

Лобода В.В., канд. техн. наук, Соловьев А.В., аспирант, Манец Н.В. (НИИГМ им. М.М.Федорова)

ОСОБЕННОСТИ СОЗДАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ АЗОТНО-КОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЙ НА УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ

Розглянуті деякі питання розробки і ефективності використання азотно-компресорних станцій в підземних умовах вугільних шахт.

Виконано аналіз низки технічних рішень щодо забезпечення експлуатаційної надійності і безпеки підземних азотно-компресорних станцій.

Рассмотрены некоторые вопросы разработки и эффективности применения азотно-компрессорных станций в подземных условиях угольных шахт.

Выполнен анализ ряда технических решений по обеспечению эксплуатационной надежности и безопасности подземных азотно-компрессорных станций.

Examined some questions of the elaboration and use effectiveness of the nitrogen-compressor station in the mining conditions.

Given the analysis of the range of technical solutions concerning the exploitation reliability provision and safety of the solutions underground nitrogen-compressor stations.

КС: шахта, подземная азотная станция, газообразный азот, инертизация, очистной забой.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. С ростом глубины угольных шахт возрастает метанообильность угольных пластов, что повышает опасность возникновения подземных пожаров и взрывов и соответственно снижает безопасность горных работ в шахте. По этой причине требуются новые технические решения, которые позволят в условиях глубоких шахт интенсивно и безопасно вести горные работы на добычных и проходческих участках.

Как показали проведенные НИИГМ им. Федорова исследования, одним из направлений обеспечения безопасности ведения горных работ является применение газообразного азота для инертизации взрывоопасной среды в забоях с работающими механизмами. Существующий способ выработки газообразного азота и подачи его в шахту к месту ведения горных работ с помощью поверхностных станций малоэффективен, так как при этом происходят значительные потери во время транспортировки газа по длинным азотпроводам. Необходимо проведение исследований по снижению затрат на выработку газообразного азота и повышению эффективности его применения в технологическом процессе угледобычи.

Анализ исследований и публикаций. В ряде работ [1,2] рассмотрены причины появления опасных концентраций газа метана после проведения традиционной дегазации пластов, а также дана качественная оценка этому явлению в зависимости от физических параметров разрабатываемых угольных пластов и технологии их выемки.

В работах [3,4] обоснована необходимость и возможность создания подземных азотно-компрессорных станций на основе мембранных технологий выработки газообразного азота для применения его в угольных шахтах с повышенной метанообильностью.

Постановка задачи. До настоящего времени в угольных шахтах газообразный азот применялся только для локализации и тушения подземных пожаров, а применение азота непосредственно в технологическом процессе добычи угля не осуществлялось. Исследования показали, что для эффективного использования газообразного азота в процессе угледобычи и повышения безопасности горных работ необходимо производить его непосредственно в

подземных условиях с помощью азотно-компрессорных станций, максимально приближенных к подземным потребителям. Поэтому проведение комплекса исследований по созданию подземных азотно-компрессорных станций и изучению особенностей их применения в угольных шахтах – важная и актуальная задача, что и является **целью** данной статьи.

Изложение основного материала. Применение газообразного азота на угольных шахтах было связано в основном с возникновением подземных пажаров. В большинстве случаев газообразный азот применялся для подачи в очаг возгорания в шахте в целях создания инертной среды и гашения очага возгорания.

Такой подход к использованию инертного газа азота, который подавался, как правило, по длинным трубопроводам с поверхности, не всегда обеспечивал достаточно быструю ликвидацию пожара и его негативных последствий для шахты. В этой связи НИИГМ им. М.М.Федорова предложил производить выработку газообразного азота непосредственно в подземных условиях и применять его для инертизации взрывоопасной среды в забоях в процессе угледобычи. Появление взрывоопасной среды в шахтах, как правило, связано с появлением критической концентрации газа метана.

Максимальная концентрация метана, которая может достигаться в забое, выражается равенством

$$c_{\max} = \frac{m_0}{m_0 + q}, \quad (1)$$

где m_0 – количество поступающего газа метана в забой в единицу времени; q – количество воздуха, поступающего в забой в единицу времени.

Если величина c_{\max} ниже критической концентрации метана $c_{кр}$, то опасная концентрация его никогда не будет достигнута, а работа механизмов будет проводиться в безопасном режиме.

