

УДК 62-522:622.457.2:620.165.29

Губенко Д.И., магістр

(ГП «КБ «Южное» им. М.К. Янгеля»)

**СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ СНАБЖЕНИЯ СЖАТЫМ
ВОЗДУХОМ ШАХТНЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ
И НАПРАВЛЕНИЯ ЕЕ РЕШЕНИЯ****Губенко Д.И.**, магістр

(ДП «КБ «Південне» ім. М.К. Янгеля»)

**СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ ПОСТАЧАННЯ
СТИСНЕНОГО ПОВІТРЯ ШАХТНИМ СПОЖИВАЧАМ
І НАПРЯМКИ ЇЇ ВИРІШЕННЯ****Gubenko D.I.**, M.S. (Tech.)

(SE "Design Office "Yuzhnoye" by M.K. Yangel")

**CURRENT STATE OF THE PROBLEM OF COMPRESSED AIR SUPPLY
TO THE MINE CONSUMERS AND APPROACHES
TO SOLVING THE PROBLEM**

Аннотация. Выполнен анализ современного состояния проблемы снабжения пневмоэнергией шахтных потребителей. Рассмотрены основные факторы, влияющие на эффективность работы шахтного компрессорного хозяйства. Показано, что работоспособность сжатого воздуха при его транспортировании по шахтным пневматическим сетям значительно теряется за счет утечек, обусловленных негерметичностью сетей. Приведены основные характеристики шахтных пневматических сетей и потребителей сжатого воздуха. Оценено влияние утечек воздуха на эффективность снабжения пневматической энергией пневматического оборудования. Определены основные направления минимизации потерь пневматической энергии при транспортировании сжатого воздуха шахтным потребителям по шахтным пневматическим сетям, одним из которых является повышение степени герметичности магистральных и участковых трубопроводов подачи сжатого воздуха.

Ключевые слова: сжатый воздух, пневматическая энергия, утечка, шахтная пневматическая сеть, герметичность, работоспособность сжатого воздуха.

Ключевым моментом развития экономического сектора государства является проблема энергосбережения в наиболее энергоемких сферах производства, к которым относятся предприятия горнодобывающей отрасли. Как и во многих отраслях промышленности, при добыче полезных ископаемых наряду с электрической широко используется пневматическая энергия. Сжатый воздух является одним из основных видов энергии на шахтах и рудниках для приведения в действие бурильных, бурсобоечных, добычных, проходческих и погрузочных машин, вентиляторов местного проветривания, насосов, а также в эрлифтных установках при откачке воды и пульпы. Кроме этого, пневматическая энергия используется при пневматической закладке горных выработок, для приведения в действие толкателей, стопоров, затворов и других устройств технологического комплекса горнодобывающего предприятия [1 – 7].

Широкое применение пневматической энергии в горнодобывающей отрасли обусловлено высокой степенью безопасности пневматического оборудования, особенно для шахт, опасных по газу или пыли. В некоторых случаях использование сжатого воздуха является единственно возможным. Наиболее характерно это обстоятельство для шахт, обрабатывающих пласты крутого падения опасные по внезапным выбросам угля и газа, а также при бурении крепких пород на рудниках [2, 4 – 7].

На глубоких шахтах применение сжатого воздуха представляется актуальным также для улучшения санитарно-гигиенических условий в подземных выработках. Это связано с тем, что работающее пневматическое оборудование выбрасывает в выработку охлажденный отработанный воздух, снижая тем самым температуру и улучшая состав подземного воздуха [6].

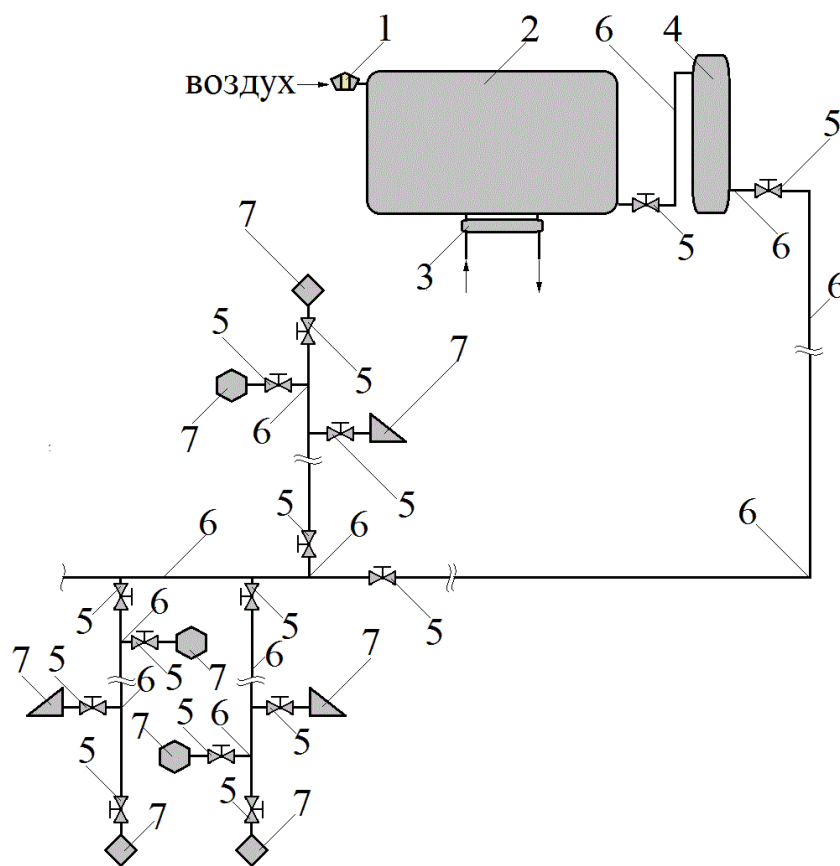
Удельный вес пневматической энергии в энергетическом балансе горных предприятий с подземным способом добычи полезных ископаемых составляет 20-30 % [2]. Несмотря на это и очевидные достоинства применения пневматической энергии, сжатый воздух является самым дорогим видом энергии, используемым в современной горной отрасли. Это обусловлено относительно невысоким коэффициентом полезного действия (КПД) компрессорных машин и значительными потерями сжатого воздуха в пневмосетях. Применение в пневмоприводе машин сжатого воздуха обходится в 7-10 раз дороже, чем при использовании электропривода. Доля затрат электроэнергии в себестоимости добычи от 5 % в 1990 году возросла в настоящее время до 18-20 % [8, 9].

