

DOI: 10.26730/1999-4125-2017-5-50-55

УДК 662.861.481

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СЕТЕВОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА
УТИЛИЗАЦИИ ШАХТНОГО МЕТАНА
В БЛОЧНО-МОДУЛЬНОЙ КОТЕЛЬНОЙ****DEVELOPMENT AND STUDY OF THE NETWORK MODEL OF THE MINE
METHANE UTILIZATION PROCESS IN A MODULAR BOILER****Застрелов Денис Николаевич,**

кандидат техн. наук, старший научный сотрудник, e-mail: zastrelov@uglemetan.ru

Zastrelov Denis N., C. Sc. (Engineering), Senior researcher**Уткаев Евгений Александрович,**

кандидат техн. наук, старший научный сотрудник, e-mail: utkaev@uglemetan.ru

Utkaev Eugene A., C. Sc. (Engineering), Senior researcher**Макеев Максим Павлович,**

кандидат техн. наук, старший научный сотрудник, e-mail: m_makeev@uglemetan.ru

Makeev Maxim P., C. Sc. (Engineering), Senior researcher**Кормин Алексей Николаевич,**

кандидат техн. наук, старший научный сотрудник, e-mail: kormin@uglemetan.ru

Kormin Alexey N., C. Sc. (Engineering), Senior researcher**Смыслов Алексей Игоревич,**

младший научный сотрудник, e-mail: smyslov@uglemetan.ru

Smyslov Alexey I., junior researcher

Институт угля Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского Отделения Российской академии наук», г. Кемерово, пр. Ленинградский, 10

Institute of Coal of the Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.650065, Russia, Kemerovo, Ave. Leningradskiy, 10

Аннотация. Рассмотрена технологическая схема утилизации шахтного метана в блочно-модульной котельной для производства тепловой энергии, рассмотрены основные узлы и этапы транспортировки и переработки метановоздушной смеси. В соответствии с действующими нормативными документами концентрация метана в метановоздушной смеси, подаваемой в котельную для утилизации, должна быть не менее 25%. В статье представлена модель процесса переработки метана на основе ориентированного графа, дана технологическая интерпретация позиций и переходов сетевой модели, приведены значения начальной маркировки и кратности дуг сети Петри. Проведен анализ структурных свойств сетевой модели на ограниченность, консистентность, повторяемость и консервативность. Дана интерпретация структурным свойствам сетевой модели. По результатам моделирования процесса утилизации шахтного метана выявлены недостатки в работе отдельных узлов блочно-модульной котельной и разработаны рекомендации по стабилизации работы газоутилизационного комплекса за счет калибровки регулятора давления газа. Реализация данного мероприятия позволила стабилизировать давление в газопроводе на входе в котельную и повысить эффективность работы системы в целом. Приведены данные о расходе метана в блочно-модульной котельной до и после калибровки регулятора давления газа за равные периоды времени. Работа котельной после калибровки регулятора давления газа характеризуется более стабильным потреблением метановоздушной смеси. Ожидается, что расширенное внедрение технологий утилизации шахтного метана позволит повысить энергоэффективность угольных шахт за счет рационального использования энергоресурсов, а также снизить выбросы парниковых газов в атмосферу.

Разработаны предложения по стабилизации подачи метановоздушной смеси в котельную.

Abstract. This paper reviews the technological scheme of coal mine methane utilization in a modular boiler for heat generation and the basic components and stages of methane-air mixture transportation and processing. In accordance with the applicable regulations, the methane concentration in the methane-air mixture supplied to the boiler for utilization must be at least 25%. The article presents the model of the process of methane recycling

