УДК 624.1

А.А. Насонов

ЭФФЕКТИВНЫЕ ГЕОТЕХНОЛОГИИ СООРУЖЕНИЯ СВЕРХГЛУБОКИХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТВОЛОВ

Установлено, что фактическая производительность проходческого подъема в сверхглубоких стволах в 2—4 раза ниже, чем в стволах глубиной до 1200 м. Возможности многоканатных машин позволяют теоретически достигать производительности подъема до 70 м^3/ч, однако это требует совершенствования схем оснащения стволов, более четкой увязки работ по уборке породы и ее транспортированию на поверхность. В сверхглубоких стволах участки ствола в породах малой и средний крепости относятся к категории неустойчивых, что вызывает необходимость реализации соответствующих мер по проходке и креплению. Обеспечить снижение затрат на крепление можно при переходе на параллельные схемы строительства стволов с временной крепью из набрызгбетона и анкеров. При этом в сложных условиях требуется организация мониторинга системы «крепь — массив». Для сокращения сроков строительства сверхглубоких стволов необходимо совмещение во времени основных этапов строительства ствола. Для этого целесообразно применять схему оснащения с использованием башенного металлического копра и постоянных многоканатных машин. Ствол проходится с одновременным монтажом армировки, которая будет обеспечивать направленное движение подъемных сосудов с высокими скоростями. Приствольные выработки сооружаются одновременно с проходкой ствола по параллельной схеме с применением механизированных или роботизированных комплексов. Реализация данных подходов теоретически позволит сократить сроки строительства сверхглубоких стволов в 1,5—2,0 раза.

Ключевые слова: сверхглубокий ствол, срок строительства, проходческий подъем, оснащение, крепь, устойчивость, мониторинг

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-1-0-26-33

XXI век характеризуется переходом к разработке все более глубоких месторождений твердых полезных ископаемых по всему миру. В ЮАР в настоящее время эксплуатируются три шахты с глубинами разработки свыше 3 км, в США, Индии, России и ряде других стран ведется подготовка и освоение недр на глубинах более 2 км.

Вскрытие таких месторождений осуществляется комплексом сверхглубоких вертикальных стволов, которые представляют собой уникальные подземные сооружения, не имеющие аналогов. В соответствии с зарубежной классификацией к сверхглубоким принято относить стволы протяженностью более 1500 м. Стоимость их строительства составляет сотни миллионов долларов, общая продолжительность работ достигает 10 лет. При таких параметрах вопросы экономической эффективности капитальных вложений для инвесторов встают особенно остро, а разработка новых технических и технологических решений, направленных на снижение сроков и затрат при

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 1. С. 26–33.
© А.А. Насонов. 2018.

Оптимальные решения для строительства стволов различной глубины

Тип стола	Схема оснащения	Схема проходки, проходческий комплекс
Малой глубины (до 200 м)	Проходческие копры, передвижные машины типа ППМ-2х1,5	Последовательная, двухэтажный облегченный полок, грузчики с ручным вождением типа КС-3, ручные перфораторы (механизированный способ — машины типа VSM-100). Вес смонтированного оборудования в стволе до 120 т
Средней глубины (200—1000 м)	Проходческие или постоянные копры, передвижные машины типа МПП-9 или МПП-17,5	Совмещенная, трехэтажный полок, грузчики с механизированным вождением типа КС-2у/40, установки типа БУКС-1м или зарубежные аналоги (механизированный способ — машины типа SBR). Вес смонтированного оборудования в стволе до 320 т
Глубокие (1000—1500 м)	Постоянные копры и многоканатные подъемные машины	Параллельная схема, четырех — пятиэтажный полок, грузчики с механизированным вождением, высокопроизводительные бурильные установки (механизированный способ — машины типа SBM). Вес монтированного оборудования в стволе до 2800 т
Сверхглубокие (1500—2500 м)	Постоянные копры и многоканатные подъемные машины максимальной производительности	Параллельная схема с одновременным армированием, семиэтажный полок, грузчики с механизированным вождением, высокопроизводительные бурильные установки (механизированный способ — машины типа SBM). Вес монтированного оборудования в стволе до 2800 т

строительстве сверхглубоких стволов, является весьма актуальной [1—2].

Системный анализ опыта строительства вертикальных стволов в России и в ведущих горнодобывающих странах мира позволяет выделить наиболее эффективные решения в зависимости от глубины ствола при обычном способе строительства (таблица).