Проблемам повышения эффективности применения пневматической энергии на предприятиях горнодобывающей отрасли посвящены работы А.В. Докукина, В.С. Соловьева, А. С. Смородина, В.А. Мурзина, Ю.А. Цейтлина, М.М. Федорова, Ю.Н. Миняева, А.П. Германа, Г.С. Хронусова, Д.Л. Гарбуза, Н. М. Баранникова, П. П. Фролова, Л.Л. Моисеева и многих других авторов. Среди отечественных предприятий, занимающихся проблемами эффективной эксплуатации шахтных компрессорных установок, следует отметить Научно-исследовательский институт горной механики имени М.М. Федорова.

Анализ энергогоемкости шахтного оборудования показывает, что стационарные установки, в том числе шахтные компрессорные станции, расходуют 50-80 % общешахтного потребления всей электрической энергии [6]. При этом более 80 % парка стационарных компрессоров полностью выработали свой ресурс, большое количество крупных компрессоров находится в эксплуатации более 25-30 лет, а их обновление и капитальный ремонт практически не производится [8, 9]. Необходимо также отметить, что по отношению к паспортным характеристикам стационарные шахтные компрессорные установки работают на большинстве предприятий при пониженной производительности и завышенном удельном расходе электроэнергии [10 – 12]. При этом, затраты на выработку сжатого воздуха центральными компрессорными станциями (ЦКС), например, на железорудных шахтах составляют более 30 % от всей потребляемой комбинатом электроэнергии [11, 12].

Компрессорное хозяйство шахты представляет собой разомкнутую пневмосистему, имеющую на входе компрессорную станцию, которая через разветвленную сеть трубопроводов снабжает сжатым воздухом шахтные потребители на выходе из сети. Потребители сжатого воздуха представляют собой пневматические машины различного технологического назначения.

На рисунке 1 представлена структурная схема компрессорного хозяйства, которая в общем случае характерна для каждого горнодобывающего предприятия [2]. Эта традиционная схема обеспечения сжатым воздухом всех шахтных потребителей предполагает устройство ЦКС, расположенной на дневной поверхности как можно ближе к стволу шахты.



1 – воздушный фильтр; 2 – компрессорная станция; 3 – вспомогательное оборудование (охлаждители воздуха, воды и др.); 4 – воздухосборник (ресивер); 5 – задвижки; 6 – воздухопроводы; 7 – шахтные потребители сжатого воздуха (перфораторы, пневмодвигатели и др.)

Рисунок 1 – Структурная схема компрессорного хозяйства горнодобывающего предприятия

Сжатый воздух ЦКС транспортируется по трубопроводам к шахтным потребителям (к забоям шахт) на расстояние до нескольких километров. На шахтах, разрабатывающих крутые и крутонаклонные пласты Донбасса, общая протяжённость сети может достигать десятков километров. Шахтная пневматическая сеть включает в себя (см. рис. 1) магистральный и распределительный трубопроводы, а также специальную арматуру: запорные задвижки, линейные воз-

духосборники, влагомаслоотделители, тепловые линзовые и сальниковые конденсаторы и др. Такая протяженность и конфигурация пневматической сети обуславливает значительные потери энергии сжатого воздуха при его транспортировке. В результате (с учётом всех потерь) КПД пневматического привода на горнодобывающих предприятиях составляет всего 8 – 10 % [6].

При разработке пневматической сети шахты необходимо учитывать следующие требования [6]:

1) трубопровод, идущий от ЦКС на основной горизонт, состоит не менее чем из двух самостоятельных ставов, каждый из которых рассчитывается на транспортировку половины производительности станции, на этих участках трубопровода предусматривается устройство тепловых конденсаторов через каждые 150 – 200 м;

2) в местах разветвления трубопровода (узловых точках сети) в горных выработках и в пунктах потребления воздуха устанавливаются линейные воздухоотборники небольшого объёма (1 – 1,5 м³), служащие маслоотделителями;

3) на выходе трубопровода из узловых точек устанавливаются запорные задвижки, позволяющие отключить любой участок для производства ремонтно-профилактических работ;

4) при больших длинах участков в них через каждые 400 – 500 м устанавливаются маслоотделители.

Увеличение глубины разработки месторождений полезных ископаемых, развитие комплексной механизации и автоматизации технологических процессов горного дела вызывает увеличение протяженности шахтных пневмокоммуникаций. В свою очередь это приводит к росту потерь энергии сжатого воздуха при его транспортировании, что значительно снижает эффективность работы пневматического оборудования.

Местом наибольших потерь энергии сжатого воздуха являются шахтные пневматические сети, учитывая их протяженность и изношенность. В пневмосетях потери сжатого воздуха могут достигать 60 – 70 % [5, 8], а применяемые меры по их уменьшению не обеспечивают существенного снижения производственных потерь электроэнергии. Общий КПД пневмосистем на многих шахтах составляет менее 6 % [8], что делает вопросы повышения надежности пневмоснабжения для увеличения темпов добычи полезного ископаемого и экономии энергоресурсов актуальной задачей энергосбережения [9].

