УДК 622.258

А.Ю.ПРОКОПОВ, *д-р техн. наук, профессор, prokopov72@rambler.ru*
В.Л.СКЛЕПЧУК, *ассистент*
Шахтинский институт (филиал) Южно-Российского государственного технического университета (Новочеркасский политехнический институт)

A.Yu.PROKOPOV, *Dr. in eng. sc., professor, prokopov72@rambler.ru*
V.L.SKLEPCHUK, *assistant lecturer*
Shakhty Institute (branch) of South Russian State Technical University (Novocherkassk Polytechnic Institute)

ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТВОЛОВ, ПРОХОДИМЫХ В УСЛОВИЯХ НЕФТЕГАЗОПРОЯВЛЕНИЙ

Определены основные производственно-технологические факторы, влияющие на степень взрывоопасности воздушной среды в вертикальных стволах. Разработана математическая модель динамики газовыделения в ствол. Предложены меры по повышению безопасности проходки стволов в условиях нефтегазопроявлений.

***Ключевые слова*:** вертикальный ствол, буровзрывные работы, вентиляция, водоотлив, крепление, нефтегазопроявления, математическая модель.

TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF VERTICAL SHAFTS, WHICH ARE SINKING IN THE PRESENCE OF OIL AND GAS, ARE PROVED

The cores are defined is industrial-technology factors, influencing degree of explosion hazard of the air environment in vertical shafts. The mathematical model of dynamics of liberation of gas in a shaft is developed. Some measures are suggested to increase safety of sinking shafts in the presence of oil and gas.

***Key words*:** vertical shaft, drilling and blasting operations, ventilation, drainage, support, presence of oil and gas, mathematical model.

Увеличение глубин разработки связано с ухудшением горно-геологических условий. В ряде случаев проходка глубоких вертикальных стволов ведется с пересечением газоносных пластов, при этом в забое и по всей глубине ствола могут образовываться взрывоопасные смеси воздуха с метаном, его гомологами (этаном, пропаном, бутаном и более высокими) и другими взрывоопасными газами. Такие условия имели место при проходке вертикальных стволов подземных рудников «Мир» и «Удачный» АК «Алроса», при пересечении газоносных пластов ряда сверхкатегорийных шахт Кузбасса (шахты «Юбилейная», «Бутовская» и др.), Донбасса (шахты «Красноармейская Западная № 1», «Им.А.Ф.Засядько») и др.

Мероприятиям по пожаро- и взрывозащите вертикальных стволов в периоды их проходки и эксплуатации уделяется недостаточное внимание. Остается непроработанным ряд теоретических вопросов и практических задач по обеспечению безопасности и технико-экономической эффективности проходки вертикальных стволов шахт и рудников при пересечении зон нефтегазопроявлений. Это приводит к возникновению пожаров, взрывов газовоздушных смесей (ГВС) в стволах [1], а также значительному снижению темпов проходки из-за неправильного проектирования параметров проветривания и технологии буровзрывных работ [2].

Целью настоящей работы является научное обоснование технологических пара-

метров сооружения вертикальных стволов в условиях нефтегазопроявлений на основе выявленных закономерностей формирования взрывоопасной среды.

Основными геотехнологическими факторами, влияющими на суммарное газовыделение в ствол, являются величина заходки за цикл и диаметр ствола, при этом связь между указанными параметрами и газовыделением близка к линейной. Так, увеличение длины заходки с 1,5 до 4 м приводит к увеличению прогнозируемого газовыделения в 2,3-2,5 раза в стволах большого диаметра (8-9 м) и почти в 3 раза в стволах диаметром 6 м.

Основными факторами, определяющими вероятность возникновения воспламенения и взрыва ГВС в призабойном пространстве ствола, являются тип и количество одновременно взрываемых ВВ, определяющих соответственно максимальную температуру и суммарную энергию продуктов взрыва. Вследствие этого параметры БВР при проходке ствола должны быть ограничены по двум указанным факторам.

