Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. XXXIX, вып. 1, 1959 г.

ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ СЛОЖНЫХ РУДНИЧНЫХ ВОЗДУХОПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ

С. С. Смородин

Рудничные воздухопроводы называются сложными, когда сеть сильно разветвлена и имеет большое количество разнообразных потребителей сжатого воздуха. В отличие от таких сетей в промышленности существуют простые сети, когда от генератора проложена магистраль часто постоянного диаметра, по которой подводится энергия сжатого воздуха к одному, двум-трем однородным потребителям.

Экономические показатели работы воздушно-силового хозяйства, а также эффективность ведения отбойки угля и буровых работ в огромной степени зависят от состояния воздухопроводной сети. Пневмосеть должна обеспечивать передачу определенного количества воздуха при заданном давлении у потребителей.

Существующие в практике проектирования методы расчета воздухопроводных сетей не обеспечивают решения этих вопросов.

Эксплуатация рудничных сетей протекает в сложных производственных условиях. В результате влияния горногеологических факторов (горного давления, пучения пород), небрежного ведения взрывных работ и часто вследствие низкого качества монтажа в воздухопроводах, особенно на участках, в лавах, забоях образуются многочисленные неплотности, через которые происходят утечки сжатого воздуха. По давно существующим, и видимо уже устаревшим, данным экономически целесообразными считаются потери воздуха до 10% от количества транспортируемого по трубопроводам. Фактическое состояние воздухопроводов на многих рудниках и угольных шахтах таково, что потери, по признанию производственников, доходят до 40%. В действительности при этом дело иногда обстоит еще хуже.

Утечки сами по себе наносят большой экономический ущерб горному предприятию. Изготовление каждого кубического метра воздуха (в переводе на свободный) обходится от 0,6 до 3 коп. На каждой угольной шахте, использующей пневматическую энергию (около 20% всех шахт СССР), и на любом руднике непроизводительные расходы средств, связанные с утечками воздуха, составляют десятки, сотни тысяч, а иногда и миллионы рублей.

Утечки воздуха, кроме того, часто приводят к большим косвенным, а следовательно, скрытым потерям, связанным с уменьшением производительности бурового и другого пневматического оборудования за счет понижения давления у потребителей. Этот вопрос до сего времени остается нераскрытым для большинства производственников. Обычно считают, что рост утечек легко компенсировать увеличением производительности компрессорной станции при том же заданном давлении. Как видно на рис. 1, при таком решении давление у приемников уменьшается по мере увеличения утечки, независимо от количественной их компенсации.

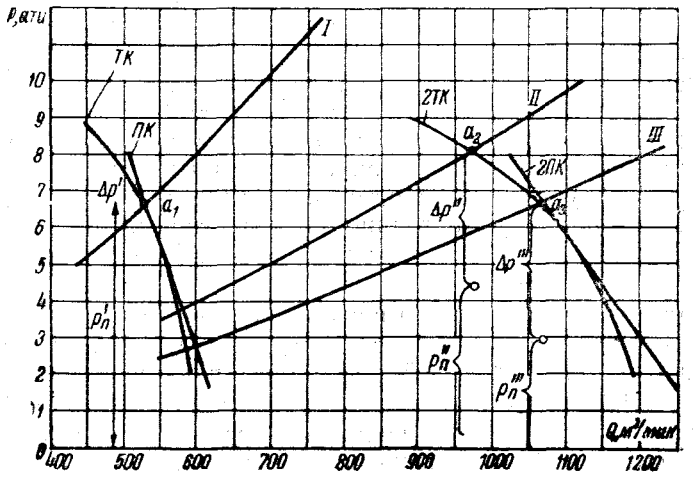


Рис. 1. Сопоставление характеристик компрессоров и воздухопроводных сетей

Характеристика: *ТК* — индивидуальная турбокомпрессора; *ПК* — суммарная поршневых компрессоров; *2ТК* — двух параллельно включенных турбокомпрессоров; *2ПК* — суммарная удвоенного (по сравнению с *ПК*) числа параллельно включенных поршневых компрессоров.

