

Г. В. Кирик, д-р техн. наук, президент, П. Е. Жарков, академик УТА, генеральный конструктор (концерн «Укрросметалл», г. Сумы, Украина)

Обоснование режимных параметров шахтного компрессорного оборудования и способов его применения при добыче угля и метана

На основе определения закономерностей параметров шахтного компрессорного оборудования усовершенствованы методы расчета режимных параметров шахтных компрессоров и обоснованы их параметры. Разработано и внедрено энергоэффективное шахтное компрессорное оборудование и способы его применения в процессах добычи угля и метана для повышения эффективности и безопасности подземных горных работ и снижения их техногенного воздействия на окружающую среду, что имеет важное значение для добывающей отрасли страны.

Ключевые слова: шахтное компрессорное оборудование, параметры, способы, добыча угля и метана

На основі визначення закономірностей параметрів шахтного компресорного устаткування вдосконалені методи розрахунку режимних параметрів шахтних компресорів та обґрунтовані їх параметри. Розроблено та впроваджено енергоефективне шахтне компресорне обладнання та способи його застосування в процесах видобутку вугілля метану для підвищення ефективності та безпеки підземних гірничих робіт і зниження їх техногенного впливу на навколишнє середовище, що має важливе значення для добувної галузі країни.

Ключові слова: шахтне компресорне обладнання, параметри, способи, видобуток вугілля і метану

On the basis of the definition of the parameters of the laws of mine compressor equipment improved methods of calculating the regime parameters of mine compressors and justified their parameters. Developed and implemented energy-efficient compressors, mining equipment and methods for its use in processes for the production of coal and methane to improve the efficiency and safety of underground mining operations and reduce their anthropogenic impact on the environment, which is important for the mining industry in the country.

Keywords: mine compressors, parameters, methods, coal mining and methane

Для успешного функционирования отрасли необходимо ускорить техническое переоснащение и комплексное обновление шахтного основного фонда. Совершенствование системы обеспечения шахт сжатым воздухом является одним из основных направлений энергосбережения в угольной отрасли. В табл. 1 приведены данные о парке компрессоров, эксплуатируемых на предприятиях угольной промышленности Украины [1 – 4].

Альтернативой существующей технологии производства, основанной на размещении мощных компрессорных станций на поверхности шахт, является создание на базе передвижных шахтных винтовых компрессорных установок модульных подземных компрессорных станций, а также размещение передвижных винтовых компрессорных станций непосредственно в забоях, в том числе и тупиковых, оптимально приближенных к подземным потребителям сжатого воздуха.

В работе [5] обосновано переход от схемы централизованного воздухообеспечения шахт к локальным компрессорным станциям и произведена оценка способностей сжатого воздуха выполнить механическую работу для случая с удаленной и локальной компрессорными установками. Параметры воздуха перед потребителями локальной сети принимаем равными V_1, p_1, T_1 , а для протяженной сети равными V_2, p_2, T_2 . При этом

$$V_2 = V_1 - \Delta V; p_2 = p_1 - \Delta p; T_2 = T_1 - \Delta T; \quad (1)$$

где $\Delta V, \Delta p, \Delta T$ – потери производительности, давления, охлаждения воздуха в сети между удаленными компрессорами и потребителем соответственно.

Теоретическая механическая работа, совершаемая m кг сжатого воздуха при адиабатном расширении его до конечного давления p (в нашем случае до атмосферного p_a) в пневмоустройстве или инструменте равна

$$L = \frac{mkRT_0}{k-1} \left[1 - \left(\frac{p_a}{p} \right)^{(k-1/k)} \right]; \quad (2)$$

где $m=PV$ – массовый расход воздуха; $k = 1,4$ – показатель адиабаты.

Подставив в это выражение вместо m, T, p их значения для состояния 1 (на выходе из компрессора) и 2 (на входе к потребителям) получим возможность сравнить величины теоретической механической работы, с учетом и без учета потерь энергии массы воздуха в трубопроводе.