Отличительной особенностью проходки сверхглубоких вертикальных стволов являются значительный рост веса стволового комплекса, энерговооруженности и других параметров проходки. В то же время скорости строительства стволов с увеличением глубин уменьшаются.

Одной из основных причин такого положения является снижение произво-

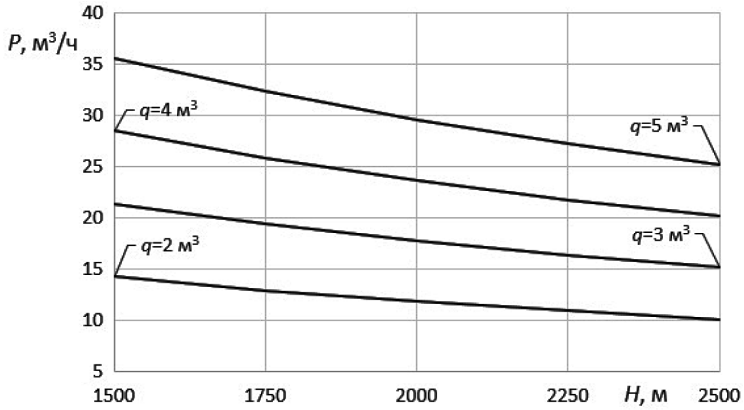

Рис. 1. Графики зависимостей производительности двухступенчатого проходческого подъема от глубины ствола при различной вместимости проходческих бадей

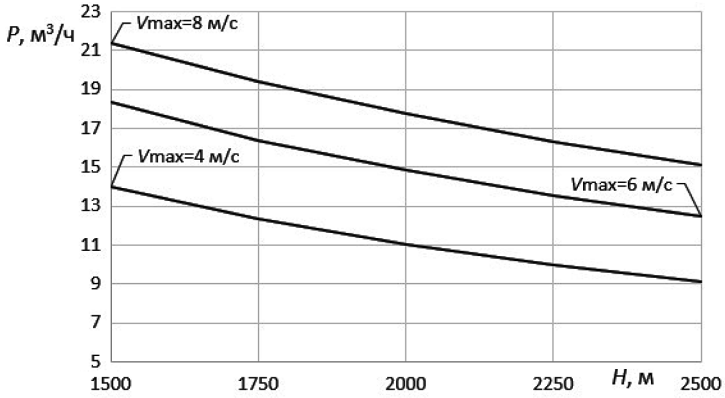

Рис. 2. Графики зависимостей производительности двухступенчатого проходческого подъема от глубины ствола при различной максимальной скорости подъема

дительности проходческого подъема в столе, обусловленное ростом глубин.

Так сравнение двух возможных вариантов организации подъема в сверхглубоком стволе: с применением промежуточного подземного горизонта и временных или постоянных подъемных машин и с применением высокопроизводительных многоканатных машин показывает, что основными факторами, определяющими количественные показатели производительности подъемной машины, являются глубина ствола, вместимость бадьи и скорость подъема. Результаты анализа влияния этих факторов в графической форме для двухступенчатого подъема приведены на рис. 1 и 2.

Анализ представленных данных показывает, что фактическая производительность двухступенчатого подъема в сверхглубоких стволах в 2 — 4 раза ниже, чем в стволах глубиной до 1200 м. Даже при перспективном повышении максимальной скорости подъема до 12 м/с и применении бадей вместимостью 5 м^3, производительность подъема остается недостаточной для обеспечения стабильно высоких скоростей проходки ствола. Необходимость устройства промежуточного подземного горизонта также приводит к дополнительным материальным затратам и потерям времени.

Возможности многоканатных машин позволяют теоретически достигать при

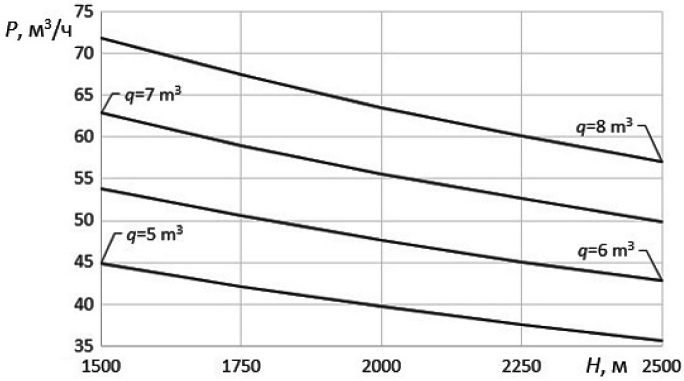

Рис. 3. Графики, зависимостей перспективной производительности проходческого подъема от глубины ствола при применении многоканатных подъемных машин и подъемных сосудов большой вместительности