Еще одним аспектом задач энергосбережения является то, что при несоблюдении правил эксплуатации пневматического оборудования, утечки сжатого воздуха могут составлять 25 – 30 % от общего расхода воздуха. Помимо этого, потери пневматической энергии возникают в зазорах цилиндров, золотников, клапанов и кранов пневматических молотков и другого оборудования, несвоевременный и некачественный ремонт которого обуславливает рост утечек воздуха до 50 – 60 % от его общего расхода пневматической энергии [13 – 15].

Характеристика внешней сети пневматической установки, выполненная с учетом сжимаемости транспортируемого воздуха и с учетом потребителей сжатого воздуха, приведена на рис. 2. Эта характеристика в координатах давления

$P_{\text{ком}}$ (на выходе из компрессора) и количество свободного воздуха $Q_{\text{св}}$, полученные в предположении герметичности трубопроводов, представляют собой сложную кривую как совокупность характеристик потребителей $P_{\text{пот}}$ и потерь давления ΔP при движении сжатого воздуха по трубопроводам [2].

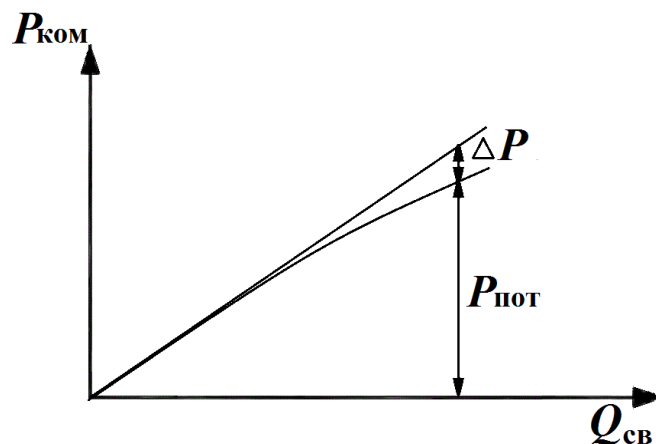


Рисунок 2 – Теоретическая характеристика внешней сети пневматической установки для герметичного трубопровода

Из зависимостей, приведенных на рис. 2. видно, что эффективность работы шахтного пневматического оборудования определяется падением давления при транспортировании сжатого воздуха ΔP , которое зависит как от длины воздухоподающих трубопроводов, так и от их герметичности.

Еще одной характерной особенностью снабжения шахтных потребителей сжатым воздухом является то, что потребляемый ими расход воздуха не является постоянной величиной, так как включение этих потребителей происходит не одновременно и режим их работы изменяется во времени. Колебания расхода воздуха вызывают изменение давления подаваемой пневматической энергии, которое распространяется на воздухоподающие магистрали и оказывает влияние на работу подключенного пневматического оборудования.

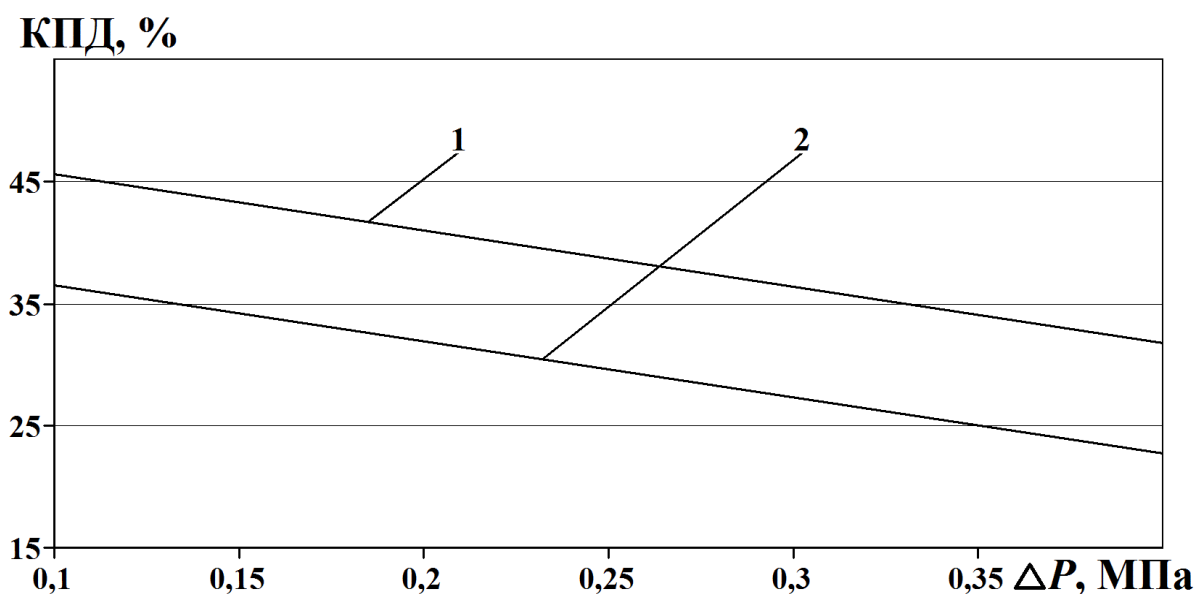
Тип и число компрессоров для снабжения шахтных потребителей пневматической энергией, как правило, выбирают на основании необходимого количества сжатого воздуха. При этом для бесперебойной работы пневмомеханизмов необходимо, чтобы резерв сжатого воздуха составлял не менее 50 % потребляемого [2, 6, 10].