on the basis of the directed graph, providing the technological interpretation of the positions and transitions of the network model, as well as the values of initial marking and multiplicities of the arcs of Petri nets. The structural properties of the network model were analysed with respect to boundedness, consistency, repeatability, and conservatism. Interpretation of the structural properties of the network model was presented. The results of the simulation of the mine methane utilization detected shortcomings in the work of some of the components of the block-modular boiler-house. The recommendations were developed for stabilization of the gas utilization unit by means of calibration of gas pressure regulator. This measure made it possible to stabilize the pressure in the pipeline at the entrance to the boiler-house and to increase the efficiency of the system as a whole. The data of methane flow rate in a modular boiler before and after calibration of the gas pressure regulator for equal periods of time have been shown. The work of boiler after calibration of the gas pressure regulator is characterized by a stable consumption of methane-air mixture. It is expected that extended implementation of the technologies of coal mine methane utilization will increase the energy efficiency of coal mines due to the rational use of energy resources as well as reduce greenhouse gases emission.

Ключевые слова: шахтный метан, утилизация, тепловая и электрическая энергия, ориентированный граф.

Keywords: coal mine methane, utilization, thermal and electric power, oriented graph.

В процессе добычи угля выделяется метан, который в настоящее время на большинстве угольных шахт выбрасывается в атмосферу, но при этом его возможно использовать, например, для производства энергии. Устойчивость и эффективность проектов утилизации шахтного метана связана с решением задачи обеспечения концентрации метана в метановоздушной смеси (МВС) на уровне от 25% (для факельных установок и газогенераторных станций) и более 30% для котельных).

Рассмотрим технологическую схему переработки дегазационного метана в блочно-модульной котельной для производства тепловой энергии. Установка предназначена для утилизации шахтного метана, снижения вредных выбросов в атмосферу и получения тепла при нагревании сетевой воды. В котельную МВС поступает по надземному трубопроводу от скважин за счет работы вакуумного насоса с концентрацией метана более 30% (рис. 1).

Полученный газ подается в качестве топлива в водогрейный котел КВЕ-0,7-115 ГМ. Газ проходит конденсатосборники, газовую регулировочную установку, огнепреградитель, электромагнитный клапан и измерительный комплекс учета газа. Полученное тепло используется в системах теплопотребления: отопление, горячее водоснабжение и технологические нужды.

Разработана модель процесса утилизации шахтного метана в виде ориентированного графа и проведена оценка его структурных свойств на основе сетей Петри. Начальная маркировка сети задается таким образом, чтобы при запуске дегазационной станции и котельной был достаточным исходный объем ресурсов метана. Веса дуг сетей Петри задаются так, чтобы на все технологические узлы систем подавалось необходимое количество ресурсов. Модель, отображающая функционирование системы утилизации шахтного метана в блочно-модульной котельной с выработкой тепловой энергии, $N_I = \{P_1, N_1, I_1, O_1, M_0\}$, где $T_I = \{t_1, t_2, \dots, t_{10}\}$ –

множество переходов, $P_I = \{p_1, p_2, \dots, p_{11}\}$ – множество позиций (соответствующие подаваемым ресурсам), I_I – входная функция, O_I – выходная функция, M_0 – начальная маркировка, обозначающая количество метана и тепловой энергии на соответствующих этапах сети при начальном запуске системы. Графическое представление модели N_I дано на рис. 2.

Метан извлекается вакуум-насосной станцией (p_3), затем поступает для очистки от влаги и пыли в конденсатосборник №1 (p_4), далее в конденсатосборник №2 (p_5) для дополнительной очистки и в регулятор давления газа (p_6), который сглаживает скачки давления в газопроводе. Очищенный дегазационный метан подается в горелку. В горелке (p_7) происходит смешивание метана и воздуха для достижения необходимого качества горючей смеси. На следующем этапе метан подается в топку (p_8), в которой происходит сжигание смеси и выработка тепловой энергии. КПД котла составляет 95%, в связи с этим потери тепла с уходящими газами составляют 5% (3 кВт в час). Часть тепловой энергии используется на собственные нужды котельной, оставшаяся энергия используется в административно бытовом комплексе шахты (p_{10}). В начале работы сети N_I в позициях p_1 и p_8 находится по 150 маркеров соответственно, это означает, что при запуске системы добывается 150 м³ метана. Технологическая интерпретация кратности дуг сетей Петри N_I : потребление электроэнергии вакуум-насосной станцией 150 кВт*ч; выработка тепловой энергии модульной котельной установкой 60 кВт*ч; потребление тепловой энергии душевой 52 кВт*ч; потери тепловой энергии в дымовой трубе 3 кВт*ч; извлечение метана: 150 м³/ч.

