных случаев сопряжений трех горных выработок под прямым углом [5, 6], в ряде случаев не учитываются важные физические процессы [4].

В существующих в литературе исследованиях также не проводится оценок влияния факторов, связанных с технологическими нарушениями вентиляции рудников при изменении режима работы ГВУ, нет и комплексных методик по ликвидации влияния данных факторов. Как показывает практика, такие факторы, как изменение утечек воздуха вследствие открытия вентиляционных дверей или ляд, могут оказать существенное влияние на изменение расходов воздуха в вентиляционной сети после реверсирования ГВУ.

Для выявления данных факторов и оценки степени их влияния на предварительном этапе исследования проведены экспериментальные измерения расходов и давлений воздуха на калийных рудниках Верхнекамского месторождения в условиях перехода с нормального на реверсивный режим работы ГВУ [8]. Данные исследования показали, что местные аэродинамические сопротивления различных участков вентиляционной сети зависят от широкого спектра факторов, которые можно разделить на три группы: объективные измеримые, субъективные измеримые и неизмеримые. Объективными считаются факторы, которые имеют причины, связанные с аэродинамикой или термодинамикой воздушных потоков, и поддаются научному анализу. Субъективными считаются факторы, которые имеют причины технологического рода, связанные с неисправностями в работе рудника. Относительный вклад каждой из указанных групп факторов в общем случае индивидуален для каждого рудника (рис. 1).

Первая группа факторов является предметом физического анализа. Ее доля оказалась наиболее существенной в общем изменении расходов воздуха. Вторая группа факторов не является объектом физического анализа, однако ее регулирование и минимизация ее влияния могут и должны осуществляться в нормативных документах по организации и проведению процедуры реверсирования ГВУ. Полученные экспериментальные факты являются основанием для разработки теоретических моделей для анализа физических процессов, влияющих на воздухораспределение при реверсировании ГВУ.

Комплексная методика математического прогнозирования воздухораспределения в рудничных вентиляционных сетях при реверсировании ГВУ должна включать в себя как исследование объективных факторов посредством инструментов математического анализа, так и рекомендации по минимизации субъективных факторов.