При приближении c_{\max} до $c_{кр}$ (например, за счет уменьшения скорости продвижения забоя) время достижения критической концентрации $t_{кр}$ увеличивается.

Формула (1) позволяет при известной интенсивности источников газовой выделении m_0 рассчитать такую интенсивность проветривания q , при которой гарантируется безопасная работа в забое. Обозначив через $q_{кр}$ необходимую для безопасности подачу вентиляционного воздуха и учитывая, что при критическом режиме $c_{кр} = c_{\max}$, получим

$$q_{кр} = \frac{m_0(1 - c_{кр})}{c_{кр}}. \quad (2)$$

Расчет значения опасной концентрации метана ($c_{кр}$) в забое очистной выработки, если интенсивность источника метановыделения будет I_0 , производится по формуле

$$C = \frac{I_0}{I_0 + q}. \quad (3)$$

Определение интенсивности I_0 источников метановыделения производится по формуле [2]

$$I_0 = \left[\frac{2b_1}{\sqrt{A_1}} + \frac{2b_2}{\sqrt{A_2}} \right] \frac{60V_s}{l_3}, \quad (4)$$

где A_1 – параметр, характеризующий относительную скорость движения метана в очистном забое, ($A_1 = 86,4 \cdot 10^3 V_s / V_n$); V_s – скорость звука в метановой среде, м/с; V_n – скорость продвижения забоя, м/сутки; V_k – скорость движения скребков конвейера, м/мин; A_2 – параметр, характеризующий относительную скорость движения цепи скребкового конвейера в очистном забое, ($A_2 = V_s / V_k$); b_1 – параметр, характеризующий поступление метана из угольного пласта при его разрушении добывающим механизмом; b_2 – параметр, характеризующий поступление метана из отбитого угля, размещаемого на забойных и штрековых конвейерах; l_3 – длина забоя.

Чем выше интенсивность метановыделения I_0 , тем большее количество газообразного азота должно быть подано в забой для инертизации.

Рассмотрим процесс инертизации, когда газообразный азот подается в забой непосредственно через исполнительный орган добывающей машины. В этом случае учитываем поступление метана только на длине $l_3 = 2h$ (где h мощность пласта) забойной линии из разрушенного массива угля, который еще не загружен на конвейер, то есть в формуле (4) параметры $A_2 = 0$ и $b_2 = 0$. В этом случае интенсивность метановыделения непосредственно в очистном забое будет равна

$$I_{03} = \frac{2b_1}{\sqrt{A_1}} \frac{60V_s}{l_3}. \quad (5)$$

Значение опасной концентрации метана в забое при подаче азота в количестве $q_{акр}$ равна

$$C_{кр} = \frac{I_{03}}{I_{03} + q_{акр}}. \quad (6)$$

Минимальное количество азота, которое необходимо подавать через исполнительный орган горной машины для инертизации взрывоопасной среды в забое, определяется по зависимости [5]

$$q_{акр} = \frac{I_{03}(1 - c_{кр})}{c_{кр}} = \frac{2b_1}{\sqrt{A_1}} \frac{60V_s(1 - C_{кр})}{L_3 C_{кр}}. \quad (7)$$

Количество $q_{акр}$ азота, которое подается в забой, зависит от горно-технических и технологических условий отработки угольных пластов.

Расчеты показывают [5], что для разных условий отработки угольных пластов и среднем коэффициенте диффузии $D_f = (0,5 \div 1,5) \text{ м}^2/\text{с}$ в очистной забой пласта средней мощности $1,2 \div 1,5 \text{ м}$ для инертизации необходимо подавать от $3,5 \text{ м}^3/\text{мин}$ до $20 \text{ м}^3/\text{мин}$ газоподобного азота.

Для выработки газообразного азота в количестве от $3,5 \text{ м}^3/\text{мин}$ до $15 \text{ м}^3/\text{мин}$ могут использоваться подземные модульные азотно-компрессорные станции (ПАКС) с несколькими модулями. В качестве модулей предполагается использование компактных шахтных винтовых компрессорных установок марки УКВШ.

Важным условием эффективной работы ПАКС в шахтах является обеспечение допустимого температурного режима в месте ее размещения в горной выработке. Температура в горной выработке при работе всех модулей ПАКС не должна превышать в соответствии с ПБ 26°C [6].

Для обеспечения необходимого теплового режима должна быть разработана эффективная система охлаждения модулей ПАКС.