проходке ствола скоростей подъема 16 м/с и применять подъемные сосуды вместимостью до 8 м^3 и более. Расчетная производительность подъема при таких эксплуатационных параметрах может достигать 70 м^3/ч (рис. 3), что в два раза больше чем у ранее рассмотренной двухступенчатой схемы.

Однако для достижения таких показателей необходимо дальнейшее совершенствование схем оснащения стволов, внедрение новых высокоскоростных бадейных комплексов, более четкая увязка работ по уборке породы и ее транспортированию на поверхность.

Другим важным аспектом, обуславливающим низкие технико-экономические показатели строительства стволов большой глубины, является ухудшение горно-геологических условий строительства. Основным параметром для их оценки является критерий устойчивости пород *C* в соответствии с СП 91.13330.2012, который для протяженных участков ствола определяется его расчетной глубиной, прочностью, трещиноватостью и углом залегания пород, а также давлением подземных вод. Расчетная глубина ствола в свою очередь определяется фактической глубиной и коэффициентом бокового распора пород.

На рис. 4 в качестве примера приведены графики зависимостей критерия устойчивости *C* от прочности вмещающих пород для стволов глубиной 500, 1500 и 2500 м при усредненных параметрах породного массива и давления подземных вод. Из рисунка видно, что в сверхглубоких стволах участки ствола в породах малой и средний крепости относятся к категории неустойчивых, что вызывает необходимость реализации соответствующих мер по проходке и креплению.

Обеспечить снижение затрат на крепление можно при переходе на параллельные схемы строительства стволов с временной крепью из набрызгбетона и анкеров. Она позволяет выполнить предварительную разгрузку пород в призабойном пространстве ствола, которое закрепляется преимущественно временной крепью из набрызгбетона и анкеров. Такая схема в частности реализована при сооружении сверхгубоких вертикальных стволов СКС-1 и ВС-10 шахты «Глубокая», г. Норильск. Утверждается, что переход на параллельную схему с

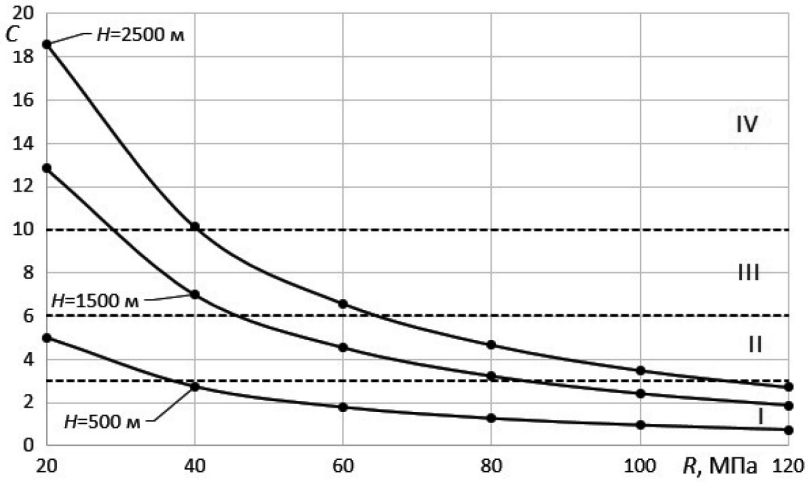

Рис. 4. Графики изменения критерия устойчивости C в зависимости от прочности пород и глубины ствола

элементами новоавстрийского метода управления породным массивом позволил снизить толщину бетонной крепи в среднем на 20 см по сравнению с совмещенной схемой работ [3].

В то же время необходимо отметить, что данные стволы сооружаются в породах большой прочности. В более сложных условиях управление состоянием призабойного массива ствола представляет собой достаточно сложную геотехническую задачу, которая требует организации системы мониторинга в стволе [4—5].