Воздухосборники обычно устанавливаются вблизи компрессорной установки на расстоянии не менее 2,5 м (см. рис.1). Параметры воздухопроводов сжатого воздуха (см. рис. 1) рассчитываются по допустимым потерям на отдельных участках с учетом общих допустимых потерь 0,2 МПа, так как номинальное давление большинства воздухоприемников составляет 0,5 МПа, а давление на выходе компрессорной станции 0,7 МПа. Воздухопроводы состоят из магистрального, группового и участкового трубопроводов, а также подвода к воздухоприемнику с помощью гибкого шланга. Потери давления в таких шлангах принимаются, как правило, равными 0,05 МПа. Общие потери в магистраль-

ном, групповом и участковом трубопроводах не должны превышать 0,15 МПа. При этом, потери давления в участковом воздухопроводе не должны превышать 0,08 МПа, а нормальная работа пневматических машин и инструментов обеспечивается при условии давления сжатого воздуха в забое не ниже 0,5 – 0,6 МПа [2, 4, 6].

Одним из основных факторов, определяющих величину утечек сжатого воздуха, является давление воздуха в шахтной сети воздухоподающих трубопроводов. Величина утечки сжатого воздуха через неплотности в фланцевых соединениях труб и в распределительных сетях в шахтных условиях принимается, обычно, прямо пропорциональной избыточному давлению транспортируемого воздуха [6]. Выполненные в этой работе расчеты показали, что при начальных параметрах сжатого воздуха в шахтой пневмосети (давление 0,7 МПа и температура 333 К) и окружающей среды (давление 0,1 МПа и температура 300 К) КПД шахтной пневмосети (отношение полной работоспособности потока у пунктов потребления к работоспособности в начале сети) составляет (см. рис. 3):

- 1) при потере давления 0,1 МПа и относительном полезном расходе 0,5 – 45,6 %;
- 2) при потере давления 0,2 МПа и относительном полезном расходе 0,5 – 41 %;
- 3) при потере давления 0,1 МПа и относительном полезном расходе 0,4 – 36,5 %.



1 – относительный полезный расход 0,5; 2 – относительный полезный расход 0,4

Рисунок 3 – Зависимость КПД шахтной пневмосети от падения в ней давления сжатого воздуха для потерь расхода воздуха 50 % (1) и 60 % (2)

Данные, приведенные на рис. 3, показывают, что при увеличении потерь давления от 0,1 МПа до 0,2 МПа КПД пневмосети уменьшается на 4,6 %

(с 45,6 % до 41 %), а при увеличении на 10 % (с 50 % до 60 %) утечек сжатого воздуха в пневмосети их КПД уменьшается на 9,1 % (с 45,6 % до 36,5 %).

Работа основной массы технологического оборудования прямо зависит от параметров сжатого воздуха, которые непосредственно влияют на производительность этого оборудования. Например, увеличение давления сжатого воздуха, что возможно за счет сокращения утечек воздуха, на 0,1 МПа приводит к увеличению производительности бурения в среднем более чем на 20 %. При этом более чем в 1,5 раза уменьшается удельный расход сжатого воздуха. И, наоборот, снижение давления в забоях ниже номинального приводит к резкому ухудшению показателей работы пневматических механизмов [6, 10].

Таким образом, состояние шахтных воздухопроводов и пневмоустановок на действующих горнодобывающих предприятиях вызывает необходимость осуществления конкретных мер, направленных на сокращение прямых энергозатрат и снижение материально-технических ресурсов при использовании сжатого воздуха. В настоящее время непроизводственные затраты на обеспечение сжатым воздухом шахтных потребителей составляют достаточно большой объем и проблема их снижения является чрезвычайно актуальной, учитывая рост цен на энергоносители.

Сжатый воздух, вырабатываемый шахтными компрессорными станциями, поступает к пневмоприводам горных машин и механизмов, а также к другим потребителям пневматической энергии по шахтным пневматическим сетям. Основными элементами этих сетей являются магистральные и распределительные трубопроводы (см. рис. 1).

Магистральный трубопровод обычно монтируется из стальных труб общего назначения, условный диаметр которых варьируется в диапазоне от 50 до 400 мм, с применением сварного или фланцевого метода соединений [6 – 10].

Наиболее высокая герметичность и наименьшее сопротивление трубопровода обеспечивается при сварном соединении секций трубопроводов, однако применение сварных соединений возможно при условии безопасности ведения сварочных работ.

В шахтах, опасных по газу и пыли, применяются фланцевые соединения труб с использованием в качестве уплотнения фланцевых соединений прокладок из специальной твердой масло- и теплостойкой резины.

Распределительная сеть монтируется частично из стальных труб общего назначения, а частично - из гибких резиновых или резинотканевых шлангов. Эта сеть служит для подвода сжатого воздуха от магистрального трубопровода к потребителям подготовительных и добычных участков.

В реальных условиях ведения горных работ происходит деформация крепи выработок, на которой монтируются трубы, что приводит к значительному нарушению герметичности соединений трубопроводов. Динамика ведения горных работ вызывает непрерывное изменение топологии пневмосети и параметров её отдельных участков во времени. Вследствие этого на действующих горнодобывающих предприятиях пневматические сети являются местом наибольших потерь энергии при транспортировании сжатого воздуха. Это обстоятельство вы-

зывает необходимость систематического контроля состояния шахтной пневмосети для своевременного обнаружения и устранения утечек сжатого воздуха при нарушении герметичности труб и их соединений.

На горнодобывающих предприятиях сжатый воздух используется тремя основными группами потребителей [6]:

1) объёмные пневмодвигатели приводов горных машин и механизмов, выемочных комплексов, добычных и проходческих комбайнов, стругов, породопогрузочных машин, конвейеров, лебёдок, бурильных и отбойных молотков, толкателей, вибраторов и др.;

2) турбинные пневмомоторы приводов осевых вентиляторов местного проветривания, некоторых типов маломощных насосов специального назначения и электрогенераторов местного освещения;

3) бесприводные потребители, к которым относятся эжекторы, эрлифты, монжусные насосы, пневматические баллоны (крепи, костры, перемычки и др.), а также установки для пневмотранспорта, закладки и т.п.