В качестве примера рассмотрим пневмосистему, в которой потери на утечку воздуха составляют 10 %, потери на гидравлическое сопротивление – 0,5 кг/см², охлаждение воздуха происходит на 40 °С. Параметры воздуха на нагнетании, компрессора: $p_1 = 8$ кг/см², $t_1 = 60$ °С. Определим коэффициент недоиспользования сжатого воздуха используя вышеприведенные соотношения (1) и (2)

$$K_L = \frac{L_2}{L_1} = \frac{T_2}{(1 - \Delta m/m_1)T_1} \times \frac{\left[1 - (1/7,5)^{0,286} \right]}{\left[1 - (1/8)^{0,286} \right]} = 0,76.$$

Таким образом, за счет потерь энергии и утечек в воздухопроводе способность воздуха совершать механическую работу снижается на 24 %. Возможна и

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, Россия, Украина	20 – 30 50	132	УКВШ-15/7
Винтовые компрессоры, Россия	20-50	200	УКВШ-15/7
Винтовые компрессоры, Россия, Украина	5	1215	УКВШ-5/7

другая интерпретация этого результата. Если, несмотря на потери, потребителю для нормальной работы достаточны параметры воздуха, то установив локальный компрессор, рассчитанный на эти параметры, можно сэкономить около 24 % потребляемой энергии. В реальных системах экономия от использования локальных систем может быть намного большей. Например, если потери воздуха в системе увеличатся в два раза (до 20 %) то при прочих равных условиях экономия энергии составит уже 33 %. Очевидно, что экономические преимущества локальных систем не вызывают сомнения.

Усовершенствованы методы расчета режимных параметров шахтных компрессоров путем перевода на холостой ход [6]. Выполнен расчет показателей процесса регулирования. Установлены закономерности изменения длительности цикла, интервалов нагнетания и холостого хода, в зависимости от нагрузки. При производительности шахтного компрессора 50 м³/мин, объеме ресивера 50 м³, диапазоне изменения давления в ресивере от 6 до 8 кгс/см², при относительном потреблении 0,8 длительность интервалов работы на холостом ходу составляет 2,5 мин, интервалов нагнетания – 10 мин, что соответствует примерно пяти переключениям компрессора в час. Длительность одного цикла «нагнетание – холостой ход» составляет:

$$\Delta t_y = \Delta t_n + \Delta t_{xx} = \frac{Q}{V_k} \cdot \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{q_v (1 - q_v)},$$

где t_n – длительность периода времени нагнетания;
 t_{xx} – длительность периода времени холостого хода;

$$q_v = \frac{V_n}{V_k}, \frac{p_1}{p_0} = \varepsilon_1, \frac{p_2}{p_0} = \varepsilon_2,$$

V_k – номинальная производительность компрессора;
 V_n – текущее потребление воздуха; Q – емкость ресивера;
 $p_1 = p_{\min}$ минимально допустимое давление в ресивере;
 $p_2 = p_{\max}$ – максимально допустимое давление в ресивере.

Комплекс $\frac{Q}{V_k} (\varepsilon_2 - \varepsilon_1)$ является постоянным для каждого рассматриваемого случая регулирования, тогда

$$\Delta t_{xx} \geq \frac{60}{i}, \overline{\Delta t_{xx}} = \frac{1}{q_v}, N_{xx} = 0. \quad (3)$$

Определены показатели эффективности регулирования. Условие, при котором допустимо и целесообразно регулирование путем останова и последующего пуска двигателя

$$\Delta t_{xx} \geq \frac{60}{i},$$

где i – допустимое количество включений в час.

Целесообразность применения регулирования включением-выключением при заданном относительном потреблении

$$q_v \leq \frac{Q}{60V_k} (\varepsilon_2 - \varepsilon_1).$$

Экономия мощности, полагая что $N_{xx} = 0$ равна

$$\Delta N = N_n (1 - q),$$

т.е. в $1/(1-q)$ раз больше, чем при переводе на холостой ход.

Наиболее экономичный режим работы винтового компрессора является комбинированным, т.е. складывается из сочетания повторно кратковременного режима «включение-выключение» и условно непрерывного режима с переводом на холостой ход и обратно, при этом, необходимо избегать как чрезмерно долгих фаз холостого хода, так и слишком коротких остановок.

