



Опыт разработки и внедрения шахтного компрессорного оборудования

Разработаны методы расчета режимных параметров шахтных компрессорных установок. Разработано шахтное компрессорное оборудование и способы его применения в процессах добычи угля и метана. Приведены результаты использования шахтного компрессорного оборудования в процессах угледобычи. Показано, что увеличение метаноотдачи угольных пластов обеспечивается передвижными азотно-мембранными компрессорными станциями, обеспечивающими получение из атмосферного воздуха азота концентрацией от 90 до 99,5 % и его закачку в газонасыщенный углепородный массив, при этом протекающие диффузионные процессы сопровождаются замещением метана на молекулы закачиваемых газов, повышая тем самым степень извлечения метана при дегазации угольных пластов. Ил. 3. Табл. 3. Библиогр.: 6 назв.

Ключевые слова: шахтное компрессорное оборудование, процессы добычи угля и метана, методы расчета режимных параметров, увеличение метаноотдачи угольных пластов

Methods of calculation of regime parameters of mine compressor installations are developed. Mine compressor equipment and methods for its usage in processes of coal and methane mining are developed. The results of usage of coal mine compressor equipment in the process of coal mining are given. The increase of methane emission of coal bed is shown to be provided by mobile nitrogen membrane compressor stations securing the reception of air nitrogen concentration from 90 to 99,5 % and its injection into gas-saturated coal profundus array, herein all the diffusion processes are accompanied by replacement of methane molecules with injected gases, thereby increasing the degree of extraction of methane at degassing of coal seams.

Keywords: mining compressor equipment, processes coal and methane mining, calculation methods of regime parameters, increase methane emission of coal beds

Оптимизация пневмоэнергетического комплекса шахт путем совершенствования технологии производства сжатого воздуха и создания высокоэффективных подземных компрессорных станций оптимальной производительности для повышения надежности пневмоснабжения и экономии энергоресурсов является актуальной задачей энергосбережения. Установленные на поверхности шахт компрессорные станции из-за большой протяженности пневмосетей не обеспечивают подземные выработки сжатым воздухом требуемого качества. Пневматические установки на угольных шахтах крутого падения представляют собой крупные энергетические комплексы с мощными стационарными компрессорными

станциями, расположенными на поверхности и потребляющими до 70 % всей электроэнергии шахты. Транспортировка пневмоэнергии от этих станций к подземным потребителям производится по разветвленным трубопроводам большой протяженности. На отдельных шахтах протяженность разветвленной пневмосети достигает 35-50 км [1-3]. В табл. 1 приведены данные о парке компрессоров, эксплуатируемых на предприятиях угольной промышленности Украины, а также сведения о возможной их замене компрессорами отечественного производства. Из таблицы видно, что для полной замены существующего компрессорного парка стационарных компрессоров необходима поставка на шахты более 300 шт. УКВШ-15/7, и около 600 шт. ВВ-50/7 или ВВ-100/7.

Таблица 1. Состав парка компрессоров на предприятиях угольной промышленности Украины

Типы компрессоров, страна изготовитель	Производительность, м ³ /мин	Общее количество по типам, шт.	Марки винтовых компрессорных установок, применимых для замены
Турбокомпрессоры, Россия	135; 250; 500	187	ВВ-50/7; ВВ-100/8
Поршневые компрессоры, Россия, Германия	100	412	ВВ-50/7; УКВШ-15/7
Поршневые компрессоры, Украина, Россия	20-30; 50	132	УКВШ-15/7
Винтовые компрессоры, Россия	20-50	200	УКВШ-15/7
Винтовые компрессоры, Украина, Россия	5	1215	УКВШ-5/7

Возникает необходимость в совершенствовании методов расчета режимных и конструктивных параметров шахтного компрессорного оборудования и способов его применения при добыче угля и шахтного метана для повышения производительности, эффективности и безопасности подземных горных работ.