Проведен анализ структурных свойств сетевой модели.

Ограниченность: $fC \leq 0, f > 0$;

Консервативность: $fC = 0$;

Повторяемость: $Cg = 0$;

Консистентность: $C^Tg = 0, g > 0$.

Здесь $f=(f_1, f_2, \dots, f_m)$ – вектор, характеризующий позиции сети p_m (технологические узлы); $g=(g_1, g_2, \dots, g_n)$ – вектор, характеризующий переходы сети t_n (технологические процесс переработки шахтного метана); C – матрица инцидентов, отражающая совокупность входных и выходных функций (взаимодействие позиций p_m и переходов сети t_n); C^T – транспонированная матрица инцидентов $C^T = [c_{mn}]^T$.

Установлено, что сеть N1 не ограничена (условие (1) не выполняется). Это свидетельствует о возможном превышении заданного давления метановоздушной смеси при ее транспортировке и переработке, скоплении метана на отдельных участках газопровода. При этом на этапах передачи тепловой энергии могут возникнуть простои в работе основных технических узлов. Для сглаживания возможных скачков давления в газопроводе необходимо провести калибровку регулятора давления газа, который будет способствовать стабилизации давления при

транспортировке метановоздушной смеси в котел. Сеть N1 является неконсервативной (условие (2) не выполняется). Это означает, что существует возможность обеспечить полную загрузку оборудования. Для стабильной работы системы утилизации метана, шахте, где будет установлена котельная, необходимо осуществлять непрерывную дегазацию. Сеть N1 является повторяемой (условие (3) выполняется). Это не дает возможность вносить изменения в технологическую схему проектов, без снижения производительности. Сеть N1 является неконсистентной (условие (4) не выполняется), что характеризует производственный процесс следующим образом: переход сетей Петри срабатывает каждый раз при подаче метана и выработке тепловой энергии. Неконсистентность является признаком нестабильности технологического процесса переработки шахтного метана.