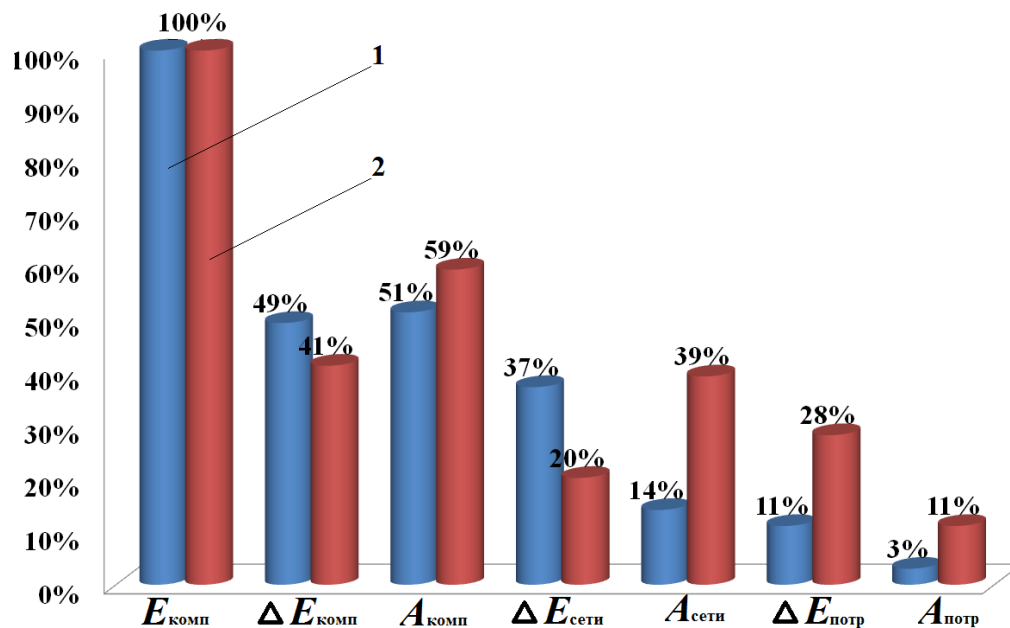
Наиболее широко в горнодобывающей промышленности используются объёмные пневмодвигатели: поршневые - в качестве приводов породопогрузочных машин, лебёдок, элементов буровой техники и т.п.; шестеренные - для привода забойных машин, комбайнов, элементов угледобывающих комплексов, щитовых агрегатов и др.; пластинчатые - для привода ручного инструмента [6].

Характеристики пневматической энергии, используемой пневмодвигателями горных машин и механизмов, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Пневматическая энергия пневмодвигателей горных машин и механизмов

Пневмодвигатели		Избыточное давление воздуха на входе, МПа	Номинальный удельный расход воздуха, м ³ /кВт	Расход воздуха, м ³ /мин
Объёмные	Поршневые		0,4 – 0,5	65 – 78
	Шестеренные	с прямыми и косыми зубьями	0,3 – 0,4	52 – 85
		с шевронными зубьями	0,3 – 0,4	53 – 61
	Пластинчатые (пневмолоток ПМ-610)		0,5	–
Турбинные пневмомоторы (вентилятор ВП-5)		0,5	–	5

Учитывая то, что пневматическая энергия является одним из самых дорогих видов энергии, используемых в горнодобывающей промышленности, вопрос повышения эффективности шахтных пневмоустановок в настоящее время чрезвычайно актуален. На рис. 4 представлена усреднённая энергетическая гистограмма шахтной пневматической установки при удовлетворительном и хорошем состоянии её элементов.



1 – удовлетворительное состояние шахтной пневматической установки;
 2 – хорошее состояние шахтной пневматической установки

Рисунок 4 – Усреднённая энергетическая гистограмма шахтной пневматической установки

На гистограмме, приведенной на рис. 4, приняты следующие обозначения: $E_{\text{комп}}$ – энергия компрессорной станции на выработку сжатого воздуха; $\Delta E_{\text{комп}}$ – потери энергии в компрессорной станции; $A_{\text{комп}}$ – работоспособность компрессорной станции; $\Delta E_{\text{сети}}$ – потери энергии при транспортировании сжатого воздуха; $A_{\text{сети}}$ – работоспособность сжатого воздуха на входе в потребители; $\Delta E_{\text{потр}}$ – потери энергии в потребителях; $A_{\text{потр}}$ – полезная работа потребителей.

Из построенной на рис. 4 гистограммы следует:

1) Потери энергии в компрессорных станциях $\Delta E_{\text{комп}}$ могут составлять:

– около 50 % при удовлетворительном состоянии их элементов;

– около 40 % при хорошем состоянии их элементов и утилизации тепла для отопления производственных и бытовых помещений, стволов и т. п.

2) Работоспособность сжатого воздуха при его транспортировании теряется за счет утечек, которые составляют 60 % и более от подачи компрессорной станции.

При хорошем состоянии шахтной магистральной и распределительной сети утечки не превышают 25 % подачи компрессорной станции, в этом случае потери энергии при транспортировании воздуха могут быть снижены до 20%. КПД шахтной пневматической сети возможно увеличить [6] в 4 раза за счет:

– снижения потерь пневматической энергии в потребителях сжатого воздуха;

– оперативного контроля работы пневмосистемы, включающего в себя своевременное выявление утечек и других аварий, контроль давления сжатого воздуха у потребителей, оптимальное управление работой компрессорной станции и других элементов, включая пневмодвигатели.