Установлены закономерности изменения характеристик шахтной пневмосети. Основной характеристикой сети является ее объем, который складывается из объемов ресиверов, коллекторов, воздухопроводов, сепараторов, осушителей. Как следует из формулы (3), длительность циклов «нагнетание – холостой ход», а значит, и частота срабатывания регулирующей пневмосистемы прямо пропорционально зависят от объема сети. При большом объеме сети накачка ее 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. Минимально допустимый объем системы определяется из формулы (3)

$$Q_{\min} = \frac{V_k q_v (1 - q_v)}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \Delta t_{y \min}. \quad (4)$$

Наихудшим режимом, когда Δt_y минимально, является режим потребления $q_v = 0,5$. Именно для этого случая следует вычислять минимально допустимый объем сети.

Минимальное значение $\Delta t_{y \min}$ определяется скоростью срабатывания пневмосистемы «регулятор производительности – пневмодвигатель – дисковая заслонка». В зависимости от производительности компрессора (соответственно от размеров диска, хода штока двигателя и др.) эта величина может быть принята равной 1,5 – 2,5 сек. В данном расчете принимаем $\Delta t_{y \min} = 1,8$ с. Рекомендуемый диапазон допустимого изменения давления $\varepsilon_2 - \varepsilon_1$ принимаем равным 0,6. После подстановки этих величин в формулу (4) получим зависимость, приведенную в табл. 2.

Разработана методика оценки технического уровня винтовых компрессоров [7]. Проведена оценка технического уровня компрессорной установки для комплектации буровых станков и пневмосистем шахт ВВ-32/8М1У2, показано соответствие современному техническому уровню мирового компрессоростроения.

Обобщенный средневзвешенный показатель технического уровня для компрессоров общего назначения определяется по формуле:

$$K_{об} = m_1 \frac{N_{ya}}{N_y} + m_2 \frac{Q_{ya}}{Q_y} + m_3 \frac{m_{ya}}{m_y} + m_4 \frac{T_y}{T_{ya}} + m_5 \frac{T_{py}}{T_{pya}} + m_6 \frac{L_{aa}}{L_a} + m_7 \frac{\Pi_3}{\Pi_{3a}} + m_8 \frac{M_{ya}}{M_y} + m_9 \frac{K_{np}}{K_{npa}} + m_{10} \frac{\Pi_{пч}}{\Pi_{пча}} + m_{11} \frac{\Pi_{пз}}{\Pi_{пза}}$$

где $m_1, m_2, m_3, \dots, m_{11}$ – коэффициент весомостей единичных показателей технического уровня; $\frac{N_{ya}}{N_y}$, $\frac{Q_{ya}}{Q_y}$ – относительные единичные показатели технического уровня; N_y – удельная мощность, кВт/м³/мин; T_{py} – установленный ресурс до капитального ремонта, час; M_y – удельная материалоемкость компрессора, кг/м³/мин; Q_y – удельный расход охладителя (воды, воздуха), м³/мин; m_y – удельный расход масла на унос, г/час/м³/мин; T_y – установленная безотказная наработка, час; L_a – средний уровень звука в контрольных точках, дБА; Π_3 – показатель совершенства производственного исполнения и стабильности товарного вида, балл; K_{np} – коэффициент применяемости; $\Pi_{пч}$ – показатель патентной чистоты; $\Pi_{пз}$ – показатель патентной защиты.

Разработаны энергоэффективные компрессорные машины: винтовая шахтная компрессорная установка; разработана установка для дегазации подземных пластов, разработана станция для утилизации шахтного газа; спроектированы мембранные азотные установки для предупреждения и тушения пожаров в горных выработках угольных шахт, а также для реализации технологий повышения метаноотдачи угольных пластов [8 – 10].

Разработаны способы применения шахтного компрессорного оборудования: способы добычи метана, разупрочнения и дегазации углеродного массива; способ ликвидации начальной стадии под-

Таблица 2. Зависимость минимального объема сети от производительности винтового компрессора

$V_k, \text{ м}^3/\text{мин}$	2	5	10	25	50
$Q, \text{ м}^3$	0,025	0,0625	0,125	0,3125	0,625

земных пожаров в действующей или в остановленной выработке.

Освоено серийное производство подземных компрессорных установок серии УКВШ производительностью 5; 10 и 15 м³/мин. В настоящее время в подземных выработках шахт эксплуатируется более 2500 установок. Шахтные компрессорные установки типа УКВШ имеют более высокий уровень пожарной безопасности, чем применяемые ранее установки ШВ-5. За время эксплуатации не было зафиксировано ни одного случая возгорания, что имело место при эксплуатации предыдущих компрессорных установок других типов (табл. 3).