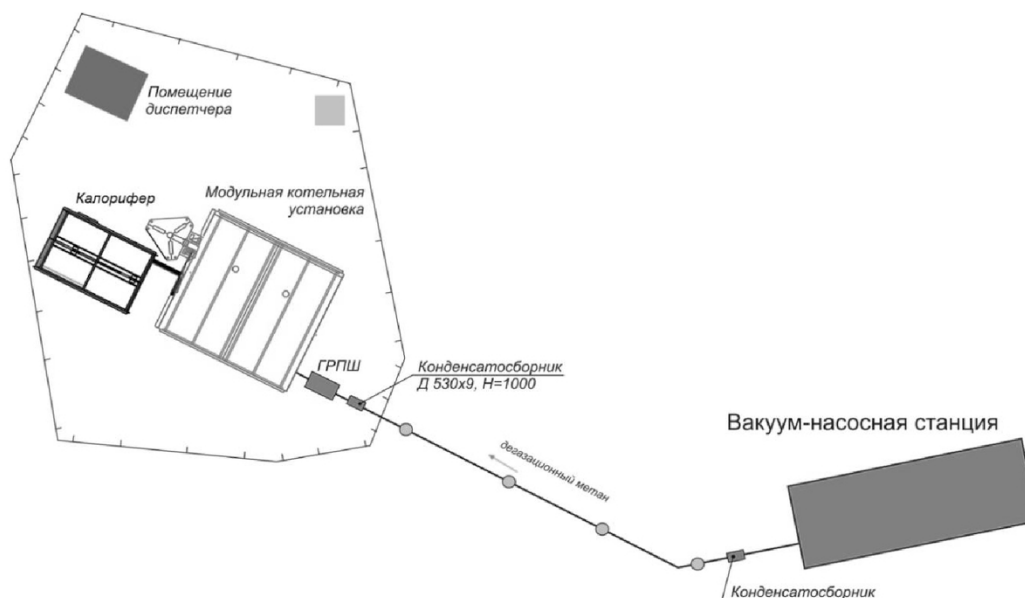


Рис. 1. Схема комплекса для утилизации шахтного метана в блочно-модульной котельной

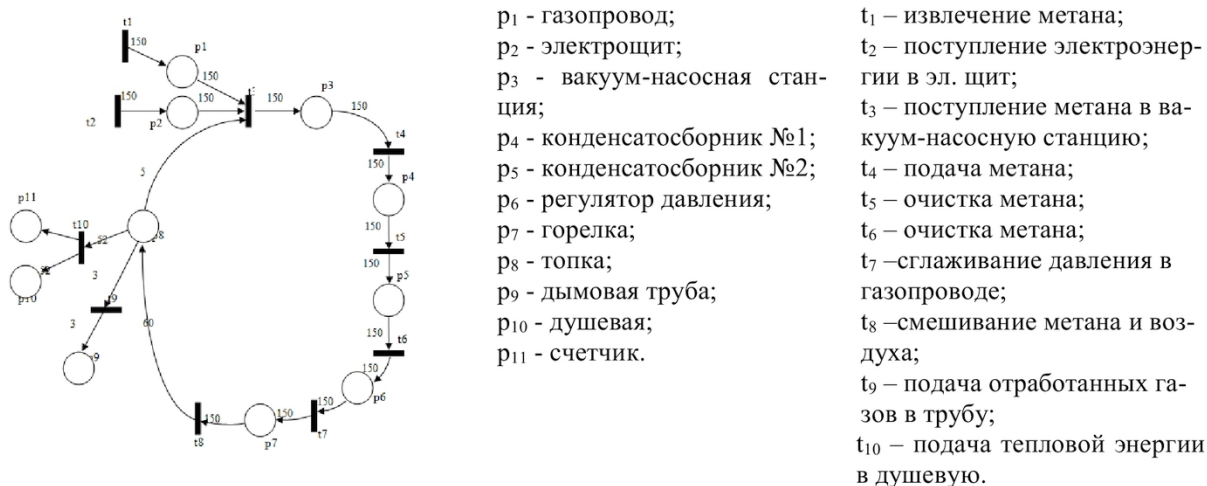


Рис. 2. Сеть N_1 , описывающая утилизацию шахтного метана в блочно-модульной котельной