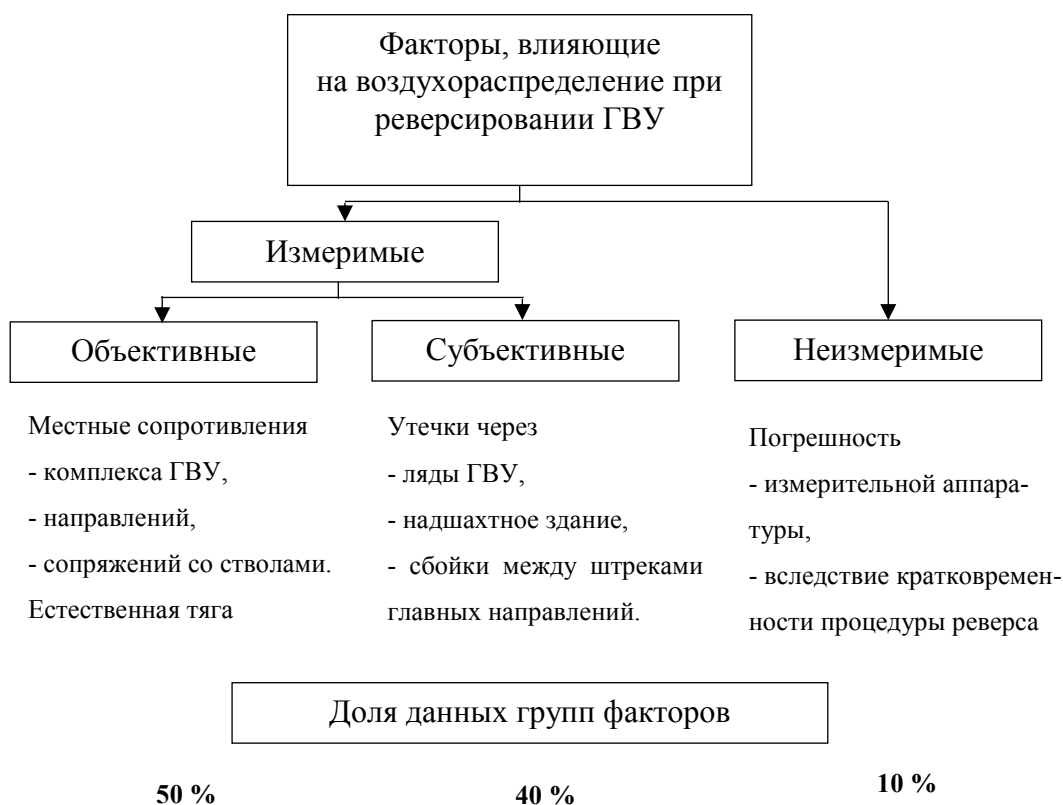


Рис. 1 – Факторы, влияющие на воздухораспределение при реверсировании ГВУ

Поэтому целью данного исследования стала разработка методики прогнозирования воздухораспределения в рудничных вентиляционных сетях произвольной топологии при реверсировании главной вентиляторной установки, учитывающей влияние местных аэродинамических сопротивлений и включающей набор организационно-технических мероприятий по минимизации влияния субъективных факторов.

Исследование объективных факторов

При теоретическом анализе местных аэродинамических сопротивлений сопряжений горных выработок принимались следующие существенные физические процессы:

- расширение/сжатие потока;
- поворот потока;
- смешивание потоков, входящих в сопряжение;
- трение вследствие шероховатости стенок.

Учет представленных физических процессов осуществлялся в данной работе теоретически на базе идеализированной модели сопряжения горных выработок, характеризующейся следующими геометрическими и физическими параметрами:

- периметрами P_i сечений горных выработок, м;
- площадями поперечного сечения S_i горных выработок, м²;
- углами поворота δ_{ij} между любыми двумя выработками № i и № j , входящими в сопряжения, рад;
- коэффициентами аэродинамического сопротивления α_i горных выработок, кг/м³;
- объемными расходами Q_i в горных выработках, граничащих с сопряжением, с типовыми геометрическими характеристиками, м³/с (рис. 2).

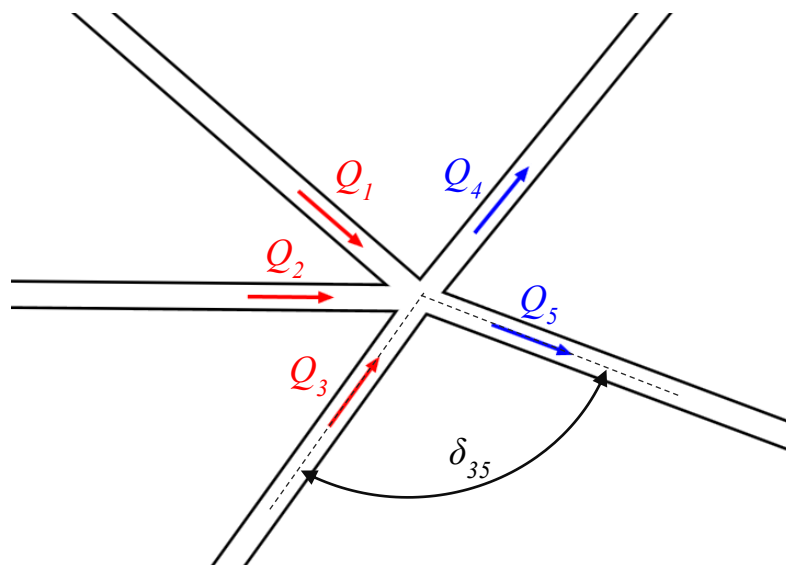


Рис. 2 – Геометрическая модель сопряжения горных выработок для случая $N = 5$ выработок