Разработаны методы расчета режимных параметров шахтных компрессорных установок [4]. Определены графики нагрузки на компрессорную станцию. Пневмосеть должна обеспечивать необходимое давление воздуха у всех потребителей. Каждый пневмоприемник обеспечивает нормальную работоспособность в заданном довольно узком диапазоне давлений от P_{min} до P_{max} . Если давление на входе в пневмоприемник $P < P_{min}$, то недопустимо падает его производительность, если же $P > P_{max}$, то имеет место бесполезная трата энергии. Например, повышение давления на 1 % приводит к перерасходу электроэнергии на 0,5 %.

Графики дают возможность судить об экономичности работы компрессорных станций, т. е. степени использования установленной мощности компрессоров, вычислив интегральное значение коэффициента использования:

$$\mu_{исп} = \frac{V_{факт}}{V_{уст} - V_{рез}},$$

где $V_{факт}$, $V_{уст}$, $V_{рез}$ - соответственно, фактическая, установленная и резервная нагрузка на компрессорную станцию.

Отражены особенности покрытия пиковых нагрузок при эксплуатации шахтных компрессорных установок. На наступление пикового режима система отреагирует следующим образом: требуемое повышение расхода будет обеспечиваться за счет вытекания воздуха из объема системы, при этом давление в системе будет падать. Если в начальный момент времени τ_0 давление в системе было равно P_0 , то через промежуток времени $\Delta\tau_n$ давление упадет до величины P_0 .

На рис. 1 приведен фрагмент графика приведенной к нормальным условиям нагрузки на компрессорную станцию, имеющую продолжительный «пиковый» режим, наступающий в некоторый момент времени τ_0 и длящийся в течение времени $\Delta\tau_n$. Амплитудное значение потребления воздуха достигает значения V_a . Превышение потребности воздуха над производительностью компрессорной станции за период $\Delta\tau_n$ равняется площади заштрихованной фигуры что соответствует массе воздуха, необходимой на покрытие пика

$$S_n = \int_{\tau} V_n dt, \text{ М}^3,$$

$$M_n = \rho_H S_n.$$

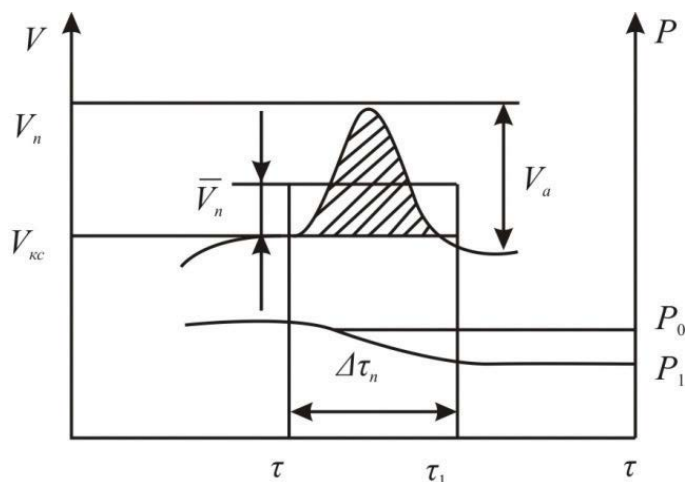


Рис. 1. График пиковой нагрузки на компрессорную станцию

Площадь S_n может быть заменена эквивалентной площадью прямоугольника $S_{эс} = \bar{V}_n \Delta\tau_n$, где \bar{V}_n ,

где \bar{V}_n - усредненное значение пиковой нагрузки на интервале $\Delta\tau_n$.

Изучены совмещение характеристик сети и компрессора. Сопротивление элементов сети в большинстве случаев пропорционально квадрату скорости (или расхода) газа, поэтому характеристика сети имеет вид квадратичной параболы. Особенностью объемных компрессоров является слабая зависимость производительности от давления нагнетания, т. е. уменьшение или увеличение потребления воздуха вызывает резкое увеличение или уменьшение давления нагнетания. При этом ограничениями являются максимально и минимально допустимые давления в сети.