Характеристика воздухопровода при утечках: *I* — малых; *II* — больших; *III* — очень больших

Рассмотрим пример работы турбокомпрессора *ТК* или поршневых компрессоров *ПК* на рудничную сеть, характеристика которой с минимальными потерями изображена кривой *I* (рис. 1). При этом в точке рабочего режима a_1 давление у компрессора 6,7 *ати*. Предположим, что потеря давления в сети $\Delta p' = 1{,}2$ *кг/см*^{2}, тогда среднее давление у приемников $p' = 5{,}5$ *ати*.

При увеличении утечек характеристика трубопровода изменяется за счет уменьшения сопротивлений, и точка рабочего режима компрессора перемещается вниз. С понижением давления у компрессора до какого-то минимума включается второй турбокомпрессор, тогда давление возрастает, предположим, до величины 8 *ати*, которая является часто предельной вблизи точки помпажа.

Режим параллельной работы двух компрессоров (характеристика *2ТК*) на сеть с характеристикой *II* будет определяться точкой a_2. Предположим, что это соответствует увеличению расхода воздуха на 80%, тогда потеря давления $\Delta p''$ возрастет более чем в 3 раза, а давление в забоях снизится до 4,4 *ати*. Так как, вероятно, не все утечки произойдут в конце сети, то в среднем скорость может возрасти несколько

меньше и потери давления в зависимости от этого могут увеличиться в несколько меньшей степени от увеличения расхода. Однако в большинстве случаев давление в забое будет понижаться. При дальнейшем увеличении расхода давление в компрессорной может стать равным первоначальному, однако рабочий режим в точке a_3 на характеристику сети *III* создает резко ухудшенные условия работы потребителей сжатого воздуха с весьма пониженным давлением.

Примерно та же картина будет наблюдаться и при работе поршневых компрессоров. При наличии характеристики сети *II* двойное количество поршневых компрессоров вообще не имеет точки рабочего режима, это значит, что часть из них будет автоматически (при 8 *ати*) переходить на режим холостого хода. Предсказать величину понижения давления расчетным путем невозможно, так как места появления и размеры утечек неопределенны.

Существуют и другие факторы, обусловливающие необходимость периодических испытаний воздухопроводных сетей. Важнейшим из них является величина гидравлического сопротивления воздухопроводной сети. Современное решение вопроса о величине гидравлических сопротивлений труб основывается на статистической теории турбулентности, созданной в последние десятилетия советскими учеными (А. Н. Колмогоровым [1], М. А. Великановым [2], М. Г. Лойцянским [3] и др.).

Этому вопросу посвящено много теоретических и экспериментальных работ, из которых следует, что существующие методы расчета рудничных воздухопроводных сетей, основанные на экспериментальных работах Фриче [4], устарели.

Величина коэффициента гидравлического сопротивления зависит от характера потока и шероховатости стенок трубопровода, которая сама меняется со временем по-разному для разных жидкостей и газов. В реально существующих трубопроводах сопротивление движению сжатого воздуха определяется не только гидравлическим сопротивлением стенок трубы, но и типом соединений на стыках элементов труб (сварных, фланцевых и муфтовых), и качеством монтажа (соосностью труб, качеством прокладок, обработкой стыковых заусенцев и др.), не говоря уже о случайных сопротивлениях.

Все это свидетельствует о необходимости проведения периодических испытаний рудничных воздухопроводных сетей. Цель промышленных испытаний воздухопроводов заключается в фактическом определении утечки сжатого воздуха через неплотности в трубах и потери давления при транспортировании воздуха от компрессорной до потребителей. Предложено несколько методов определения утечки сжатого воздуха в сетях, которые отличаются друг от друга оборудованием, измерительной аппаратурой, организацией работ и, конечно, точностью измерений.

Здесь мы имеем возможность произвести только краткий обзор этих методов с точки зрения соответствия их достижению поставленных целей при промышленных испытаниях.

Метод I. Определение утечки в закрытой сети с помощью специального поршневого компрессора, производительность которого регулируется изменением числа оборотов [5]. Перед испытанием участка или всей сети от нее отключаются все потребители и на концах металлического трубопровода ставятся заглушки. При испытании изменением числа оборотов компрессора достигается постоянство давления. Зафиксировав число оборотов при испытании, пересчитывают производительность ком-

прессора по номинальным значениям производительности и числа оборотов

$$Q_{ут} = Q_н \frac{n_{ут}}{n_н}, \qquad (1)$$

где $Q_{ут}$ — утечки воздуха в сети при заданном давлении, *м³/мин*;
$Q_н$ и $n_н$ — номинальные величины производительности и числа оборотов вала компрессора, измеренные при его испытании;
$n_{ут}$ — число оборотов вала компрессора, отвечающее постоянству заданного давления при испытании сети, об/мин.