К наиболее простым решениям можно отнести геодезический контроль смещений стенок ствола и контроль растягивающих напряжений в анкерах путем установки с заданным шагом и частотой анкеров с тензометрическими датчиками. На основе этих данных можно уточнить фактический коэффициент бокового распора пород, величины нагрузок на основную крепь, напряженно-деформированное состояние крепи и окружающего породного массива.

Перспективным является внедрение технологий информационного моделирования на основе BIM-технологий, которые позволяют создать постоянно обновляемую модель призабойного пространства ствола и вести оперативное прогнозирование напряженно-деофрмированного состояния системы «крепь — массив», а также реализацию в необходимых случаях оперативных мер по повышению запаса ее устойчивости [6—12].

В то же время совершенствование проходческого подъема в стволе, внедрение более прогрессивных схем проходки не позволит полностью решить проблему снижения сроков строительства сверхглубоких стволов, так как цикл строительства включает в себя ряд отдельных этапов:

$$T_c = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5, \qquad (1)$$

где T_c — суммарная продолжительность работ (мес.), состоящая из продолжительностей: оснащения t_1, проходки основной части ствола t_2, проведения сопряжений и камер со стволом t_3, армирования стволов t_4, переоборудования ствола для проведения горизонтальных и наклонных выработок t_5.

При применении традиционных подходов эти этапы выполняются последовательно друг за другом и не позволяют обеспечить высокие скорости строительства стволов. Необходимо совмещение этих этапов во времени с применением наиболее прогрессивных технических и технологических решений.

Так в качестве наиболее эффективной схемы оснащения стволов можно выделить схему с использованием башенного металлического копра и постоянных многоканатных машин. При этом переход на постоянную схему оснащения возможен на различных этапах проходки ствола, как после сооружения технологического отхода протяженностью до 50—70 м, так и после проходки верхней части ствола на глубину до 500—700 м с применением временной схемы оснащения. Монтаж копра и постоянных машин производится одновременно с проходкой ствола с последующей установкой в проектное положение методом надвижки или другими высокоскоростными методами.

Ствол проходится с одновременным монтажом армировки, которая будет обеспечивать направленное движение подъемных сосудов с высокими скоростями. Вместо традиционных бадей необходимо внедрение универсальных проходческих подъемных сосудов нового поколения. При проходке в необходимых случаях организуется мониторинг напряженно-деформированного состояния системы «крепь — массив» в призабойной зоне.

Приствольные выработки проходятся одновременно с проходкой ствола по параллельной схеме с применением механизированных или роботизированных комплексов, исключающих необ-

ходимость применения буровзрывных работ. Реализация данных подходов теоретически позволит сократить сроки строительства сверхглубоких стволов в 1,5—2,0 раза, однако требует принципиально нового уровня организации горнопроходческих и монтажных работ, высокого профессионализма проходчиков и инженерно-технических служащих, разработки и внедрения новых решений по комплексам оснащения и проходки стволов. Шахтостроительные компании России в своем современном состоянии не способны обеспечить соблюдение этих требований, в связи с чем постепенно вытесняются с отечественного рынка зарубежными конкурентами. Без протекционистских мер со стороны государства в дальнейшем эта ситуация будет только усугубляться.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Плешко М. С.* О взаимном влиянии факторов, определяющих эффективность строительства и эксплуатации вертикального ствола // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2012. — № 8. — С. 53 — 56.

2. *Pleshko M. S.*, *Stradanchenko S. G.*, *Maslennikov S. A.*, *Pashkova O. V.* Study of technical solutions to strengthen the lining of the barrel in the zone of influence of construction near-wellbore production // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. Vol. 10, no 1, January 2015. pp. 14—19.

3. *Каледин О. С.* Инновационные технологии строительства сверхглубоких шахтных стволов // Горный журнал. — 2014. — № 4. — С. 77—81.

4. *Казикаев Д. М.*, *Сергеев С. В.* Диагностика и мониторинг напряженного состояния крепи вертикальных стволов. — М.: Горная книга, 2011. — 244 с.

5. *Страданченко С. Г.*, *Плешко М. С.*, *Армейсков В. Н.* О необходимости проведения комплексного мониторинга подземных объектов на различных стадиях жизненного цикла // Инженерный вестник Дона. — 2013. — № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1994.

6. *Zhang X., Han Y., Liu S., Su C.* Deformation prediction analysis model for the mine shaft-wall. Liaoning Gongcheng Jishu Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban). Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition), 2014, no 33 (8), pp. 1070—1073.