Отражены особенности регулирования поршневых компрессоров путем перевода компрессора на холостой ход. Винтовые компрессоры ОАО «НПАО ВНИИкомпрессормаш» и ООО «МИКЭМ» оснащены системой регулирования обеспечивающей изменение производительности компрессора от 10 до 100 % путем автоматического перевода компрессора на холостой ход. Этот способ является ступенчатым регулированием. Если в данный момент времени дроссельная задвижка на всасывании в компрессор закрыта (что соответствует режиму холостого хода), то через некоторое время давление в сети сжатого воздуха упадет до минимально допустимого значения P_{min} и регулятор производительности даст импульс на пневмопривод, который, в свою очередь, откроет заслонку на всасывании. Давление в сети начнет возрастать, поскольку производительность компрессора несколько больше потребления сжатого воздуха. Основной характеристикой сети является ее объем, который складывается из объемов ресиверов, коллекторов, воздухопроводов, сепараторов, осушителей. Длительность циклов «нагнетание – холостой ход», а значит, и частота срабатывания регулирующей пневмосистемы прямо пропорционально зависят от объема сети q_v

$$\Delta \bar{t}_y = \frac{1}{q_v(1 - q_v)}$$

При большом объеме сети, характерном для угольных шахт, наполнение ее воздухом происходит в течение длительного периода, но частота циклов мала. При малом объеме сети частота увеличивается и отрицательно сказывается на надежности пневмоприборов системы. При очень малом объеме сети скорость срабатывания пневмоприборов может оказаться ниже требуемой, и система окажется неработоспособной.

Наиболее экономичный способ регулирования режима работы шахтных компрессорных установок является комбинированным, т. е. складывается из сочетания повторно-кратковременного режима «включение-выключение» и условно-непрерывного режима с переводом на холостой ход и обратно. Очевидно, что необходимо избегать как чрезмерно долгих фаз холостого хода, так и слишком коротких остановок. Остановить компрессор или перевести на холостой ход – зависит от продолжительности этих фаз. Для оценки возможной длительности фаз и принятия решения служит определенный алгоритм, который запрограммирован в блоке микропроцессорной системы управления компрессором. Алгоритм производит обработку входных сигналов от штатных датчиков, выполняет вычислительные и логические операции и формирует командные процедуры на управление установкой. Такими системами оснащены компрессоры ведущих фирм.

Разработано шахтное компрессорное оборудование и приведены результаты его применения в процессах угледобычи [5]. Изучив мировую практику получения инертных газовых сред, технические решения, применяемые ведущими производителями аналогичного оборудования ООО «МИКЕМ» совместно с ОАО «НПАО ВНИИкомпрессормаш», входящее в состав концерна «Укрросметалл», в 2003 г. разработало проект, изготовило и испытало опытный образец азотной мембранной винтовой передвижной станции АМВП-15/0,7 С У1. Конструктивно станция состоит из модулей – компрессорного агрегата, подготовки воздуха и системы КИП и автоматики, мембранного. Некоторые параметры станции приведены в табл. 2.

Изготовленная специалистами ОАО «НПАО ВНИИкомпрессормаш» станция АМВП-15/0,7 С У1 успешно прошла заводские испытания на предприятии-изготовителе и приемочные испытания у заказчика (государственное предприятие «Макеевуголь», Донецкая обл., Украина). В конце 2003 г. станция АМВП-15/0,7 С У1 была применена при тушении пожара на одной из шахт ГП «Ровенькиантрацит». Оперативно доставленная на место аварии, станция успешно зарекомендовала себя в реальных условиях пожаротушения, подав в горную выработку

Таблица 2. Параметры станции АМВП-15/0,7 С У1

Параметр	Ед. изм.	Значение
Объемная производительность по азоту	м³/мин	15
Конечное избыточное давление азота	МПа	0,7
Концентрация азота	%	90-95
Мощность потребляемая станцией, не более	кВт	350
Напряжение питания приводного электродвигателя	В	6000
Габаритные размеры, не более: длина, ширина, высота	мм	13540, 2500, 4000
Масса, не более	кг	30000
Шасси		полуприцеп-контейнеровоз