Система охлаждения ПАКС предназначена для отвода тепла, выделяющегося при сжатии воздуха в винтовых компрессорах. Это тепло не должно существенно влиять на подогрев свежей струи воздуха, которая идет к добычным и проходческим участкам.

Система охлаждения, разработанная НИИГМ им. М.М. Федорова совместно с АО «НПАО «ВНИИкомпрессормаш», состоит из наружного (первичного) контура охлаждения ПАКС и внутренних контуров (систем) охлаждения каждого модуля.

В наружном контуре охлаждения ПАКС и во внутренних контурах охлаждения модулей в качестве теплоносителя используется вода. Во внутренних контурах охлаждения модулей вода в теплообменниках отбирает тепло от рабочей жидкости (масла), циркулирующей в системе охлаждения и смазки каждого модуля (например, винтовой компрессорной установки УКВШ).

Для охлаждения модулей во внутреннем контуре применены водомасляные охладители, а в наружном контуре применен водовоздушный охладитель, то есть:

- первый контур: водяное охлаждение масла и сжатого воздуха;
- второй контур: водяное охлаждение воды, которая является охлаждающей средой первого контура.

Первый контур состоит из маслоохладителей (ОМ) модулей и одного охладителя сжатого воздуха (ОВ), которые представляют собой теплообменники водяного охлаждения.

Приводим произведенный теплотехнический расчет водоохлаждаемого теплообменного устройства трубчатого типа для компрессорного модуля марки УКВШ производительностью 15 м³/мин. При этом определено необходимое количество трубок водоохладителя (холодильника) при расходе масла на выходе G_м=90 л/мин, температуре масла на входе t_м=80⁰С, на выходе t_м=60⁰С, длине трубок L=1400мм, внутреннем диаметре d_{вн}=15 мм, внешнем диаметре d_н=21 мм. Температура воды на входе в теплообменник t_{в1}=18⁰С, затраты воды G_в=0,65 кг/с.

Количество тепловой энергии, переданной маслом в теплообменнике:

$$Q = G_{\text{м}} C_p (t_{\text{м1}} - t_{\text{м2}}); \quad (8)$$

$$Q = 1,296 \cdot 1,943(80 - 60) = 50,36 \text{ кВт}.$$

Число Рейнольдса для масла:

$$Re_{\text{м}} = \frac{w_{\text{м}} d_{\text{вн}}}{\nu}; \quad (9)$$

$$Re_{\text{м}} = \frac{0,2 \cdot 0,021}{69,8 \cdot 10^{-8}} = 60,6.$$

Число Нуссельта для масла:

$$Nu_{\text{м}} = 0,26 \cdot Re_{\text{м}}^{0,65} \cdot Pr_{\text{м}}^{0,33}; \quad (10)$$

$$Nu_{\text{м}} = 0,26 \cdot 60,6^{0,65} \cdot 858^{0,33} = 34,78.$$

Коэффициент теплоотдачи масла:

$$L_{\text{м}} = Nu_{\text{м}} \frac{\lambda_{\text{м}}}{d_{\text{вн}}}; \quad (11)$$

$$L_{\text{м}} = 34,78 \frac{0,136}{0,021} = 225,27 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}.$$

Число Рейнольдса для воды:

$$Re_{\text{в}} = \frac{w_{\text{в}} d_{\text{вн}}}{\nu}; \quad (12)$$

$$Re_{\text{в}} = \frac{0,25 \cdot 0,015}{1,006 \cdot 10^{-8}} = 3727,63.$$

Число Нуссельта для воды:

$$Nu_{\text{в}} = 0,21 \cdot Re_{\text{в}}^{0,68} \cdot Pr_{\text{в}}^{0,43}; \quad (13)$$

$$Nu_{\text{в}} = 0,21 \cdot 37,27,63^{0,68} \cdot 7,02^{0,43} = 34,93.$$

Коэффициент теплоотдачи воды:

$$L_{\text{в}} = Nu_{\text{в}} \frac{\lambda_{\text{в}}}{d_{\text{вн}}}; \quad (14)$$

$$L_{\text{в}} = 34,93 \frac{0,599}{0,015} = 1395,22 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}.$$

Коэффициент теплоотдачи:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{225,27} + \frac{0,006}{46} + \frac{1}{1395,16}} = 189,75 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}.$$