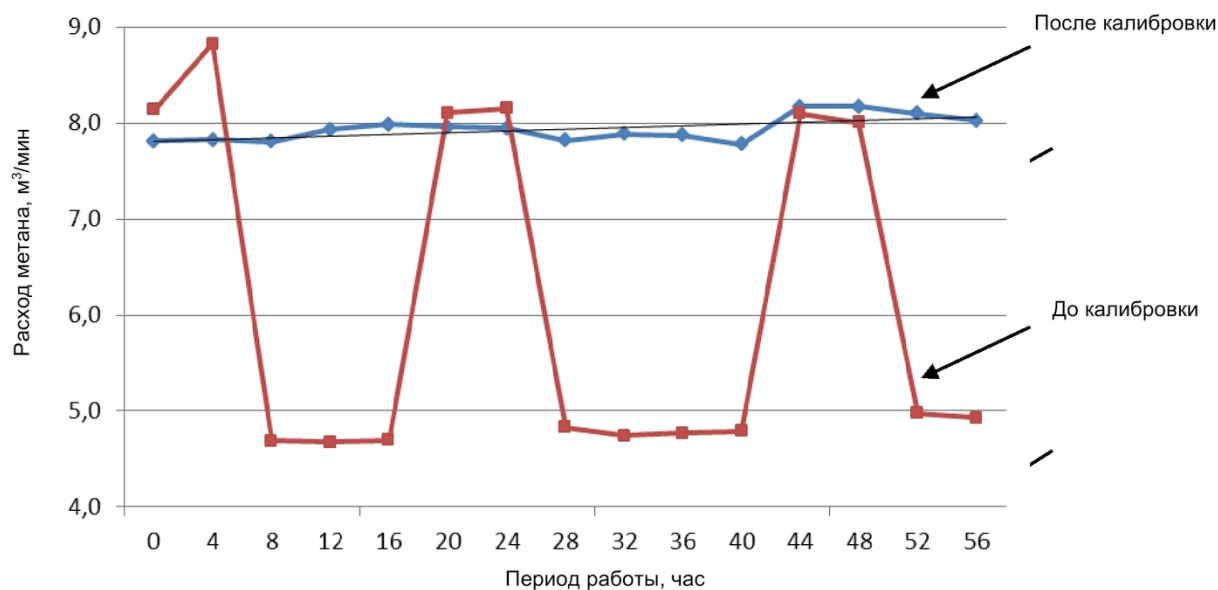


Рис. 3. Расход метана в котельной до и после калибровки регулятора давления газа

С помощью проведенного моделирования функционирования системы утилизации шахтного метана на основе ориентированных графов разработаны рекомендации по дополнительной калибровке регулятора давления газа на газопроводе перед входом в блочно-модульную котельную (рис. 3). Применение данного подхода позволило стабилизировать подачу метановоздушной смеси в котел и повысить эффективность работы газопотребляющего комплекса в целом. Дополнительным фактором для принятия решения о внедрении технологий утилизации шахтного метана может послужить то, что большинство систем переработки метана, изготавливаемых для угольной промышленности могут быть использованы для производства тепловой и/или электрической энергии, которая может

потребляться угледобывающими предприятиями, либо поставляться сторонним потребителям. Использование метана для собственных нужд угольной шахты представляется наиболее целесообразным ввиду относительно близкого расположения источника метановоздушной смеси и потребителя тепловой энергии. Тиражирование положительного опыта утилизации шахтного метана в котельных позволит повысить энергоэффективность угольных шахт за счет рационального использования энергоресурсов, в т.ч. за счет замещения шахтным метаном использования традиционного твердого топлива в котельных. Утилизация шахтного метана в котельных также позволит снизить выбросы парниковых газов в атмосферу региона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tailakov O. V., Zastrelov D. N., Utkaev E. A., Smyslov A.I., Kormin A.N. Experience for Coal Mine Methane Utilization to Generate Thermal and Electric Power // Taishan Academic Forum - Project on mine Disaster Prevention and Control - Mining 2014. - Qingdao, China, 2014. - pp. 450-453.
2. Тайлаков О.В., Застрелов Д.Н., Смыслов А.И., Уткаев Е.А. Переработка дегазационного метана в энергетических установках на угледобывающих предприятиях // Горный Информационно-аналитический бюллетень, Москва: Издательство «ГОРНАЯ КНИГА», 2013. – Отдельный выпуск № 6 – С. 170-176.
3. Садов А.П., Костеренко В.Н., Тайлаков О.В., Уткаев Е.А., Застрелов Д.Н., Смыслов А.И. Опыт использования вентиляционного метана в качестве дополнительного топлива для двигателей внутреннего сгорания // Уголь, 2015. - № 12 – С. 61 – 68.
4. Бакхаус К., Голутва И.А., Застрелов Д.Н. Опыт извлечения и использования шахтного газа в Германии. Комплексный подход к промышленной добыче метана из угольных пластов и дегазации шахт // Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности. – Труды международной научно-практической конференции. Кемерово: ООО «Кузбасская выставочная компания «Экспо-Сибирь». - 2013. - С. 292 – 295.
5. Полевшиков Г.Я., Козырева Е.Н., Шинкевич М.В. Повышение эффективности комплексного управления газовыделением на выемочном участке шахты // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. Научно-технический журнал, Кемерово, 2012. - №2. – С. 20-27.