В работе построена математическая модель течения через сопряжение горных выработок произвольного вида, учитывающая совместное действие упомянутых выше существенных физических процессов. Получена следующая аналитическая формула для определения местного аэродинамического сопротивления (депрессия, выраженная в паскалях) в узле между произвольными ветвями № i и № j , граничащими с сопряжением:

$$\begin{aligned}
 H_{ij} = & -\beta_j \omega_j^{(out)} \sum_s \left| \frac{Q_s^{(in)}}{Q_\Sigma} \right| \frac{\rho (V_s^{(in)} - V_j^{(out)})^2}{2} - \\
 & -\beta_j \omega_j^{(out)} \sum_s \left| \frac{Q_s^{(in)}}{Q_\Sigma} \right| \frac{\rho (V_i^{(in)2} - V_s^{(in)2})}{2} - \\
 & -\beta_j \omega_j^{(out)} \sum_s \rho \frac{Q_s^{(in)}}{S_s^{(in)}} (V_i^{(in)} - V_s^{(in)}) - \\
 & -2\beta_j \sum_s \rho \left| V_j^{(out)} V_s^{(in)} \cdot \frac{Q_s^{(in)}}{Q_\Sigma} \right| \cdot \sin^2(\delta_{sj} / 2).
 \end{aligned} \tag{1}$$

Здесь $\beta = 0,95 + 280\alpha$ – коэффициент шероховатости; $\omega_j^{(out)} = 1,05 / (1 + 0,02 Q_\Sigma / Q_j^{(out)})$ – коэффициент устойчивости; $Q_s^{(in)}$ – расход воздуха, притекающий в сопряжение по ветви № s , $\text{м}^3/\text{с}$; $Q_j^{(out)}$ – расход воздуха, вытекающий из сопряжения по ветви № j , $\text{м}^3/\text{с}$; $V_s^{(in)}$ – скорость воздуха струи, притекающей в сопряжение по ветви № s , $\text{м}/\text{с}$; $V_j^{(out)}$ – скорость воздуха струи, вытекающей из сопряжения по ветви № j , $\text{м}^3/\text{с}$; Q_Σ – суммарный расход воздуха, протекающий через сопряжение, $\text{м}^3/\text{с}$; δ_{sj} – угол поворота потока между втекающей струей из ветви № s и вытекающей струей № j ; ρ – плотность воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$.

В работе проведен сравнительный анализ полученной формулы (1) с существующими в литературе зависимостями для определения местных аэродинамических сопро-

тивлений для единичных сопряжений горных выработок. На рис. 2 представлено сравнение для задачи о течении воздуха в сопряжении трех горных выработок под прямым углом. Графический анализ, представленный на рис. 2б, выполнен в безразмерных осях: относительный расход воздуха в боковом ответвлении — коэффициент местного сопротивления, определяемый по формуле