Полученное авторами аналитическое выражение для расчета максимально допустимого количества одновременно взрываемого ВВ по фактору недопущения нагревания ГВС в призабойном пространстве до температуры самовоспламенения, учитывающая состав смеси газов, состав ВВ, диаметр ствола и критическую дальность разлета высокотемпературных продуктов взрыва, имеет вид:

$$m_{\text{ВВ}} < \frac{R\Delta T L_{\text{к}} S_{\text{св}} \sum_{j=1}^{n} \frac{\rho_j n_j}{M_j}\left(\frac{i_j}{2}+1\right) M_{\text{ВВ}}}{\sum_{i=1}^{n} q_i n_i - \sum_{i=1}^{n} Q_{\text{ВВ}\,i}\, N_i + \sum nRT},$$

где R – универсальная газовая постоянная, $R = 8{,}31$ Дж/(моль·К); ΔT – изменение температуры ГВС в призабойной зоне ствола, К; $L_{\text{к}}$ – критическая дальность разлета высокотемпературных продуктов взрыва, м; $S_{\text{св}}$ – площадь сечения ствола в свету, м^2; ρ_j, n_j, M_j – соответственно, плотность, кг/м^3, концентрация и молярная масса, кг/моль, j-го газа в смеси; i_j – количество степеней свободы молекулы j-го газа, для одноатомных газов (аргон) $i = 3$, для двухатомных (кислород, азот, угарный газ) $i = 5$, для многоатомных (углекислый газ, метан, этан, пропан, бутан и др.) $i = 6$; $M_{\text{ВВ}}$ – молярная масса ВВ, кг/кмоль; q_i – молярная теплота образования i-го продукта взрыва (при $P = 101{,}3$ кПа и $T = 288$ К), кДж/кмоль; n_i – количество киломолей i-го продукта взрыва 1 кмоля ВВ; $Q_{\text{ВВ}i}$ – удельная теплота образования i-го компонента смесевого ВВ, кДж/кмоль; N_i – количество киломолей i-го компонента ВВ согласно стехиометрической реакции взрывчатого разложения; $\sum n$ – суммарное количество молей продуктов взрыва; T – температура в забое до взрыва, К.

Проверочные расчеты для условий наиболее опасных участков вертикальных стволов подземного рудника «Удачный» свидетельствуют о том, что в зависимости от типа ВВ и диаметра ствола вчерне допустимая масса одновременно взрываемого ВВ колеблется от 87 до 237 кг.

Исходя из допустимой массы ВВ, диаметра ствола и удельного расхода ВВ, определена максимально допустимая величина заходки за цикл по фактору недопущения нагрева ГВС в призабойной зоне до температуры ее самовоспламенения

$$l_{\text{зах}} < \frac{4m_{\text{ВВ}}}{\pi\left(D_{\text{св}} + 2t_{\text{кр}}\right)^2 q_{\text{ВВ}}},$$

где $q_{\text{ВВ}}$ – удельный расход ВВ, кг/м^3; $D_{\text{св}}$ – диаметр ствола в свету, м; $t_{\text{кр}}$ – толщина крепи ствола, м.

В слабых породах ($f = 3$-4), величина заходки не является ограничивающим фактором, так как допустимое количество ВВ может обеспечить заходку 5-6 м, что выше фактически проектируемой при современных средствах механизации бурения шпуров и крепления. В породах средней крепости ($f = 5$-8) величина заходки должна быть ограничена 2-4 м, а в крепких ($f \geq 9$) – 1,5-2,5 м в зависимости от типа применяемого ВВ и диаметра ствола в проходке.

Во многих случаях пожары и взрывы происходят не в результате нагрева ГВС до температуры самовоспламенения, а вследствие возникновения открытого огн я или искр различной природы. В этом случае

опасность воспламенения ГВС не зависит от массы одновременно взрываемого ВВ, а лишь от температуры взрыва и индукционного периода. Снизить начальную температуру взрыва геотехнологическими факторами невозможно. Ее снижение достигается только конструированием предохранительных ВВ, содержащих пламегасители – отрицательные гетерогенные катализаторы (поваренная соль, хлорид калия, сульфат калия, фторид калия, карбонат кальция и мн. др.).