6. Застрелов Д.Н., Уткаев Е.А., Смыслов А.И., Кормин А.Н. Разработка сетевой модели процесса утилизации шахтного метана // Горный Информационно-аналитический бюллетень, Москва: Издательство «ГОРНАЯ КНИГА», 2013. – Отдельный выпуск № 6 – С. 151-154.
7. Тайлаков О.В., Застрелов Д.Н., Исламов Д.В. Выбор рациональных траекторий развития предприятий угольного машиностроения на основе сетевых моделей // Горный Информационно-аналитический бюллетень, Москва: Издательство «ГОРНАЯ КНИГА», 2010. – № 8 – С. 205-212.
8. Исламов Д.В., Застрелов Д.Н., Тайлаков В.О. Инвестиционные возможности развития извлечения и использования шахтного метана в угольной промышленности России (на примере Кузбасса) // Горный Информационно-аналитический бюллетень. Тематическое приложение Метан 2006. Москва: МГГУ, 2006. – С. 45-52.
9. Tailakov O.V., Zastrelov D.N. Increase of power efficiency at coal mines on the basis of methane utilization // «Энергетическая кооперация в Азии: что после кризиса?»: Материалы VII Международной конференции АЕС-2010 (30 августа – 03 сентября 2010. г.). – Иркутск, 2010. – С2-11.
10. Tailakov O.V., Islamov D.V., Zastrelov D.N., Tailakov V.O. Economical analysis of methane utilization options on coal mines // The 7th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies. Vancouver, Canada. 5-9 September 2004.
11. Тайлаков В.О., Застрелов Д.Н. Экономическая эффективность проектов использования шахтного метана и оптимизация риска на стадии выбора инвестора // Горный Информационно-аналитический бюллетень. Кузбасс-1, Москва: Издательство «ГОРНАЯ КНИГА», 2009. – № 7 – С. 165-167.
12. Tailakov O.V., Islamov D.V., Zastrelov D.N. Scenarios analysis of coalbed methane market development in Kemerovo region // The 4-th International Conference «Asian Energy Cooperation: Interstate Infrastructure and Energy Markets», 13-17 September 2004. Irkutsk: Energy System Institute, 2004. – P. 161-165.
13. Клишин В.И. Зворыгин Л.В., Лебедев А.В., Савченко А.В. Проблемы безопасности и новые технологии разработки угольных месторождений – Новосибирск: Издательский дом «Новосибирский писатель», 2011. – 524 с.
14. Артемьев В.Б., Костеренко В.Н., Садов А.П., Тайлаков О.В., Застрелов Д.Н. Уткаев Е.А. Извлечение и переработка угольного метана – М.: Издательство «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2016. – 208 с.
15. Smyslov A., Utkae E. Building Capacity for JI Projects in Russian Coal Sector // Magazine on the Kyoto Mechanisms, October 2007. The Netherlands. P. 3-4.