7. *Daller J., Žibert M., Exinger C., Lah M.* Implementation of BIM in the tunnel design — Engineering consultant's aspect. Geomechanics and Tunnelling. 2016. Vol. 9. pp. 674—683.

8. *Wang J., Hao X., Gao X.* The application of BIM technology in the con-struction of Hangzhou Zizhi tunnel. 3rd International Conference on Mechatronics, Robotics and Automation (ICMRA 2015). pp. 195—204.

9. *Jian-ping Z., Ding L., Jia-rui L.* Application of BIM in engineering con-struction [J]. Construction Technology, 2012, 41(371). pp. 10—14.

10. *You-quan X., Liu Xin L.* Study on flat organization structure of the large construction projects based on BIM[J]. Journal of Engineering Management, 2013, 27(1). pp. 44—47.

11. *Heikkilä R., Kaaranka A., Makkonen T.* Information Modelling based Tunnel Design and Construction Process. The 31st International Symposium on Automation and Robotics in Construction and Mining (ISARC 2014). pp. 672—675.

12. *Shen X., Lu M., Mao S., Wu X.* Integrated Approach to Machine Guidance and Operations Monitoring in Tunnel Construction The 31st International Symposium on Automation and Robotics in Construction and Mining (ISARC 2014). pp. 103—109. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Насонов Андрей Андреевич — кандидат технических наук, доцент,
Шахтинский институт (филиал)
Южно-Российского государственного
политехнического университета (НПИ) им. М.И. Платова,
e-mail: naanpi@rambler.ru.

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018. No. 1, pp. 26–33.

A.A. Nasonov

EFFECTIVE GEOTECHNOLOGY SINKING ULTRA-DEEP VERTICAL SHAFTS

XXI century is characterized by the transition to the development of deeper deposits of solid minerals worldwide. Their autopsy performed complex ultra-deep vertical shafts. The cost of the construction of hundreds of million dollars, the total duration of work is 10 years. With these parameters, issues of economic efficiency of capital investments rise is particularly acute for investors. A distinctive feature of super-deep sinking of vertical shafts is weight-are significant growth of stem complex, installed power and other parameters of tunneling. At the same time, the speed of construction of trunks with increasing depth decrease. One of the main reasons for this is the reduc-tion of the tunnel Flow rate rise in the table. It was found that the actual manufacturer of tunnel-lift in the ultra-deep shafts 2—4 times lower than in the cores to a depth of 1200 m Features multirope machines allow theoretically reach performance lifting up to 70 m^3/h, but it requires improvement schemes equipped kitchention trunks, a clear link between the work of cleaning the breed and its transportation to the on-surface.

Another important aspect is the deterioration of mining and geological conditions of con-struction. The ultra-deep hole section of the barrel in the short and medium strength rocks are classified as unstable, necessitating the implementation of the compliance of safety enhancements for the sinking and mounting. To provide lower costs for fastening possible in the transition to parallel circuit construction stems from the temporary support of shotcrete and anchors. In the difficult con-ditions required monitoring system organization «lining—Array.» Considering these factors, to re-duce the construction time is necessary to combine ultra-deep shafts in time the main stages of the construction of the shaft. To do this, it is advisable to apply the scheme using the equipment of the metal tower copra and permanent multirope machines. The trunk is passed with simultaneous instal-lation of mine shaft equipment, which will provide the directional movement of lifting vessels at high speeds. Tree trunks generation constructed simultaneously with the shaft sinking in parallel with the use of mechanized or robotic systems. Implementation of these approaches theoretically will reduce the construction time ultra-deep boreholes in 1.5—2.0 times.

Key words: ultra-deep shaft, the construction period, the rise of tunneling, equipment, lining, stability monitoring.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-1-0-26-33

AUTHOR

Nasonov A.A., Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor,
Shakhty Institute (branch) of Platov South-Russian
State Polytechnic University (NPI), 346500, Shakhty, Russia, e-mail: naanpi@rambler.ru.

REFERENCES

1. Pleshko M.S. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2012, no 8, pp. 53—56.

2. Pleshko M.S., Stradanchenko S.G., Maslennikov S.A., Pashkova O.V. Study of technical solutions to strengthen the lining of the barrel in the zone of influence of construction near-wellbore production. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. Vol. 10, no 1, January 2015. pp. 14—19.