Для уменьшения объемов потребления электроэнергии и повышения энергоэффективности угледобычи необходимо переоснащение угледобывающих предприятий современными энергосберегающими винтовыми компрессорами ВВ-100/8УЗ и ВВ-50/8УЗ. Внедрение этих компрессоров позволяет уменьшить потребление электрической энергии на шахтах на 84,0 млн. кВт·часов/год на сумму около 90,0 млн. грн. Подготовлена база и осуществлено переоснащение наземных компрессорных станций на угольных шахтах современными надежными винтовыми установками с возможностью оперативного дистанционного управления с центрального пульта серии НВЭ и ВВ: ВВ-65/5УЗ, ВВ-50/8УЗ, ВВ-40/8УЗ, ВВ-25/8АУЗ, НВЭ-22/8УЗ, НВЭ-12/0,7УЗ, НВЭ-10/0,7МУЗ (рис. 1).



Рис. 1. Компрессорные установки серии ВВ и НВЭ для комплектования наземных КС шахт

Таблица 3. Технические параметры установок УКВШ

Марка станции	Максимальное давление нагнетания, бар	Производительность, нм/мин	Мощность электродвигателя, кВт	Габаритные размеры агрегата, мм, не более	Масса, кг
УКВШ-5/7	6	5; 6; 7,5	37; 55	2200x1050x1500	1680
УКВШ-10/7	6	10	75	3200x1100x1400	2800
УКВШ-15/7	6	15	90	3140x1140x1600	2900
УКВШ-7,5/7	6	7,5	55	2200x1050x1500	1700



Рис. 2. Передвижная азотная станция АМВП-15/0,7 С У1

В военизированных горноспасательных отрядах внедрены станции азотные мембранные винтовые передвижные АМВП-15/0,7 У1 в количестве 9 станций производительностью 15 м³/мин (рис. 2). Станции эксплуатируются с 2004 года. Станции АМВП-15/0,7 У1 применены для тушения пожаров на шахтах ОП «Шахта им. М.И. Калинина ГП «ДУЭК», ПАО «Шахта им. А. Ф. Засядько», шахта им. Ф.Э. Дзержинского ГП «Ровенькиантрацит», УК «Краснолиманская» (рис. 3). Всего станциями произведено 12 625 325,00 м³ азота. Общая наработка составила 12536 часов. Фактический экономический эффект, полученный за 10 лет эксплуатации 9 станций АМВП-15/0,7 У1, только за счет сохранения оборудования и ликвидации потерь в добыче угля составил около 2 млрд. грн, при этом было сохранено более 1000 рабочих мест.

Разработан, утвержден и введен в действие нормативный документ – Стандарт Минуглепрома Украины; СОУ 10.1.202020852.001:2006 «Правила использования газообразного азота для предупреждения и локализации подземных пожаров».

На шахтах «Молодогвардейская», «Самсоновская-Западная» ПАО «Краснодонуголь» внедрены установки компрессорные газоутилизационные УКГ-5/8 в количестве 3-х установок производительностью 1551 м³/ч. Установки эксплуатируются с 2008 года. Всего при помощи установок утилизировано более 21 млн. м³ газа метана. Общая наработка составила 57160 часов. Фактический экономический эффект, полученный за 6 лет эксплуатации 3-х установок УКГ-5/8, за счет снижения эмиссии метана в атмосферу, реализации положений Киотского протокола составил около 20 млн. грн (табл. 4, рис. 4).

Исследованы перспективные технологии добычи углеводородов с применением компрессорного оборудования [11, 12]. Разработана технология подземной газификации угля с применением компрессорного оборудования. Анализ особенностей и состояния газификации углей показывает, что на всех стадиях технологического процесса применяется компрессорное оборудование. Добыча сырья, пневматическое транспортирование, снабжение кислородом и азотом, реакторный процесс, очистка газа, переработка синтетического газа, производство электроэнергии, транспортирование в хранилища продуктов газификации осуществляется с помощью специального компрессорного оборудования.