REFERENCES

1. Tailakov O.V., Zastrelov D.N., Utkae E.A., Smyslov A.I., Kormin A.N. Experience of Coal Mine Methane Utilization to Generate Thermal and Electric Power /Taishan Academic Forum - Project on mine Disaster Prevention and Control - Mining 2014. - Qingdao, China, 2014. - pp. 450-453.
2. Tailakov O.V., Zastrelov D.N., Smyslov A.I., Utkae E.A. Processing degasification of methane in power plants at coal mines // Mining Information-analytical Bulletin, Moscow: Publishing house "GORNAYA KNIGA", 2013. – Separate issue # 6 – pp. 170-176.
3. Sadov A.P., Kosarenko V.N., Tailakov O.V., Utkae E.A., Zastrelov D.N., Meanings of A. I. experience in the use of ventilation air methane as a supplementary fuel for internal combustion engines // Charcoal, 2015. - No. 12 – pp. 61 – 68.
4. Backhaus K., Golutva I.A., Zastrelov D.N. Experience in the extraction and use of mine gas in Germany. An integrated approach to industrial production of coalbed methane and degasification of the mines // Energy security of Russia. New approaches to the development of the coal industry. – Proceedings of the international scientific-practical conference. Kemerovo: LLC "Kuzbass exhibition company "Expo-Siberia". - 2013. - pp. 292 – 295.
5. Polevshchikov G.Y., Kozyreva, E.N., Shinkevich, M.V. Improving the efficiency of the integrated management of gas evolution in the extraction panel of the mine // Vestnik of the research center for work safety in the coal industry. Scientific and technical journal, Kemerovo, 2012. - No. 2. – pp. 20-27.
6. Zastrelov D.N., Utkae E.A. Smyslov A.I., Kormin A.N. Development of network model of the process of CMM // Mining Information-Analytical Bulletin, Moscow: Publishing house "GORNAYA KNIGA", 2013. Separate issue No. 6 – pp. 151-154.
7. Tailakov O.V., Zastrelov D.N., Islamov D.V. Choice of rational directions of development of machine building companies in coal industry on the basis of network models // the Mining Information-Analytical Bulletin, Moscow: Publishing house "GORNAYA KNIGA", 2010. – № 8 – pp. 205-212.
8. Islamov D.V., Zastrelov D.N., Tailakov V.O. Investment opportunities for the development of the extraction and use of coal mine methane at the coal industry of Russia (on an example of Kuzbass) // Mining Information-Analytical Bulletin. Theme app the Methane 2006. Moscow: Moscow state mining University, 2006. – pp. 45-52.

9. Tailakov O.V., Zastrelov D.N. Increase of power efficiency at coal mines on the basis of methane utilization // « "Energy cooperation in Asia: after the crisis?": Proceedings of the VII International conference AEC-2010 (30 Aug – 03 Sep 2010. g). – Irkutsk, 2010. – pp.2-11.
10. Tailakov O.V., Islamov D.V., Zastrelov D.N., Tailakov V.O. Economical analysis of methane utilization options on coal mines // The 7th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies. Vancouver, Canada. 5-9 September 2004/
11. Tailakov V.O., Zastrelov D.N. The economic efficiency of projects of coal mine methane utilization and optimization of risk at the stage of the investor's choice // Mining Information-analytical Bulletin. Kuzbass-1, Moscow: Publishing house "Gornaya kniga", 2009. – № 7 – pp. 165-167.
12. Tailakov O.V., Islamov D.V., Zastrelov D.N. The analysis of scenarios of coalbed methane market development in Kemerovo region // The 4-th International Conference «Asian Energy Cooperation: Interstate Infrastructure and Energy Markets», 13-17 September 2004. Irkutsk: Energy System Institute, 2004. – pp. 161-165
13. Klishin V.I., Zvorygin L.V., Lebedev A.V., Savchenko A.V. The problems of security and new technologies of coal mining – Novosibirsk: Publishing house "Siberian writer", 2011. – p.524
14. Artemiev V.B., Kosterenko V.N., Sadov A.P., Tailakov O.V., Zastrelov D N. Utkaeв E.A. Extraction and processing of coal methane – Moscow: Publishing house "Mining" LLC "Cimmerian center", 2016. – pp. 208.
15. Smyslov A., Utkaeв E. Building Capacity for JI Projects in Russian Coal Sector // Magazine on the Kyoto Mechanisms, October 2007. The Netherlands. pp. 3-4.

Поступило в редакцию 21.09.2017
Received 21.09.2017