(зону горения) 62 000 м³ азота. При помощи станции АМВП-15/0,7 С У1 пожар был ликвидирован в течение 72 ч. Суммарные расходы на получение 1 м³ азота на мембранных газоразделительных установках значительно меньше расходов на производство азота из атмосферного воздуха методом глубокого охлаждения. Основные затраты на производство азота – стоимость электроэнергии. Опыт эксплуатации подобных установок показывает, что эффективно их обслуживает один механик. Преимущества мембранного способа получения азота: низкая себестоимость; повышенный ресурс установки; малые эксплуатационные затраты; быстрая окупаемость; простота в обслуживании; экономия энергии.

Разработан и введен в действие Стандарт Минвуглепрома Украины «Правила використання газоподібного азоту для попередження та локалізації підземних пожеж. (СОУ 10.1.202020852.001:2006)» [6]. Способ повышения безопасности и эффективности процесса разрушения горного массива разработанный в 2008 г. НИИГМ им. М. М. Фёдорова совместно с концерном «Укрросметалл» позволяет по-новому подойти к решению вопроса интенсификация ведения горных работ в угольных шахтах с применением нового компрессорного оборудования, в частности подземных азотных компрессорных станций (АКСШ). Сущность способа заключается в том, что осуществляется инертизация образовавшейся при работе забойного оборудования пылегазовой смеси в забое путем подачи в зону разрушения горного массива газообразного азота от азотной компрессорной станции через специальный смеситель системы пылеподавления. Схема осуществления данного способа приведена на рис. 2.

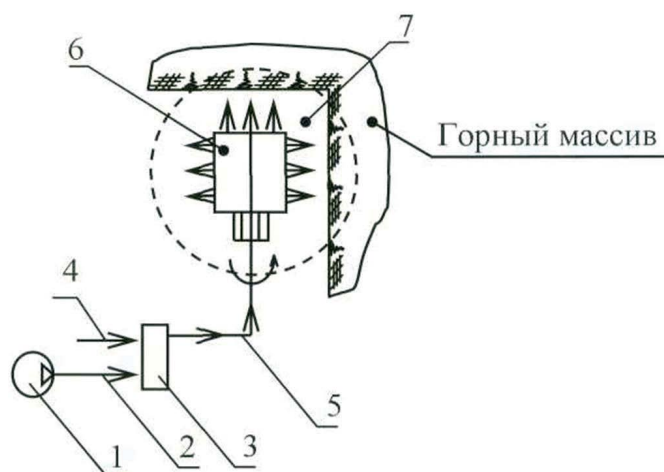


Рис. 2. Принципиальная схема способа повышения безопасности разрушения горного массива комбайном и бурильной установкой: 1 – подземная азотная компрессорная станция АКЩ; 2 – трубопровод для подачи азота; 3 – специальный смеситель; 4 – трубопровод для подачи воды; 5 – трубопровод для подачи азотно-водяной смеси; 6 – исполнительный орган горной машины; 7 – место разрушения горного массива (забой)

Особенностью винтового компрессора «сухого сжатия» (ВКС) является отсутствие подачи в рабочую полость и в сжимаемую среду (например, воздух) какой-либо охлаждающей жидкости. Это дает возможность получить чистый сжатый воздух, незагрязненный аэрозолями масла, что существенно повышает экологичность шахтного компрессора.

Однако отсутствие подачи охлаждающей жидкости в полости сжатия ВКС приводит к резкому росту конечной температуры сжимаемой среды, которая может быть определена для адиабатического (без охлаждения) процесса по формуле

$$t_a = t_s \left(\frac{P_a}{P_s} \right)^{\frac{k-1}{k}}$$

где t_s и P_s – температура и давление в камере всасывания; P_a – давление внутреннего сжатия ВКС; k – показатель адиабаты.