Температура воды на выходе:

$$t_{\text{в2}} = t_{\text{в1}} + \frac{Q}{G_{\text{в}} \cdot C_{p\text{в}}};$$

$$t_{\text{в2}} = 18 + \frac{50,36}{1,4 \cdot 4,18} = 36,53 \text{ °C}.$$

Средний температурный напор:

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{2,317 \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}}; \quad (15)$$

$$\Delta t_1 = t_{n1} - t_{c2} = 80 - 36,53 = 43,4 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$\Delta t_2 = t_{n2} - t_{c1} = 60 - 18 = 42 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$\Delta t_{cp} = \frac{43,4 - 42}{2,317 \frac{43,4}{42}} = 38,5 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Площадь поверхности нагрева:

$$F = \frac{Q}{k \cdot \Delta t_{cp}} = \frac{50,36}{0,1897 - 38,5} = 6,92 \text{ м}^2. \quad (16)$$

Число труб:

$$n = \frac{F}{l \cdot 2 \cdot \pi \cdot \alpha} = \frac{6,92}{1,4 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 0,021} = 37,48 \approx 38 \text{ шт.} \quad (17)$$

Таким образом, для водомасляного теплообменника каждого модуля (первого контура) необходимо использовать трубки диаметром 21 мм и длиной 1,4 м в количестве 38 штук.

Второй контур состоит из охладителя воды, который представляет собой теплообменник водяного охлаждения (ОТ). Результаты расчета охладителя воды приведены в табл. 1.

Таблица 1.

Результаты расчета охладителя воды

Параметры	Величина
Температура горячей воды на входе в охладитель, °С	50
Температура горячей воды на выходе из охладителя, °С	42
Расход горячей воды, кг / с	8,08
Температура охлаждающей воды на входе в охладитель, °С	26
Температура охлаждающей воды на выходе из охладителя, °С	31
Расход охлаждающей воды, кг / с	5,79
Потери давления по горячей воде, кПа	48,3
Потери давления по охлаждающей воде, кПа	31,3
Габариты охладителя (длина x высота x толщина), мм	320x832x375

Как видно из табл. 1, охладитель воды при ее расходе 5,79 кг/с может быть выполнен достаточно компактным и приведен в составе системы охлаждения ПАКС.

Применение замкнутой двухконтурной системы охлаждения позволяет избежать ускоренного загрязнения теплопередающих поверхностей теплообменников модулей и увеличивает срок их эксплуатации без ремонтов.

На основе расчетных теплотехнических данных, которые приведены выше, а также опыта создания теплообменников для аналогичных систем была разработана конструкторская документация общей системы охлаждения ПАКС, работающей в горной выработке шахты.

На рис. 1 приведена общая система охлаждения ПАКС, состоящая из четырех модулей.

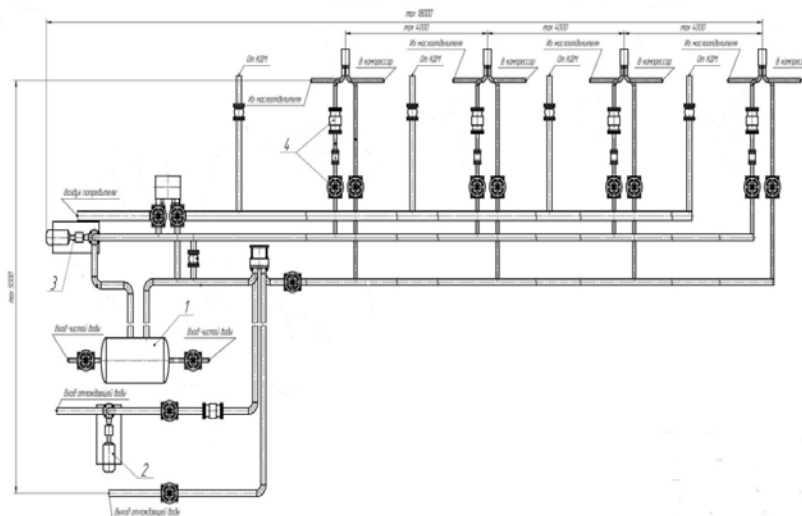


Рис. 1. Общая система охлаждения модулей ПАКС

Общая система охлаждения состоит из гидравлической сети с общими элементами для всех модулей ПАКС: водяная емкость 1, шламоуловитель 2, насос 3, запорная арматура 4 и др., а также отдельных гидравлических систем и запорной арматуры для каждого модуля.