$$\xi = \frac{\Delta p}{\rho V_3^2 / 2}. \quad (2)$$

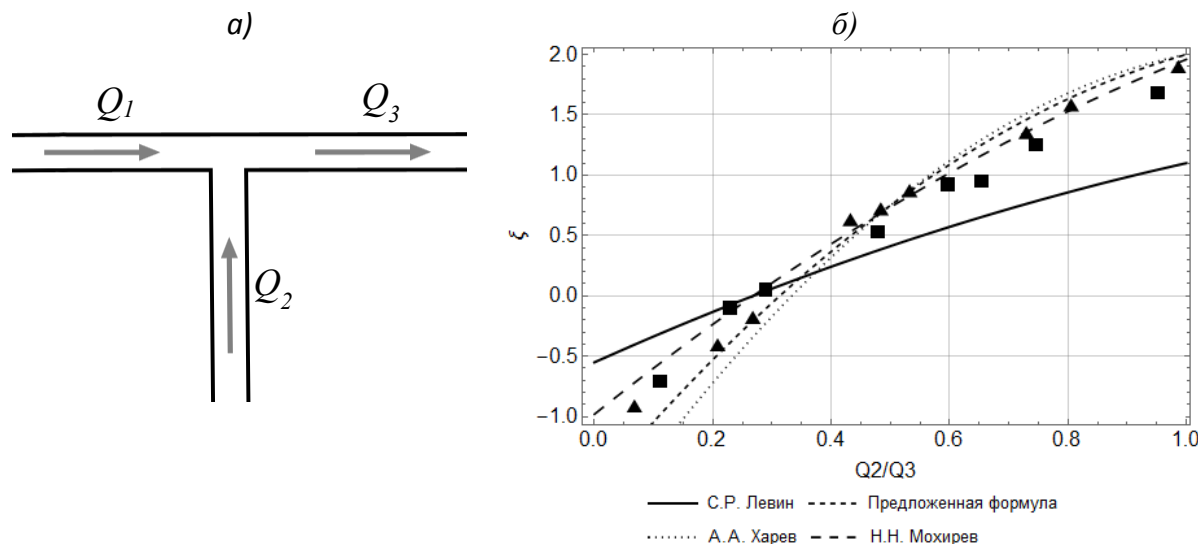


Рис. 3 – Сравнительная характеристика различных методов моделирования потери давления при слиянии потоков, направление 2 – 3

На основании проведенного сравнительного анализа с существующими моделями определения местных аэродинамических сопротивлений сделан вывод о том, что предложенная формула (1) имеет соответствие с моделями А.А. Харева [6], Н.Н. Мохирева [5], С.Р. Левина [9], а также с результатами натуральных экспериментов, выполненных в работе Л.М. Веденеевой [10] для сопряжений трех выработок в калийных рудниках.

Формула (1) использована для численного решения задачи воздухораспределения в вентиляционных сетях рудников и интегрирована в метод контурных расходов [4, 11]. Численный алгоритм реализован в виде программного модуля в «Аналитической программе «АэроСеть», разрабатываемой в Горном институте УрО РАН.

Исследование субъективных факторов

Экспериментальные исследования изменения воздухораспределения в калийных рудниках при реверсировании ГВУ и сопоставление их результатов с результатами теоретического моделирования позволили выделить ряд причин, из-за которых усиливается влияние субъективных факторов на изменение сопротивления рудника:

1. Отсутствие/неисправность датчиков открытия ляд в канале ГВУ.
2. Плохая герметизация ляд канала ГВУ и вентиляционных окон в канале ГВУ.
3. Несимметричность аэродинамического сопротивления перемычек в вентиляционных сбойках при смене направления потока.
4. Изменение рабочих параметров вентиляционных дверей при смене направления потока, вызванное изменением градиента давления.

На основании выделенных причин предлагаются следующие универсальные мероприятия по обеспечению нормативно-допустимых величин утечек в реверсивном режиме работы ГВУ:

1. Установка и систематический контроль состояния датчиков открытия/закрытия ляд в канале ГВУ. Запрет на реверсирование ГВУ до момента срабатывания датчиков открытия реверсивных ляд.

2. Герметизация ляд канала ГВУ. Для достижения плотного прилегания ляд к стенкам канала рекомендуется использовать резиновые прокладки и самоуплотняющиеся ляды со скосом кромки под углом, меньшим 90° . Также рекомендуется проводить контроль коррозии металлических частей конструкции ляд.

3. Датчики давления, устанавливаемые в канале ГВУ на входе и выходе из вентилятора, должны периодически очищаться от соляной пыли, оседающей и налипающей на трубки Пито-Прандтля, а поправочные коэффициенты — периодически калиброваться. Поправочные коэффициенты для реверсивного режима проветривания в общем случае отличаются от коэффициентов для нормального режима проветривания и должны калиброваться отдельно.