Расчеты показывают, что для требуемых параметров одноступенчатого шахтного ВКС ($P_a = 0,6$ МПа; $t_b = 26$ °С) величина t_a превышает 190 °С, что недопустимо по правилам безопасности в шахтах. Для снижения температуры в полостях ВКС (при использовании традиционного цикла сжатия в объемных машинах) компрессор должен быть 2-х ступенчатым. Конструкция такого шахтного компрессора весьма громоздка и неудобна в эксплуатации. Разработанный НИИГМ им. М. М. Фёдорова способ регулирования давления в камерах переменного объема позволяет уменьшить весогабаритные показатели компрессора «сухого сжатия» и может быть положен в основу создания безмасляного шахтного компрессора.

В НИИГМ им. М. М. Фёдорова имеется существенный опыт в создании ПКС повышенной

производительности. Более 10 лет на шахте имени В. В. Вахрушева ГП «Ровенькиантрацит» под авторским надзором НИИГМ им. М. М. Фёдорова эксплуатировался экспериментальный образец ПКС-1Э производительностью 75 м³/мин, состоящий из 3-х компрессорных модулей производительностью 25 м³/мин каждый, производства Казанского компрессорного завода (Россия). При этом испытывались варианты систем воздухозабора, охлаждения и управления ПКС.

Применение ПКС в угольных шахтах позволяет в ряде случаев произвести частичную или полную замену весьма энергоемких и изношенных стационарных компрессорных установок, расположенных на поверхности шахты, и существенно сократить затраты на выработку сжатого воздуха за счет уменьшения потерь при транспортировании его по длинным и весьма разветвленным пневмосетям. Рассмотрены новые технологии повышения метаноотдачи угольных пластов с использованием инертных газов и их смесей с другими, а также технические возможности реализации предлагаемых технологий на основе современных разработок компрессоростроителей.

Созданная газопутилизационная установка типа КГУУ включена в комплекс оборудования для извлечения метана из угольных пластов (шахта «Молодогвардейская»). Параметры газопутилизационной установки приведены в табл. 3. Контейнерная газопутилизационная установка КГУУ (рис. 3) предназначена для утилизации шахтного газа путем его сжигания в предотвращения этим выделения в атмосферу вредного парникового газа – метана.

Таблица 3. Характеристики контейнерной газопутилизационной установки (КГУУ)

Рабочая среда	Шахтный газ (25 % и более CH ₄)
Производительность, м³/час	570-1551
Перепад давления, кгс/см², не более	ОД
Потребляемая номинальная мощность, кВт, не более	60
Напряжение питания, В, не более	400
Тепловая мощность номинальная, мВт, не менее	5
Температура сжигания газа, не более, °С	1200
Габаритные размеры контейнера, мм, не более, длина, ширина, высота	6000, 2650, 2750
Масса контейнера с оборудованием, кг, не более	11000
Габаритные размеры трубы, мм, не более, диаметр, высота	2100, 5400
Масса трубы, кг, не более	2000



Рис. 3. Внешний вид контейнерной газопользовательной установки

компрессорными станциями, обеспечивающими получение из атмосферного воздуха азота концентрацией от 90 до 99,5 % и его закачку в газонасыщенный углеводородный массив.

Протекающие диффузионные процессы сопровождаются замещением метана молекулами закачиваемых газов, повышая тем самым степень извлечения метана при дегазации угольных пластов.

Экономическая целесообразность крупномасштабной промышленной добычи метана на углегазовых месторождениях подтвердилась ходом развития углегазовых промыслов в США и результатами работ в Австралии, Китае и других странах. Например, по заказу Департамента энергетики США в научных и опытных разработках (2004 г.) начали применять азот для повышения метаноотдачи угольных пластов. При этом выполнено ТЭО целесообразности использования бинарных газов, одним из которых является азот. Корпорации Petromin Resources и China United Coal bed Methane Co запланировали провести пятилетнее исследование инъекций CO₂ для повышения метаноотдачи угольных пластов. Впоследствии планируют продавать разработку другим странам.