Рис. 3. Работа дивизиона азотных передвижных станций при тушении пожара на шахте им. А.Ф. Засядько (г. Донецк)



Рис. 4. Размещение установки УКГ на угольном месторождении

Многолетний опыт эксплуатации передвижных компрессорных станций НД для геологоразведочных работ, компрессорных станций ВВ для буровых установок СВШ с электрическим и дизельным приводом, установок для сбора и утилизации метана УКГ, компрессоров для сжатия углеводородных и коксового газов, роторных компрессоров ГР позволяет представить широкий выбор технологического оборудования в технологиях добычи сланцевого газа и переработки сланцев.

Список литературы:

1. *Енергетична стратегія України до 2030 року // Розпорядження Кабінету Міністрів України від 15.03.2006 за № 145-р.*
2. *Гелетпуха Г.Г. Критический анализ основных положений «Энергетической стратегии Украины на период до 2030 года» / [Гелетпуха Г.Г., Железная Т.А., Голубовская-Онисимова А.Н., Конеченков А.Е.] // Электронный журнал энергосервисной компании «Экологические системы». – 2006. – № 9. – С. 14.*
3. *Chiou C.B. The study of energy-saving strategy for direct expansion air conditioning system / [Chiou C.B., Chiou C.H., Cni C.M., Lin S.L.] // Energy and Buildings. – 2008. – Volume 40. – Issue 9. p.p. 1660 – 1665.*
4. *О проблемах пневмоэнергетического комплекса шахт / [Грядущий Б.А., Кирик Г.В., Коваль А.Н. Жарков П.Е. и др.] // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2008. – №1(11). – С. 2 – 5.*

Таблица 4. Характеристики газоперерабатывающей установки УКТ 5/8

Наименование параметра		Значение или характеристика
Сжимаемая среда		метановоздушная смесь
Габаритные размеры установки, не более, мм	длина	2591
	ширина	6058
	высота	2438
Габаритные размеры трубы, не более, мм	диаметр	1900
	высота	6326
Масса установки вместе с трубой в объеме поставки, не более, кг		12000
Потребляемая номинальная мощность, не более, кВт		60
Напряжение питания, В		380, 220
Производительность установки по газу, приведенная к начальным условиям, не менее, м ³ /с (м ³ /мин)		0,17-0,43 (10-26)
Перепад давления, МПа (кгс/см ²)		0,01-0,05 (0,1-0,5)
Тепловая мощность, МВт		5-8
Температура сжигания, не более К(С)		1473 (1200)

5. Жарков П.Е. Локальные компрессорные станции – основа энергосберегающих технологий / П.Е. Жарков, Г.А. Бондаренко // Праці Міжнародної науково-практичної конференції «Передові компресорні технології – користувачам». – Суми: СумДУ, 2004. – Т.1. – С. 8 – 17.

6. Бондаренко Г.А. Винтовые компрессоры в системах обеспечения сжатом воздухом / Г.А. Бондаренко, П.Е. Жарков. – Сумы: Изд-во СумГУ, 2003. – 134 с.

7. Жарков П.Е. Оценка технического уровня винтовых компрессоров / П.Е. Жарков, Г.С. Подошев // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2006. – № 2 (2). – С. 48 – 51.

8. Жарков П.Е. Перспективы применения оборудования концерна Укрросметалл в модернизации угольной отрасли Украины / А.В. Рубель, П.Е. Жарков // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2013. – № 1 (31). – С. 2 – 6.

9. Кирик Г.В. Киотский протокол и оборудование концерна «Укрросметалл» для реализации его положений / Г.В. Кирик, П.Е. Жарков, А.Д. Стадник // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – Сумы. – 2008. – № 2. – С. 2 – 7.

10. Кирик Г.В. Развитие топливно-энергетического комплекса и стратегия выпуска энергоэффективной компрессорной техники / Кирик Г.В., Жарков П.Е., Стадник А.Д. // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2013. – № 3 (13). – С. 2 – 8.

11. Жарков П.Е. Продукты газификации угля – доступная альтернатива природному газу / Жарков П.Е. // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2010. – № 3 (21). – С. 2 – 6.

12. Кирик Г.В. Компрессорная техника для технологий сланцевого газа / Кирик Г.В., Жарков П.Е., Радзиевский В.Н. // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2010. – № 4 (22). – С. 2 – 6.