3. Kaledin O.S. *Gornyy zhurnal*. 2014, no 4, pp. 77—81.

4. Kazikaev D.M., Sergeev S.V. *Diagnostika i monitoring napryazhennogo sostoyaniya krepi vertikal'nykh stvolov* (Diagnostics and monitoring of the stress state of the lining vertical shafts), Moscow, Gornaya kniga, 2011, 244 p.

5. Stradanchenko S.G., Pleshko M.S., Armeyskov V.N. *Inzhenernyy vestnik Dona*. 2013, no 4, available at: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1994.

6. Zhang X., Han Y., Liu S., Su C. Deformation prediction analysis model for the mine shaft-wall. Liaoning Gongcheng Jishu Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban). *Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition)*, 2014, no 33 (8), pp. 1070—1073.

7. Daller J., Žibert M., Exinger C., Lah M. Implementation of BIM in the tunnel design — Engineering consultant's aspect. *Geomechanics and Tunnelling*. 2016. Vol. 9. pp. 674—683.

8. Wang J., Hao X., Gao X. The application of BIM technology in the con-struction of Hangzhou Zizhi tunnel. *3rd International Conference on Mechatronics, Robotics and Automation (ICMRA 2015)*. pp. 195—204.

9. Jian-ping Z., Ding L., Jia-rui L. Application of BIM in engineering con-struction [J]. *Construction Technology*, 2012, 41(371). pp. 10—14.

10. You-quan X., Liu Xin L. Study on flat organization structure of the large construction projects based on BIM [J]. *Journal of Engineering Management*, 2013, 27(1). pp. 44—47.

11. Heikkilä R., Kaaranka A., Makkonen T. Information Modelling based Tunnel Design and Construction Process. *The 31st International Symposium on Automation and Robotics in Construction and Mining (ISARC 2014)*. pp. 672—675.

12. Shen X., Lu M., Mao S., Wu X. Integrated Approach to Machine Guidance and Operations Monitoring in Tunnel Construction *The 31st International Symposium on Automation and Robotics in Construction and Mining (ISARC 2014)*. pp. 103—109.

FIGURES

Fig. 1. The dependence of the performance of two-stage continuous ascent from depth with different sizes of sinking the tubs.

Fig. 2. The dependence of the performance of two-step tunneling of recovery from the depths of the barrel at a different maximum rate of descent.

Fig. 3. Dependency graphs a promising performance sinking rise from the depths of a trunk when using multiple lifting machines and lifting vessels of large capacity.

Fig. 4. The graphs of criterion of stability C depending on rock strength and depth of the trunk.

TABLE

The optimal solution for construction of shafts of various depths.

ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ (СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)

РАЗВИТИЕ НАУЧНЫХ ПОДХОДОВ К ОБОСНОВАНИЮ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ КРУПНОМАСШТАБНЫХ УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

(2017, № 9, СВ 19, 24 с.)

Байсаров Руслан Сулимович — аспирант, МГИ НИТУ «МИСиС», e-mail: msmu-prpm.yandex.ru.

В современных условиях функционирования шахтного фонда и недропользования особую значимость приобретает задача обоснования рациональных и высокоэффективных проектных решений освоения запасов крупномасштабных угольных месторождений, что напрямую связано с изменением и трансформацией территориального размещения основных центров угледобычи. Данный аспект предполагает адаптацию методологической и методической базы проектирования с рядом новых технико-экономических процедур, направленных на создание сбалансированной и высокоэффективной структуры шахтного фонда РФ.

Ключевые слова: угольная шахта, геолого-геологические и горнодобывающие установки, оценка, надежность.

THE DEVELOPMENT OF SCIENTIFIC APPROACHES TO A SUBSTANTIATION OF PROJECT SOLUTIONS OF LARGE-SCALE COAL DEPOSITS

Baisarov R.S., Graduate Student, National University of Science and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia.

In modern conditions of functioning of mining assets and mineral resources is of particular importance, the task of substantiation of a rational and highly efficient design solutions the development of large-scale reserves of coal deposits that are directly related to the change and transformation of the territorial distribution of the main centers of coal production. This aspect involves the adaptation of the methodological and methodical bases of designing several new technical and economic procedures to develop a balanced and effective structure of the mining assets of the Russian Federation.

Key words: coal mine, geological and mining settings, assessment, reliability.