В общей системе охлаждения ПАКС применен оригинальный эффективный пластинчатый водовоздушный охладитель (рис. 2), а в системах охлаждения каждого модуля использованы водомаслянные охладители, которые разработаны АО «НПАО «ВНИИкомпрессормаш» совместно с НИИГМ им. М.М.Федорова.

При конструировании водоохлаждаемого теплообменного устройства были учтены

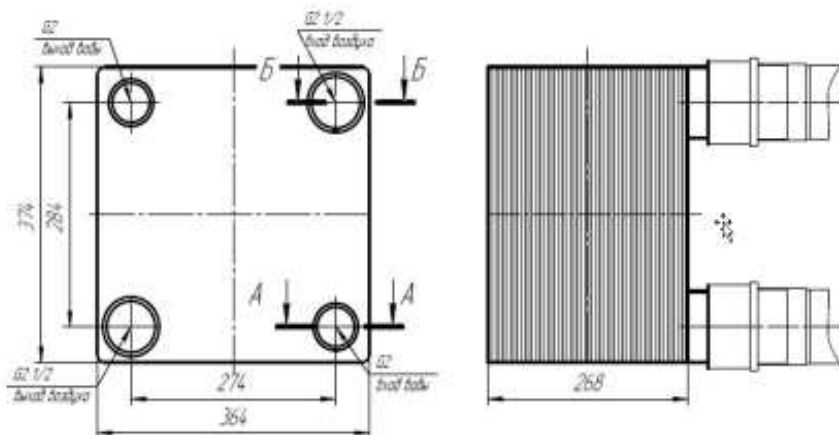


Рис. 2. Водовоздушный охладитель ПАКС

недостатки в работе теплообменников, применяемых на серийных винтовых компрессорных установках 6ВКМ-25/8. Наблюдение за работой этих установок проводилось на шахте им. В.В.Вахрушева ГП «Ровенькиантрацит».

В существующей конструкции теплообменника (охладителя масла) проходное сечение каждого канала $d_{\text{вн}}=9$ мм, длина 1300 мм, трубный пучок приварен с обеих сторон к стальным плитам, которые, в свою очередь,

приварены к внешнему корпусу.

Такой теплообменник является неразборной конструкцией со стороны прохода охлаждающей жидкости (масла). Это не позволяет проводить эффективную очистку теплообменника от нагаромасляных отложений, малоэффективен также и контроль за эффективностью очистки. Малые сечения трубок приводят к быстрому их заиливанию. Как показали предыдущие исследования, в полостях теплообменника со стороны входа воды скапливаются достаточно крупные частицы, что вызывает закупорку трубок для прохода воды. Теплообменник установки 6ВКМ-25/8 был подключен к шахтному противопожарному водопроводу, и после 300 часов работы была проведена его ревизия. В составе механических примесей на входе устройства были обнаружены частицы различной величины, в том числе диаметром более 10 мм. На выходе из теплообменного устройства и в трубках скапливаются в основном мелкие загрязнения.

Приведенные недостатки в работе теплообменных устройств, изготавливаемых для винтовых компрессорных установок общепромышленного применения, указывают на необходимость их конструктивного усовершенствования для использования в шахтных условиях в системе охлаждения ПАКС.

На рис. 3 приведен вариант конструкции модернизированного водоохлаждаемого теплообменного устройства для модулей ПАКС. Устройство состоит из двух разборных цилиндрических корпусов 1, к которым присоединены входной патрубков 2 и выходной 3 для подвода охлаждающей рабочей среды (масла). Через коллектор 4 осуществляется подвод воды, а через коллектор 5 – его отвод. Рабочая жидкость (масло) циркулирует в межтрубном пространстве, а вода проходит внутри пучка трубок, который закреплен в специальных плитах, закрепленных, в свою очередь, в корпусе устройства фланцами. При этом весь трубный пучок извлекается из корпуса в сторону подвода охлаждающей воды. Такая конструкция

теплообменного устройства позволяет достаточно эффективно осуществлять очистку и контроль всех теплообменных поверхностей, в том числе и в межтрубном пространстве.