Основной экономический эффект при внедрении предлагаемой технологии связан с вкладом составляющих: эффект от реализации метана; эффект от повышения темпа проведения подготовительных выработок в шахтах; эффект от повышения нагрузки на очистной забой; эффект от снижения эмиссии метана в атмосферу; эффект от сокращения затрат на проведение традиционных методов дегазации; эффект от сокращения затрат на ликвидацию последствий аварий в шахтах; эффект от применения новых установок и технологий дегазации.

Выводы

1. Разработаны методы расчета режимных параметров шахтных компрессорных установок. Впервые установлено, что длительность циклов «нагнетание – холостой ход» шахтной компрессорной установки, а значит, и частота срабатывания регулирующей пневмосистемы прямо пропорционально зависят от объема сети, так при характерном для угольных шахт большом объеме сети, наполнение ее воздухом происходит в течение длительного периода, но

частота циклов мала, при этом давление воздуха для шахтной сети средней и большой протяженности квадратично возрастает с увеличением его расхода, а наиболее экономичным способом регулирования режима работы компрессора для шахтной сети большой протяженности является комбинированный.

2. Показано, что увеличение метаноотдачи угольных пластов обеспечивается передвижными азотно-мембранными компрессорными станциями обеспечивающими получение из атмосферного воздуха азота концентрацией от 90 до 99,5 % и его закачку в газонасыщенный углеводородный массив, при этом протекающие диффузионные процессы сопровождаются замещением метана молекулами закачиваемых газов, повышая тем самым степень извлечения метана при дегазации угольных пластов, при этом интенсивность газового потока пропорциональна средней скорости молекул и обратно пропорциональна квадратному корню из их масс, а зависимость метаноотдачи угольного пласта от времени после закачки газов носит линейный характер, снижаясь с 1200 до 600 тыс. м³ в год в течение первых трех лет.

3. Приведены результаты применения шахтного компрессорного оборудования в процессах угледобычи. Экономический эффект при внедрении предлагаемого оборудования и технологий получен за счет сокращения затрат на ликвидацию последствий аварий в шахтах, применения новых установок и технологий дегазации, снижения эмиссии метана в атмосферу; от сокращения затрат на проведение традиционных методов дегазации, реализации метана; повышения темпа проведения подготовительных выработок в шахтах; увеличения нагрузки на очистной забой.

Библиографический список

1. Веригин И. С. Компрессорные и насосные установки / И.С. Веригин. – М.: Академия, 2007. – 289 с.
2. Воронежский А. В. Современные компрессорные станции / А. В. Воронежский. – М.: Премиум Инжиниринг, 2009. – 445 с.
3. О проблемах пневмоэнергетического комплекса шахт / Б. А. Грядущий, Г. В. Кирик, А. Н. Коваль, В. В. Лобода, П. Е. Жарков, А. М. Лавренко // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2008. – №1(11). – С. 2-5.
4. Бондаренко Г. А. Компрессорные станции. Воздушные компрессорные станции: учебное пособие / Г. А. Бондаренко, Г. В. Кирик. – Сумы: Сумский государственный университет, 2012. – 344 с.
5. Новые технологии и оборудование для увеличения метаноотдачи угольных пластов / В. Е. Сторижко, Г. В. Кирик, А. Д. Стадник. // Геотехнічна механіка: Міжвід. збірник наукових праць. / Інститут геотехнічної механіки ім. М. С. Полякова НАН України. – Дніпропетровськ, 2008. – Вип. 80. – С. 40-46.
6. Стандарт Мінвуглепрому України. Правила використання газоподібного азоту для попередження та локалізації підземних пожеж. (СОУ 10.1.202020852.001:2006). Розробники: Кузьменко О., Беліков І., Бондаренко В., Брюханов О., Грядущий Б., Лобода В., Савостьянов О., Тарасов В., Кирик Г., Жарков П., Оверчик С. // Мінвуглепром України, 2007.

Поступила 27.03.2014