Следовательно, этот метод сводится к определению утечек воздуха при одинаковом давлении во всех точках сети. Утечки в местах присоединений шлангов к металлическому трубопроводу и потребителю исключаются. Потеря давления при этом методе не может быть определена.

Метод II. Определение утечек с помощью воздухомера. Перед испытанием также отключаются все потребители и ставятся заглушки. В отличие от первого, испытание может производиться от любого компрессора без предварительного испытания последнего с целью выяснения его характеристики.

Воздухомер устанавливается в начале испытуемого участка сети и отсчет производится с момента установления постоянного давления. Компрессор должен быть регулируемым.

Этот метод также сводится к испытанию сети на герметичность. Утечки воздуха через неплотности в искусственно подготовленной сети замеряются при одинаковом давлении во всех ее точках. Потери давления не определяются.

Метод III. Определение утечек по перепаду давления в закрытой сети известной емкости. При подготовке к испытаниям определяют внутреннюю емкость испытуемой сети. Затем, как и в предыдущих случаях, отключают всех потребителей и ставят заглушки. Во время испытаний в сеть известной емкости накачивают воздух до давления несколько больше рабочего. Затем отключают компрессор и замеряют время, в течение которого давление будет падать от начального до конечного. Принимая истечение изотермическим, величину утечки воздуха определяют по формуле

$$Q_{ут} = 1{,}583 \frac{V_с}{T_0} \left(\frac{p_1 - p_2}{t} \right) 10^4 \frac{p_{раб}}{p_{ср}}, \qquad (2)$$

где $Q_{ут}$ — утечки воздуха (приведенные к 760 *мм* рт. ст. и к 0°С), *м³/мин*;
$V_с$ — геометрический (внутренний) объем испытуемой воздухопроводной сети, *м³*;
T_0 — абсолютная температура воздуха в сети, °К;
p_1 — начальное абсолютное давление в сети при испытании, *ата*;
p_2 — конечное абсолютное давление после утечки в сети, *ата*;
t — время испытания, в течение которого давление уменьшается от p_1 до p_1, *сек.*;
$p_{раб}$ — рабочее давление, *ата*;
$p_{ср}$ — среднее давление в сети при испытании, *ата*.

Принимая процесс истечения политропическим [6], при температуре наружного воздуха около воздухопровода $T_н \neq T_0$ находят показатель политропы

$$m = \frac{1}{T_н}(2T_0 - T_н).$$

Тогда утечки воздуха

$$Q_{ут} = 3{,}165 \frac{V_c p_{раб} \left[\left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{m-1}{2m}} - 1 \right]}{t \sqrt{T_0 T_н}(m-1)}. \quad (3)$$

Метод IV. Определение утечек с помощью диафрагмы или сопла, подключенного к закрытой сети. В начале испытуемой сети с помощью тройника подключают дополнительный короткий трубопровод с диафрагмой или соплом. Для определения утечек воздуха проводят две серии опытов. В первой серии от трех до пяти испытаний. В закрытую сеть при отключенных потребителях и отключенном сопле накачивают воздух до давления выше рабочего, затем замеряют время t_1, за которое абсолютное давление упадет от $p'_{нач}$ до $p'_{кон}$. Из этого опыта определяют коэффициент

$$K_1 = \frac{t_1}{\lg \frac{p'_{нач}}{p'_{кон}}}. \quad (4)$$

По нескольким опытам находят значение $K_{ср}$.

Вторая серия содержит также от 3 до 5 испытаний. В закрытую сеть накачивают воздух, затем, отключив компрессор, открывают выход воздуху из испытуемой сети через сопло в атмосферу и снова замеряют время t_2, в течение которого абсолютное давление падает от $p'_{нач}$ до $p'_{кон}$.

По полученным данным определяют второй коэффициент

$$K_2 = \frac{t_2}{\lg \frac{p'_{нач}}{p'_{кон}}}. \quad (5)$$

Из серии опытов находят $K_{2\,ср}$.