Сделанный выше анализ современного состояния проблемы снабжения пневмоэнергией шахтных потребителей и основных факторов, влияющих на эффективность работы шахтного компрессорного хозяйства, показывает, что работоспособность сжатого воздуха при его транспортировании по шахтным пневматическим сетям значительно теряется за счет утечек, обусловленных негерметичностью сетей. В настоящее время данную проблему на горнодобывающих предприятиях решают, в основном, выявляя «шпируны», воспринимаемые на слух. Однако, как показывает практика, меры по уменьшению потерь сжатого воздуха не обеспечивают существенное снижение непроизводительных потерь пневматической энергии. В связи с этим необходимо разрабатывать технику и технологию систематического контроля состояния шахтной пневмосети для своевременного обнаружения и устранения утечек сжатого воздуха при нарушении герметичности труб и их соединений.

В настоящее время существуют разные методы и способы контроля герметичности полых объектов, которые можно применить на предприятиях отрасли. Наиболее распространенный метод оперативного контроля герметичности полых объектов, в том числе шахтных пневматических сетей, – манометрический метод или метод «спада давления», основанный на определении спада давления контрольного газа за единицу времени [16, 17].

Основной недостаток данного метода – существенные погрешности, вызванные влиянием градиентов параметров окружающей среды на результаты определения утечек контрольного газа.

Для решения проблемы оценки степени негерметичности шахтных трубопроводов и повышения эффективности их использования ИГТМ НАН Украины совместно с НИЦ «Экология-Геос» созданы техника и технология контроля герметичности элементов шахтных пневматических сетей, в частности, трубопроводов подачи сжатого воздуха. В основе выполненных работ – метод фиксированных объемов, в котором герметичность контролируется в закрытом объеме термостата с размещением в нем компенсационной и эталонной емкостей одинакового объема и дифференциального датчика давления [18 – 19]. Внешний вид устройства контроля герметичности, разработанного по методу фиксированных объемов (УКГФ), представлен на рис. 5.

Вся контрольно-измерительная аппаратура, входящая в состав УКГФ прошла входной метрологический контроль в Национальном научном центре «Институт метрологии», а само устройство и технология его применения прошли промышленную апробацию на изделиях Производственного объединения «Южный машиностроительный завод» при проведении сравнительных испытаний с использованием масс-спектрометрического (гелиевого) метода.

Применение УКГФ и технологии контроля герметичности с использованием УКГФ на предприятиях горнодобывающей отрасли позволит оценить степень герметичности как магистральных и участковых трубопроводов подачи сжатого воздуха, так и воздушных ресиверов, задвижек и других элементов шахтных пневматических сетей. Это даст возможность выполнить соответствующие мероприятия по минимизации потерь пневматической энергии при транспортиро-

вании сжатого воздуха шахтным потребителям по шахтным пневматическим сетям.



1 – электронный блок измерения УКГФ; 2 – компьютерное обеспечение УКГФ;
3 – термостат с оборудованием УКГФ

Рисунок 5 – Внешний вид устройства контроля герметичности УКГФ

Выполненные исследования, результаты которых приведены на рис. 6, показывают, что при подаче в шахтную пневматическую сеть сжатого воздуха с давлением 0,7 – 0,9 МПа повышение степени суммарной негерметичности (Δ) сети на $100 \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$ позволяет повысить надежность (P) подачи сжатого воздуха шахтным потребителям до 20 % [20].

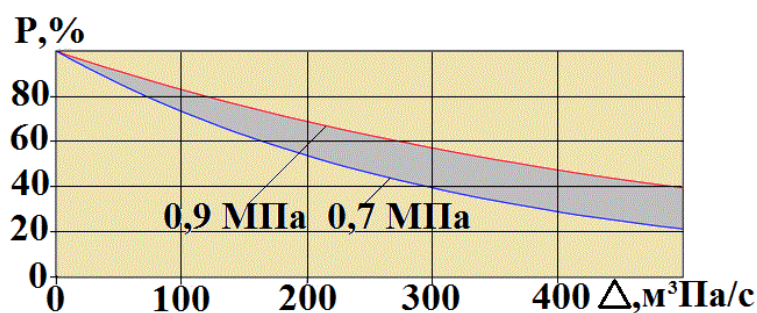


Рисунок 6 – Зависимость надежности воздухообеспечения шахтных потребителей от суммарной негерметичности шахтной пневматической сети.

Результаты изложенных исследований сводятся к следующему:

- снижение степени негерметичности элементов шахтных пневматических сетей приводит к понижению прямых энергозатрат и материально-технических ресурсов при использовании сжатого воздуха;
- вопросы контроля и обеспечения герметичности трубопроводов для транспортирования сжатого воздуха исследованы недостаточно;
- для минимизации потерь сжатого воздуха и повышения эффективности применения пневматической энергии необходима разработка новых методов