Для изучения динамики газовыделения в ствол в увязке с технологическими параметрами авторами построена математическая модель газовыделения в призабойное пространство ствола из отбитой взрывом горной массы в период проветривания и погрузки породы. Изменение удельного газовыделения из разрушенной взрывом породы со временем описывается сплайн-функцией, каждый из четырех отрезков которой определяет характерный временной промежуток, в частности, в 1-м и 2-м условных периодах изменение удельного газовыделения описывается логарифмической, а в 3-м и 4-м периодах – гиперболической функцией:

$$f_1(t)=\begin{cases} a_1\ln t+b_1,\ \forall t\in[t_0,t_1];\\ a_2\ln t+b_2,\ \forall t\in[t_1,t_2];\\ \dfrac{a_3}{t}+b_3,\ \forall t\in[t_2,t_3];\\ \dfrac{a_4}{t}+b_4,\ \forall t\in[t_3,t_4], \end{cases}$$

где a_i, b_i – коэффициенты аппроксимации функции на i-м отрезке (полуинтервале) времени; $t_0 \to 0$; $t_1 \approx 0{,}2$ мин; $t_2 \approx 1$ мин; $t_3 \approx 10$ мин; t_4 – момент времени окончания газовыделения в ствол из взорванных пород, мин,

$$t_4=\min\{t_{\text{пр}}+t_{\text{погр}}, t_{\text{дрен}}\},$$

$t_{\text{пр}}$ – продолжительность проветривания после взрывных работ и приведения забоя в безопасное состояние, мин, определяемая паспортом БВР; $t_{\text{погр}}$ – продолжительность погрузки породы, мин, определяемая графиком организации работ; $t_{\text{дрен}}$ – период дренирования пород, мин, определяемый на основании лабораторных исследований.

Вследствие того, что при $t_4 \to t_{\text{дрен}}$

$$\int_{t_0}^{t_4} f_1(t)dt \to \sum G,$$

а также для каждого i-го интервала справедливо равенство

$$\int_{t_i}^{t_{i+1}} f_1(t)dt \to G^i_{\text{св}}+G^i_{\text{сор}},$$

коэффициенты аппроксимации a_i, b_i будут определяться суммарной газоносностью $\sum G$ и коэффициентом газоотдачи, равным

$$k_{\text{газ}}=\frac{G_{\text{св}}}{\sum G}=\frac{G_{\text{св}}}{G_{\text{св}}+G_{\text{ад}}+G_{\text{аб}}+G_{\text{хем}}},$$

где $G_{\text{св}}$ – газоносность пород, обусловленная наличием газов в свободном состоянии; м^3/м^3; $\sum G$ – суммарная газоносность, включающая газоносность вследствие свободного газа $G_{\text{св}}$, а также находящегося в адсорбированном $G_{\text{ад}}$, абсорбированном $G_{\text{аб}}$ и хемосорбированном $G_{\text{хем}}$ состояниях.

Параметры, входящие в эту формулу, определяются экспериментально. Для условий вертикальных стволов рудника «Удачный» значение $k_{\text{газ}}$ колеблется по глубине в пределах 0,22-0,4. При этом на долю метана приходится 30-60 % свободных газов, а в сорбированных газах превалируют его гомологи, суммарная доля которых составляет 65-80 % [3].

Исходя из непрерывности сплайн-функции $f_1(t)$ на всей области определения и установленных соотношений между выделением свободных и сорбированных газов (см.таблицу), получены уравнения для расчета коэффициентов аппроксимации:

$$\begin{cases} a_1=\dfrac{0{,}3k_{\text{газ}}\sum G.}{t_1\left(\ln\dfrac{t_1}{t_0}-1\right)};\\ b_1=-a_1\ln t_0; \end{cases}$$

$$\begin{cases} a_2=\dfrac{0{,}1(5k_{\text{газ}}+1)\sum G-f_1(t_1)(t_2-t_1)}{t_2\left(\ln\dfrac{t_2}{t_1}-1\right)+t_1};\\ b_2=f_1(t_1)-a_2\ln t_1; \end{cases}$$

Соотношения между выделением свободных и сорбированных газов в ствол после взрывных работ в различные периоды

Период	Время периода, мин	Удельное газовыделение, м³/м³		
		свободных газов $G_{св}^{i}$	сорбированных газов $G_{сор}^{i}$	общее G^{i}
1	0-0,2	$G_{св}^{1} \approx 0{,}3k_{газ}\sum G$	$G_{сор}^{1} \approx 0$	$G^{1} \approx 0{,}3k_{газ}\sum G$
2	0,2-1	$G_{св}^{2} \approx 0{,}6k_{газ}\sum G$	$G_{сор}^{2} \approx 0{,}1(1-k_{газ})\sum G$	$G^{2} \approx 0{,}1(5k_{газ}+1)\sum G$
3	1-10	$G_{св}^{3} \approx 0{,}1k_{газ}\sum G$	$G_{сор}^{3} \approx 0{,}4(1-k_{газ})\sum G$	$G^{3} \approx 0{,}4(1-0{,}75k_{газ})\sum G$
4	> 10	$G_{св}^{4} \approx 0$	$G_{сор}^{4} \approx 0{,}5(1-k_{газ})\sum G$	$G^{4} \approx 0{,}5(1-k_{газ})\sum G$
Всего	t_0-t_4	$G_{св} = k_{газ}\sum G$	$G_{сор} = (1-k_{газ})\sum G$	$G = \sum G$