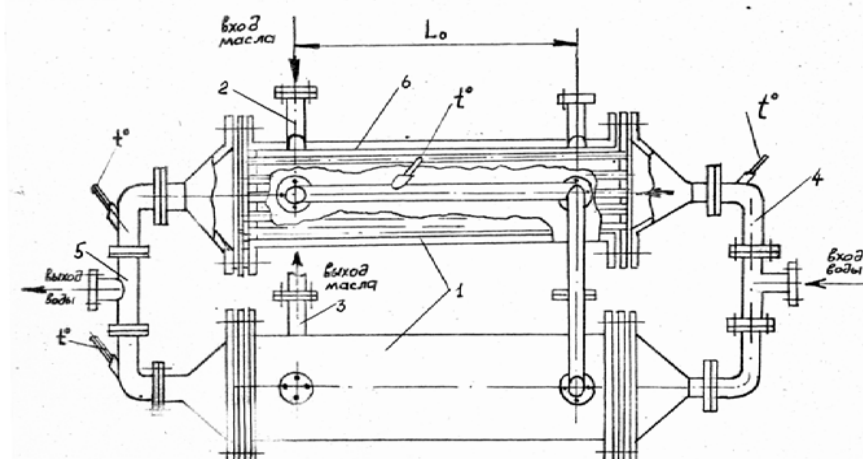


Рис. 3. Вариант конструкции водоохлаждаемого теплообменного устройства для модулей ПАКС

Основная цель разработки таких теплообменных устройств для модулей заключается в обеспечении эффективным охлаждением ПАКС с минимальным тепловыделением в окружающую среду.

Выводы.

1. Для интенсификации добычи угля в глубоких шахтах в большинстве случаев необходимо предусмотреть создание ПАКС различной производительности для выработки газообразного азота и применения его в технологическом процессе угледобычи.
2. Для эффективного функционирования ПАКС необходимо обеспечить допустимый тепловой режим в горной выработке за счет применения двухконтурной системы охлаждения.
3. Теплотехнический расчет системы охлаждения подземной модульной азотно-компрессорной станции ПАКС показал, что элементы этой системы могут быть выполнены достаточно компактными при использовании в ней современных конструкционных материалов.

Литература

1. Алексеев А.Д. Численное моделирование выхода метана из угля с учетом волны разгрузки и раскрытия пористости при изменении напряжений / А.Д.Алексеев, Г.П.Стариков, А.Э.Филиппов // Проблемы горного давления: сб. научн. тр. ДонНТУ. 2003.– №3. – Донецк, 2003. – С. 30-34.
2. Алексеев А.Д. Опыт исследования разных форм наличия метана и его объема в угленосной толще / А.Д.Алексеев, В.Г.Гринев, Г.П. Стариков // Добыча и использование газа метана: привлечение инвестиций: междунар. научн.-практич. конф., 18 сентября 2009 г. – Донецк, 2009.
3. Патент №61850 Україна, E21F5/00, A62C3/00, 3/02. Спосіб вироблення газоподібного азоту з атмосферного повітря за допомогою азотно – компресорної установки / Грядущий Б.А., Лобода В.В., Коваль А.М., Філімонов С.Г., Пашковський П.С., Жарков П.Є., Лавренко О.М., (Україна); ВАТ «НДІГМ ім. М.М.Федорова»; №2003087401; заявл. 05.08.2003; опубл. 15.09.2005, Бюл. № 9.
4. Патент №34114 Україна, МПК (2006) E21F7/00, E21F5/20 (2008.1). Спосіб підвищення безпеки та ефективності процесу руйнування гірського масиву комбайном і бурильною установкою / Лобода В.В., Грядущий Б.А., Коваль А.М., Кірік Г.В., Жарков П.Є., Лаврінко О.М., Лісовий С.Г. (Україна); ВАТ «НДІГМ ім. М.М.Федорова»; №U200803521; заявл. 19.03.2008; опубл. 25.07.2008, Бюл. № 14.
5. Лобода В.В. Обгрунтування параметрів процесу інертизації вибухонебезпечного середовища газоподібним азотом в очисних вибоях вугільних шахт / В.В. Лобода // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2012. – №3(29). – С.8-11.
6. Правила безпеки в угольних шахтах: НПАОП 10.0-1.01-10. – Харьков: Изд-во «Форт», 2010. – 255 с.

*Статья рекомендована к публикации
канд. техн. наук Стешенко В.А.*