контроля степени негерметичности элементов шахтных пневматических сетей и регламентирующих документов по применению этих методов.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. AMSG, (2001), Compressed air systems market assessment. Public Service Electric and Gas Pacific Energy Associates, Final report. Edison, NJ, USA.
2. Соловьев, В.С. Стационарные машины и комплексы: Учебное пособие / В.С. Соловьев, А.С. Смородин. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет), 2002. – 88 с.
3. Joseph, B. Compressed air supply efficiency / B. Joseph // IETC, Houston, Southern California Edison, 2004. – pp. 124-129.
4. Воронецкий, А.В. Современные компрессорные станции / А.В. Воронецкий. – М.: Премиум Инжиниринг, 2009. – 445 с.
5. Saidur, R. A review on compressed-air energy use and energy savings / R.Saidur, N.A.Rahim, M. Hasanuzzaman // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2010. - Vol. 14, Issue 4, May, pp. 1135 – 1153.
6. Справочник горного инженера угольной шахты с крутым (крутонаклонным) залеганием пластов / С.С. Гребёнкин, С.В. Янко, В.Н. Павлыш [и др.]; под. общ. ред. С.В. Янко и С.С. Гребёнкина. – Донецк: ВИК, 2011. – 420 с.
7. О проблемах пневмоэнергетического комплекса шахт / Б.А.Грядущий, Г.В.Кирик, А.Н. Коваль [и др.] // Компрессорное и энергетическое машиностроение, №1(11). – 2008. – С. 2 –5.
8. Булат, А.Ф. Развитие научно-технических основ разработки и использования шахтного компрессорного оборудования / А.Ф. Булат, Б.В. Бокий, Г.В. Кирик // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць / Ін-т геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України. –Дніпропетровськ, 2014.– Вип.114.– С.3–18
9. Булат, А.Ф. Энергоэффективные компрессорные машины в процессах добычи угля и метана / А.Ф. Булат, Г.В. Кирик // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць / Ін-т геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України. – Дніпропетровськ, 2014.–Вип.115.– С.3–15.
10. Технология подземной разработки пластовых месторождений полезных ископаемых / В.И. Бондаренко, А.М. Кузьменко, Ю.Б. Грядущий [и др.]. – Днепропетровск: Полиграфист, 2002. – 730 с.
11. Миняев, Ю.Н. Обследование пневмохозяйства промышленных предприятий / Ю.Н. Миняев // Энергетика региона. – 2003. – № 2. – С. 15-17.
12. Основи енергозберігаючого керування електроенергетичними системами та комплексами / О. М. Сінчук, Н. Л. Федорченко, Л. Б. Литвинський [та ін.]. – Кременчук: ПП Щербатих О. В., 2010. – 340 с.
13. Кузнецов, Ю.В. Сжатый воздух / Ю.В. Кузнецов, М.Ю. Кузнецов. – Екатеринбург: УрО РАН, 2007. – 267 с.
14. Кумиров, Б.А. Расчет систем снабжения предприятий сжатым воздухом. Учебное пособие / Б.А. Кумиров, Р.Н. Валиев. – Казань: КГЭУ, 2003. – 99 с.
15. Молчанова, Р.А. Расчет систем воздуходобывания. Учебное пособие / Р.А. Молчанова. – Уфа: УГНТУ, 2003. – 60 с.
16. ОСТ 26.260.14-2001. Сосуды и аппараты, работающие под давлением. Способы контроля герметичности [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.atis-ars.ru/txt/docs/ОСТ/ОСТ_26.260.14-2001.doc. – Загл. с экрана.
17. Каневский, И.Н. Неразрушающие методы контроля: Учеб. пособие / И.Н. Каневский, Е.Н. Сальникова. Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2007. – 243 с.
18. Волошин, А. И. Основные достижения в области геотехнологий, систем трубопроводного пневмотранспорта, теплоэнергетики и контроля герметичности полых изделий / А. И. Волошин // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАНУ. – Днепропетровск, 2012. – Вып. 100. – С. 79–91.
19. Bulat, A. New-generation technique and technology for leakage tests / A. Bulat, O. Voloshyn, S. Ponomarenko, D. Gubenko // VII International scientific-practical conference «School Underground Mining»: Annual Scientific-Technical Collection «Mining of Mineral Deposits». – Netherlands: CRC Press/Balkema, 2013. – pp. 1–4.

20. Губенко, Д.И. Исследование зависимости надежности шахтной пневматической сети от утечек сжатого воздуха / Д.И. Губенко // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць / Ін-т геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України. –Дніпропетровськ, 2015.–Вип.121.– С. 194–200.