$$\begin{cases} a_3 = \dfrac{0{,}4(1-0{,}75k_{газ})\sum G - f_1(t_2)(t_3 - t_2)}{\ln\dfrac{t_3}{t_2} - \dfrac{t_3}{t_2} + 1}; \\ b_3 = f_1(t_2) - \dfrac{a_3}{t_2}; \end{cases}$$

$$\begin{cases} a_4 = \dfrac{0{,}5(1-k_{газ})\sum G - f_1(t_3)(t_4 - t_3)}{\ln\dfrac{t_4}{t_3} - \dfrac{t_4}{t_3} + 1}; \\ b_4 = f_1(t_3) - \dfrac{a_4}{t_3}. \end{cases}$$

Изменение концентрации взрывоопасных газов в призабойном пространстве ствола со временем зависит от динамики удельного газовыделения, величины заходки за цикл, коэффициента газоотдачи и подачи свежего воздуха в забой ствола. Максимальное значение концентрации углеводородных газов (УВГ) в условиях подземного рудника «Удачный» возникает в первые 10-15 с после взрыва и может достигать 10-23 % (при коэффициенте газоотдачи $k_{газ} = 0{,}1$); 25-47 % (при $k_{газ} = 0{,}3$) и 34-57 % ($k_{газ} = 0{,}5$) в зависимости от длины заходки.

В определенные промежутки времени (от нескольких секунд до нескольких минут) в призабойном пространстве ствола даже при минимальной величине заходки ($l_{зах} = 1{,}5$ м) и применении наиболее мощных вентиляторов местного проветривания (Q до 30 м³/с) может возникать взрывоопасная концентрация газов, продолжительность существования которой зависит от величины заходки, коэффициента газоотдачи и подачи воздуха, и в условиях стволов рудника «Удачный» колеблется в пределах от 1,38 до 3,9 мин.

В тех случаях, когда технические и технологические средства не обеспечивают один из уровней взрывозащиты вертикального ствола – недопущение взрывоопасной концентрации газов, требуются дополнительные уровни взрывозащиты:

– недопущение источников воспламенения взрывоопасных ГВС;

– создание предохранительной среды;

– локализация и подавление взрыва.

При низком коэффициенте газоотдачи ($k_{газ} = 0{,}1$) в момент начала погрузки газовыделение из взорванных пород остается еще достаточно высоким (более 6 м³/мин для условий стволов рудника «Удачный»), поэтому увеличение производительности погрузки породы положительно сказывается на динамике снижения газовыделения вследствие быстрого уменьшения газонасыщенных пород в забое. С увеличением коэффициента газоотдачи влияние производительности погрузки на снижение газовыделения существенно уменьшается, так как уже в момент начала погрузки весь свободный и часть сорбированного газа удалена средствами вентиляции, газовыделение не превышает 2-2,3 м³/мин, а затем быстро снижается в течение первого часа погрузки до 0,6-1,5 м³/мин, в течение 2 ч – до 0,1-1,25 м³/мин в зависимости от эксплуатационной производительности стволовой погрузочной машины в 1-й фазе погрузки.

С высокой теснотой корреляционной связи ($R^2 = 0{,}85$-$0{,}98$), при отсутствии вентиляции увеличение концентрации УВГ, обусловленное выделением из газонасыщенных рассолов, происходит линейно с течением времени. Это свидетельствует о

равномерности газовыделения из рассолов и равномерном водопритоке в забой выработки. Разница между производительностью водоотлива $Q_в$ и притоком рассолов в ствол $Q_п$ определяет динамику газовыделения в ствол из газосодержащих рассолов. При $Q_в = Q_п$ объем рассолов в забое остается примерно одинаковым в течение всего времени погрузки и постепенное уменьшение газовыделения происходит только вследствие естественного снижения газонасыщенности рассолов. При $Q_в > Q_п$ снижение газовыделения происходит более интенсивно вследствие удаления части растворенных газов на поверхность средствами водоотлива. В условиях рудников «Удачный» и «Айхал» доля УВГ, выделяющихся из рассолов, не превышает 2,5-4 % от общего газовыделения в ствол, поэтому эти газы не могут оказывать решающего влияния на возникновение взрывоопасной концентрации УВГ в стволе.