4. Строительство двойных перемычек с дверями, открывающимися в противоположные стороны. Наличие четного количества перемычек обеспечивает наилучшую симметрию аэродинамического сопротивления сбойки при реверсировании воздушной струи.

5. Конструкция дверных перемычек должна представлять собой два ряда досок с прокладкой между ними слоя толя или конвейерной ленты. Для достижения плотного прилегания двери к раме необходимо использовать резиновые прокладки.

6. При установке автоматических вентиляционных дверей (АВД) следует проверять изменение их аэродинамического сопротивления при реверсировании воздушного потока. Данная проверка необходима по причине наличия люфта в подшипниках жалюзийных створок АВД.

7. При проведении плановых процедур по реверсированию ГВУ требуется определять фактические значения утечек воздуха через надшахтное здание, ляды ГВУ и интегральную величину утечек по каждому из главных направлений рудника в реверсивном режиме проветривания. Полученные данные необходимо использовать при расчете воздухораспределения.

Сформулированные мероприятия позволят снизить нежелательные утечки через надшахтное здание, ляды ГВУ, вентиляционные сбойки главных направлений до нормативно допустимых значений. В результате количество утечек в реверсивном режиме проветривания не должно отличаться от количества утечек в нормальном режиме проветривания.

Литература

1. Алыменко Н.И. О выборе рациональных аэродинамических параметров вентиляционных каналов главной вентиляторной установки / Н.И. Алыменко // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2011. — № 6. — С. 93 — 102.

2. Газизуллин Р.Р. Влияние местных сопротивлений на воздухораспределение в рудниках при реверсивном режиме работы главной вентиляторной установки / Р.Р. Газизуллин, Л.Ю. Левин, А.В. Зайцев // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2012. — № 5. — С. 227 — 230.

3. Казаков Б.П. Структурно-классификационный анализ рудничных вентиляционных сетей по типам протекающих в них аэрологических процессов / Б.П. Казаков // Сборник докладов ежегодной научной сессии Горного института УрО РАН. — 2009. — С. 192 — 194.

4. Левин Л.Ю. Численное моделирование изменения воздухораспределения в рудничных вентиляционных сетях при реверсировании главной вентиляторной установки / Л.Ю. Левин, М.А. Семин, Р.Р. Газизуллин // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2015. — № 12. — С. 164 — 170.

5. Мохирев Н.Н. Инженерные расчеты вентиляции шахт. Строительство. Реконструкция. Эксплуатация / Н.Н. Мохирев, В.В. Радько. — М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2007. — 324 с.
6. Харев А.А. Местные сопротивления шахтных вентиляционных сетей / А.А. Харев. — М.: Углетехиздат, 1954. — 248 с.
7. Шалимов А.В. Теоретические основы прогнозирования, профилактики и борьбы с аварийными нарушениями проветривания рудников: дис. ... докт. техн. наук / А.В. Шалимов. — Пермь, 2012. - С 32 - 45.
8. Левин Л.Ю. Экспериментальное исследование изменения воздухораспределения на калийных рудниках при реверсировании главной вентиляторной установки / Л.Ю. Левин, М.А. Семин, Ю.А. Ключкин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. — 2015. — № 17. — С. 89 — 97.
9. Левин С.Р. Сопротивление тройников вытяжных воздухопроводов. Отопление и вентиляция / С.Р. Левин. — 1940. - № 10 — 11.
10. Веденева Л.М. Исследование аэродинамических процессов в местных сопротивлениях и их влияния на воздухораспределение в вентиляционных сетях с большим эквивалентным отверстием: автореф. ... дис. канд. техн. наук / Л.М. Веденева. — Пермь, 1995. — 17 с.
11. Абрамов Ф.А. Расчет вентиляционных сетей шахт и рудников / Ф.А. Абрамов, Р.Б. Тян, В.Я. Потемкин. - М.: Недра, 1978. — 232 с.