Утечки воздуха находят по формуле

$$Q_{ут} = \frac{18{,}288 \mu_2 F_2 p_{раб}}{\sqrt{T_0}} \frac{K_{2\,ср}}{K_{1ср} - K_{2ср}}, \quad (6)$$

где μ_2 — коэффициент расхода диафрагмы или сопла;

F_2 — площадь отверстия диафрагмы или сопла, $см^2$.

С помощью полученных экспериментальных данных можно определить объем воздухопроводной сети

$$V_c = 0{,}000508 \sqrt{T_0} \mu_2 F_2 \frac{K_{1\,ср} K_{2ср}}{K_{1ср} - K_{2ср}}. \quad (7)$$

Если объем воздухопроводной сети определен обмером или по схеме трубопроводов, тогда утечки воздуха могут быть вычислены по формуле (6) при введении в нее из выражения (7) значения V_c

$$Q_{ут} = 3{,}6 \cdot 10^4 \frac{V_c p_{раб}}{K_{1\,ср} T_0}. \quad (8)$$

Однако рассмотренные методы не отвечают поставленной цели. Главные их недостатки следующие.

1. Полный учет всех утечек при рабочем давлении воздуха невозможен. Необходимо искусственное создание закрытой сети, т. е. отключение всех потребителей и установка заглушек, при этом исключаются места временных соединений, где обычно происходят наибольшие утечки.

2. Давление в сети оказывается одинаковым — статическим во всех точках по ее длине. Действительный режим работы сети при эксплуатации характеризуется переменными величинами давления, скорости движения и температуры воздуха по длине трубопровода.

3. Определение потерь давления невозможно.

Полученные таким путем, т. е. при испытании на герметичность, данные о величине утечек не отражают истинного положения, поэтому на практике не получил распространения ни один из приведенных методов.

Нами разработан и предлагается новый метод промышленных испытаний воздухопроводных сетей в условиях нормальной эксплуатации.

Метод V. Определение утечек в сети при работе потребителей. В основу метода положены исследования характеристик потребителей сжатого воздуха [7]. На основании экспериментальных данных испытаний нескольких тысяч отбойных молотков и бурильных машин, проводившихся в течение 10 лет, выявлена единая закономерность расхода воздуха в зависимости от подведенного давления

$$Q_{пл} = 0{,}393 \alpha p_{пр}^{0{,}76}, \qquad (9)$$

где $Q_{пл}$ — полезный расход свободного воздуха одним потребителем, *м³/мин.*;

α — коэффициент, характеризующий конструкцию потребителя (коэффициент эквивалентности);

$p_{пр}$ — давление сжатого воздуха, подведенного к потребителю, *ати.*

Перед испытанием сети определяются характеристики всех потребителей данного участка или шахты, т. е. зависимость расхода воздуха от подводимого давления. Испытание потребителей производится при длине шланга 10 *м* с тщательным присоединением его к бурильной машине или другому потребителю. Характеристика потребителя выясняется измерением фактического расхода воздуха с помощью расходомера при любом давлении. По расходу определяется действительный коэффициент эквивалентности $\alpha_д$ из формулы (9). Измерение расхода целесообразно производить при разных давлениях и по ним определять средний коэффициент эквивалентности или пользоваться соответствующим коэффициентом при каждом давлении (если характеристика потребителя выпадает из общей закономерности).

Перед испытанием в начале испытуемой сети устанавливается диафрагма с подключенным к ней дифманометром (или с другим расходомером) для измерения суммарного количества воздуха, потребляемого шахтой или участком. Испытание сети производится при максимальном числе одновременно работающих потребителей, затем при уменьшенном, например, до $^3/_4$, $^1/_2$ и $^1/_4$ общего числа. При одновременной работе известного числа потребителей измеряется давление у приемников и расход воздуха в начале испытуемой сети при известном давлении и

температуре. О начале и конце испытаний подаются звуковые сигналы по трубопроводу. Давление у приемников удобно измерять малогабаритным манометром с иглой, вводимой в гибкий резиновый шланг.