REFERENCES

1. AMSG, (2001), “Compressed air systems market assessment”, *Public Service Electric and Gas Pacific Energy Associates*, Final report, Edison, NJ, USA.
2. Solovyev, V.S. and Smorodin, A.S. (2002), *Statsionarnye mashiny i komplekсы: Uchebnoe posobie* [Stationary machines and complexes: Textbook], St. Petersburg State Mining Institute (Technical University), St. Petersburg, Russia.
3. Joseph, B. (2004), “Compressed air supply efficiency”, *IETC*, Houston, Southern California Edison, USA.
4. Voronetsky, A.V. (2009), *Sovremennye kompressornye stantsii* [Modern compressor stations], Premium Engineering, Moscow, Russia.
5. Saidur, R., Rahim, N.A., Hasanuzzaman, M. (2010), “A review on compressed-air energy use and energy savings”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, Issue 4, May, pp. 1135 – 1153.
6. Grebyenkin, S.S., Yanko, S.V., Pavlysh, V.N., Shirin, L.N., Kerkez, S.D., Ryabichev, V.D., Buzilo, V.I., Topchiy, S.E., Popov, S.O., Smorodin, G.M., Solovyev, G.I., Savchenko, I.V., Dyachkov, P.A., Popovskiy, V.N., Maevskiy, O.V. and Zenzerov, V.I. (2011), *Spravochnik gornogo inzhenera ugolnoy shakhty s krutym (krutonaklonnym) zaleganiem plastov* [Directory of mining engineer of coal mine with a steep (high-angle) formation of layers], VIK, Donetsk, Ukraine.
7. Gryaduschiy, B.A., Kirik, G.V. Koval, A.N., Loboda, V.V., Zharkov, P.E. and Lavrenko, AM (2008), “On the problems pneumoenergetic complex of mines”, *Compressor and power engineering*, no.1 (11), pp. 2 – 5.
8. Bulat, A.F., Bokiy, B.V. and Kirik, G.V. (2014), “Improvement of scientific and technological basis of development and use mine compressor equipment”, *Geo-Technical Mechanics*, no. 114, pp. 3 – 18.
9. Bulat, A.F. and Kirik, G.V. (2014), “Energy-efficient compressor machines in the process of coal mining and meth”, *Geo-Technical Mechanics*, no. 115, pp. 3 – 15.
10. Bondarenko, V.I., Kuzmenko, A.M., Gryadushchiy, Y.B., Kolokolov, O.V., Kharchenko, V.V., Tabachenko, N.M. and Pohepov, V.N. (2002), *Tekhnologiya podzemnoy razrabotki plastovykh mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh* [Technology of underground mining of mineral deposits], Polygraphist, Dnepropetrovsk, Ukraine.
11. Minyaev, Y.N. (2003), “Examination of pneumatic facilities industrial enterprises”, *Energy region*, no. 2, pp. 15 – 17.
12. Sinchuk, O.M., Fedorchenko, N.L., Litvinsky, L.B., Fedorchenko, K.I., Sinchuk, I.O. and Melnik, O.E. (2010), *Osnovy energozberigayuchogo keruvannya elektroenergetychnykh systemamy ta kompleksamy* [Basics of energy-saving control of electric power systems and complexes], Production Enterprise Shcherbatiykh, O.V., Kremenchug, Ukraine.
13. Kuznetsov, Yu.V. (2007), *Szhatyy vozdukh* [Compressed air], Ural Branch of RAI, Yekaterinburg, Russia.
14. Kumirov, B.A. and Valiev, R.N. (2003), *Raschet system snabzheniya predpriyatiy szhatym vozdukhom* [Calculation of systems the supply enterprises with compressed air: Textbook], KSPEU, Kazan, Russia.
15. Molchanova, P.A. (2003), *Raschet sistem vozdukhosnabzheniya. Uchebnoye posobiye* [The calculation of air supply systems: Textbook], UGNTU, Ufa, Russia.
16. State Mining and Technical Supervision Russia in the composition of its GD 26.260.010-2002 (2002), *26.260.14-2001:Sosudy i apparaty, rabotayushchie pod davleniem. Sposoby kontrolya germetichnosti. Otrazlevoy standart* [26.260.14-2001. Vessels and apparatus work under pressure. Control techniques the tightness. Industry Standard] available at: http://www.atis-ars.ru/txt/docs/OCT/OCT_26.260.14-2001.doc (Accessed 6 May 2015).
17. Kanevskiy, I.N. and Salnikova, E.N. (2007), *Nerazrushayushchie metody kontrolya. Uchebnoye posobiye* [Non-destructive methods of control: Textbook], Publishing house DVG TU, Vladivostok, Russia.
18. Voloshyn, O. I. (2012), “Basic achievements in area of geotechnologies, systems of pipeline of pneumatic transport's, thermal energy and control of impermeability of hollow wares *Geo-Technical Mechanics*, no.100, pp. 79 – 91.
19. Bulat, A., Voloshyn, O., Ponomarenko, S. and Gubenko, D. (2013), “New-generation technique and

technology for leakage tests", VII International scientific-practical conference "School Underground Mining", Annual Scientific-Technical Collection "Mining of Mineral Deposits", Netherlands, CRC Press / Balkema, pp. 1 – 4.

20. Gubenko, D.I. (2015), "Study of dependence between the mine pneumatic system reliability and compressed air leakages", *Geo-Technical Mechanics*, no.121, pp. 194 – 200.

Об авторе

Губенко Дмитрий Иванович, магистр, начальник СНИЛ-110, Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля» (ГКБ «Южное» им. М.К. Янгеля), Днепропетровск, Украина, di_gubenko@i.ua.

About the author

Gubenko Dmitry Ivanovich, Master of Sciences, head SRL-110, State Enterprise "Design Office " Yuzhnoye" by M.K. Yangel (SE "Design Office " Yuzhnoye " by M.K. Yangel), Dnepropetrovsk, Ukraine, di_gubenko@i.ua.

Анотація. Виконано аналіз сучасного стану проблеми постачання пневмоенергії шахтним споживачам. Розглянуто основні фактори, що впливають на ефективність роботи шахтного компресорного господарства. Показано, що працездатність стисненого повітря при його транспортуванні по шахтних пневматичних мережах значно втрачається за рахунок витоків, обумовлених негерметичністю мереж. Наведено основні характеристики шахтних пневматичних мереж і споживачів стисненого повітря. Оцінено вплив витоків повітря на ефективність постачання пневматичної енергії пневматичному устаткуванню. Визначено основні напрямки мінімізації втрат пневматичної енергії при транспортуванні стисненого повітря шахтним споживачам по шахтних пневматичних мережах, одним з яких є підвищення ступеня герметичності магістральних і дільничних трубопроводів подачі стисненого повітря.

Ключові слова: стиснене повітря, пневматична енергія, витік, шахтна пневматична мережа, герметичність, працездатність стисненого повітря.

Abstract. Current state of the problem of pneumatic power supply to the mine consumers is analyzed. The main factors influencing performance effectiveness of the mine compression facility are described. It is shown that the compressed air functionality during its transportation via the mine pneumatic networks is degraded greatly due to the leaky networks. Main characteristics of the mine pneumatic networks and consumers of compressed air are described. Influence of air leaks on efficiency of pneumatic energy supply to the pneumatic equipment is estimated. Basic approaches are specified which can minimize pneumatic energy losses during transportation of compressed air via the mine pneumatic networks to the mine customers; one of approaches is to increase leakproofness of the main and district compressed-air supply pipelines.

Keywords: compressed air, pneumatic energy, leak, mine pneumatic network, leaktightness, compressed air functionality.

Статья поступила в редакцию 30.09. 2015

Рекомендовано к публикации д-ром технических наук Шевченко В.Г.