Удельное газовыделение из незакрепленных стенок ствола зависит, главным образом, от коэффициента газоотдачи $k_{газ}$, при этом наблюдается динамика плавного снижения газовыделения с течением времени. Снизить газовыделение в ствол из боковых пород можно либо предварительной дегазацией околоствольного массива, либо возведением газонепроницаемой крепи в части призабойного пространства в период погрузки. Применение набрызгбетонирования после частичной уборки пород в стволе позволяет снизить газовыделение из обнаженных боковых поверхностей на 25-30 %, что в итоге приводит к снижению суммарного газовыделения в ствол из всех описанных источников при высоком коэффициенте газоотдачи ($k_{газ} = 0,5$) на 14-17 %; при среднем ($k_{газ} = 0,3$) на 9-12 %, при низком ($k_{газ} = 0,1$ и ниже) применение набрызгбетонирования боковых пород становится малоэффективным, так как позволяет снизить суммарное газовыделение в ствол не более, чем на 3-5 %.

На основании выполненных исследований авторами разработана концепция взрывозащиты вертикальных стволов, включающая четыре линии (уровня) и обеспечивающая требуемый уровень безопасности ведения горно-проходческих работ в условиях нефтегазопроявлений [4].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Склепчук В.Л.* О результатах расследования аварий при строительстве стволов подземного рудника «Удачный» / В.Л.Склепчук, С.Г.Страданченко, А.Ю.Прокопов // Матеріали міжнародної конференції «Підземні катастрофи: моделі, прогноз, запобігання»; Національний гірничий університет. Дніпропетровськ, 2009. С.128-133.

2. *Склепчук В.Л.* О результатах хронометражных наблюдений за ведением буровзрывных работ и проветриванием при проходке скипового ствола подземного рудника «Мир» АК «Алроса»/ В.Л. Склепчук, А.Ю. Прокопов, С.А. Масленников // Совершенствование технологии строительства шахт и подземных сооружений: Сб.науч.тр. Донецк: Норд-пресс, 2010. Вып.16. С.86-88.

3. Отчет о научно-технической работе «Комплекс работ по определению горючих и взрывчатых газов, выделяющихся при проходке вентиляционного вспомогательного ствола рудника Удачный...» / ФГУП НЦ ВостНИИ. Кемерово, 2006. 31 с.

4. *Скобликов В.В.* Концепция взрывозащиты вертикальных стволов, сооружаемых в условиях нефтегазопроявлений / В.В.Скобликов, В.Л.Склепчук, А.Ю.Прокопов // Известия ТулГУ. Естественные науки. Вып. 3. Тула: Изд-во ТулГУ, 2009. С. 310-316.

REFERENCES

1. *Sklepchuk V.L.* About results of investigation of failures at building of shafts of underground mine «Udachny» / V.L.Sklepchuk, S.G. Stradanchenko, A.Ju. Prokopov // Materials of the international conference «Underground accidents: models, the forecast, avoidance»; Dnepropetrovsk: National mountain university, 2009. – P. 128 – 133.

2. *Sklepchuk V.L.* About results time study over conducting drilling and blasting operations and ventilation freight shaft of the Mir underground mine of JSC «Alrosa» / V.L.Sklepchuk, A.Ju.Prokopov, S.A.Maslennikov // Perfection of technology of building of mines and underground constructions. Donetsk: North-press, 2010. Release 16. P.86-88.

3. The report on scientific and technical work «the Complex of works by definition of the combustible and explosive gases allocated at sinking of a ventilating shaft of mine «Udachny...» / FSUE Centre of science EastSRI. Kemerovo, 2006. 31 p.

4. *Skoblikov V.V.* The concept of protection against explosion of vertical shafts in the presence of oil and gas / V.V.Skoblikov, V.L.Sklepchuk, A.Ju. Prokopov // News of the Tula State University. Natural sciences. Release 3. Tula: Publishing house TulSU, 2009. P. 310-316.