Утечки воздуха определяют по формуле

$$Q_{ут} = Q_0 - 0{,}393\left(p_{пр1}^{0{,}76}\sum_{i=1}^{i=k}\alpha_{дi}n_i + p_{пр2}^{0{,}76}\sum_{i=1}^{i=k}\alpha_{дi}n_i\right), \qquad (10)$$

где Q_0 — расход воздуха в начале сети;

$\alpha_{дi}$ — опытные коэффициенты эквивалентности различных типов потребителей;

$p_{пр1}$ и $p_{пр2}$ — давление у потребителей на различных участках сети;

n_i — число однородных потребителей (с одинаковым коэффициентом эквивалентности).

Таким образом можно выяснить величину утечек при различном числе потребителей и построить график для каждого заданного давления в начале сети (рис. 2).

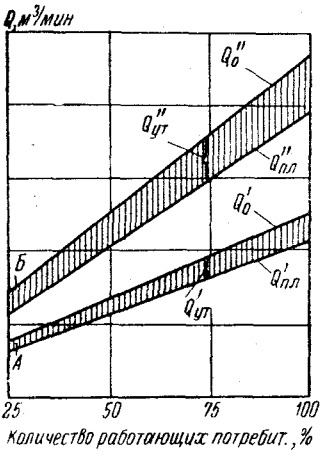


Рис. 2. Зависимость общего расхода, полезного расхода и утечек воздуха от числа работающих потребителей на участке сети при давлении:
$А - p_0'$; $Б - p_0'' > p_0'$

При давлении p_0' для расхода воздуха 100, 75% и т. д.

$$\left.\begin{aligned} Q'_{ут_{100}} &= Q'_{0_{100}} - Q'_{пл_{100}} \\ Q'_{ут_{75}} &= Q'_{0_{75}} - Q'_{пл_{75}} \end{aligned}\right\}. \qquad (11)$$

Утечки определяются ординатами между двумя кривыми Q_0' и $Q_{пл}'$ (см. рис. 2). При давлении p_0'' получим соответственно другие две кривые Q_0'' и $Q_{пл}''$, разность ординат которых также дает утечки в сети.

Применением нового метода можно установить оптимальные величины расходов воздуха для данного участка или шахты в целом и оценить утечки во время эксплуатации сети при любом числе работающих потребителей. Можно выявить фактическое состояние пневматического оборудования. Этот метод был применен при промышленных испытаниях сетей на подземных рудниках 3/6 и 7/9 Норильского комбината в 1955—1957 гг. [8]. На руднике 3/6 испытывался участок, где были обнаружены большие утечки в трубопроводах временной прокладки и гибких шлангах. На руднике 7/9 та же методика была применена при испытании сети только рудника 9.

Испытания позволили обнаружить огромное количество воздуха, выпускаемого из трубопроводов для проветривания. Старыми методами подобный перерасход обнаружить было невозможно.

Применение нового метода испытания рудничных воздухопроводных сетей с включенными потребителями сжатого воздуха на основе знания их характеристик дает возможность: 1) выяснить истинную картину работы сети и разобраться в сложных вопросах, связанных с обеспечением потребителей высококачественной пневматической энергией; 2) установить действенный контроль за расходованием сжатого воздуха и разработать мероприятия по борьбе за экономное его расходование.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Колмогоров А. Н. Статическая теория колебаний с непрерывным спектром. Юбилейный сб. АН СССР, 1947.
2. Великанов М. А. Динамика русловых пороков. Гидрометеоиздат, 1949.
3. Лойцянский М. Г. Механика жидкости и газа. Гостехтеоретиздат, 1957.
4. Герман А. П. Применение сжатого воздуха в горном деле Горногеолого-нефтяное изд-во, 1933.
5. Шемаханов М. М. Приборы и вопросы контроля рудничных пневматических установок. Углетехиздат, 1951.
6. Рогозкин Д. В. Испытания трубопроводов на герметичность. Юбилейный сб. научн. тр. (1930—1950) Московского ин-та цветных металлов и золота им. М. И. Калинина, 1950.
7. Смородин С. С. Исследование характеристик потребителей пневматической энергии. Зап. ЛГИ, 1957, т. XXXIV, вып. 1.
8. Смородин С. С. Обследование пневматического хозяйства рудников Норильского комбината. Рукопись. Фонды ЛГИ, 1955—1957.