

А.Ю. Ермаков

ВЫДЕЛЕНИЯ МЕТАНА С ПОВЕРХНОСТИ ОБНАЖЕНИЯ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА ПРИ ВЫСОКОЙ СКОРОСТИ ПОДВИГАНИЯ ОЧИСТНЫХ И ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ ЗАБОЕВ

Теоретические исследования показали, что для прогнозирования процесса формирования метановой опасности в подготовительных выработках необходимо учитывать конечную скорость распространения давления метана в угольном пласте. Закон сопротивления при фильтрационном движении метана в угольном пласте представляет собой функциональную связь газового потока с градиентом давления газа и локальной скоростью изменения газового потока. Процессы фильтрации метана в угольном пласте описываются уравнением гиперболического типа, а применение уравнений параболического типа является физически обоснованным для длительных периодов времени. Интенсивность метановыделения связана с планограммой работ в очистном забое и в зависимости от скорости подвигания забоя в цикле метановыделение нарастает за счет увеличения площади газоотдающей поверхности. Газоотдающая поверхность находится под перепадом давления, а площадь частично дегазированной поверхности обнажения уменьшается с той же скоростью, с которой увеличивается площадь не дегазированной газоотдающей поверхности, поэтому при работе выемочного комбайна формируется стационарное состояние.

Ключевые слова: выделение, метан, поверхность обнажения, угольный пласт, скорость подвигания, очистной, подготовительный, забой.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-4-0-98-105

Современные технологии и технические средства обработки угольных пластов обеспечивают увеличение производительности очистных участков на порядок.

Сравнительный анализ аэрогазодинамического состояния шахт Кузбасса показывает, что, во-первых, шахты характеризуются исключительно высокой газообильностью, во-вторых, возможностью возникновения аварийных загазований горных выработок и появлением взрывоопасных концентраций метана. Теоретические исследования [2–12]

показали, что для прогнозирования процесса формирования метановой опасности в подготовительных выработках необходимо учитывать конечную скорость распространения давления метана в угольном пласте.

При этом закон сопротивления при фильтрационном движении метана в угольном пласте представляет собой функциональную связь газового потока с градиентом давления газа и локальной скоростью изменения газового потока для произвольно выбранной точки в рассматриваемой области угольного пласта.

А газовая проницаемость угольного пласта представляет собой обобщенную характеристику свойств метана, коллекторских свойств угольного и релаксации процесса фильтрационного движения метана, при этом численное значение газовой проницаемости пропорционально третьей степени эффективной пористости горного массива.

Процессы фильтрации метана в угольном пласте описываются уравнением гиперболического типа, а применение уравнений параболического типа является физически обоснованным для длительных периодов времени. Современные технологии и технические средства отработки угольных пластов обеспечивают увеличение производительности

очистных участков на порядок. Разумеется, что это приводит к тому, что в несколько раз возрастает скорость подвигания очистных и подготовительных забоев. Рассматривая угольные пласты, которые обрабатывают по технологии шахта – лава, процесс фильтрационного движения метана считать ламинарным и одномерным. Расчетные схемы выделения метана с поверхности обнажения разрабатываемого угольного пласта в подготовительные выработки и очистные забои для таких условий представлены на рис. 1.

Физически обоснованно следующее математическое описание поля давлений метана в угольном пласте, имеющем поверхность обнажения

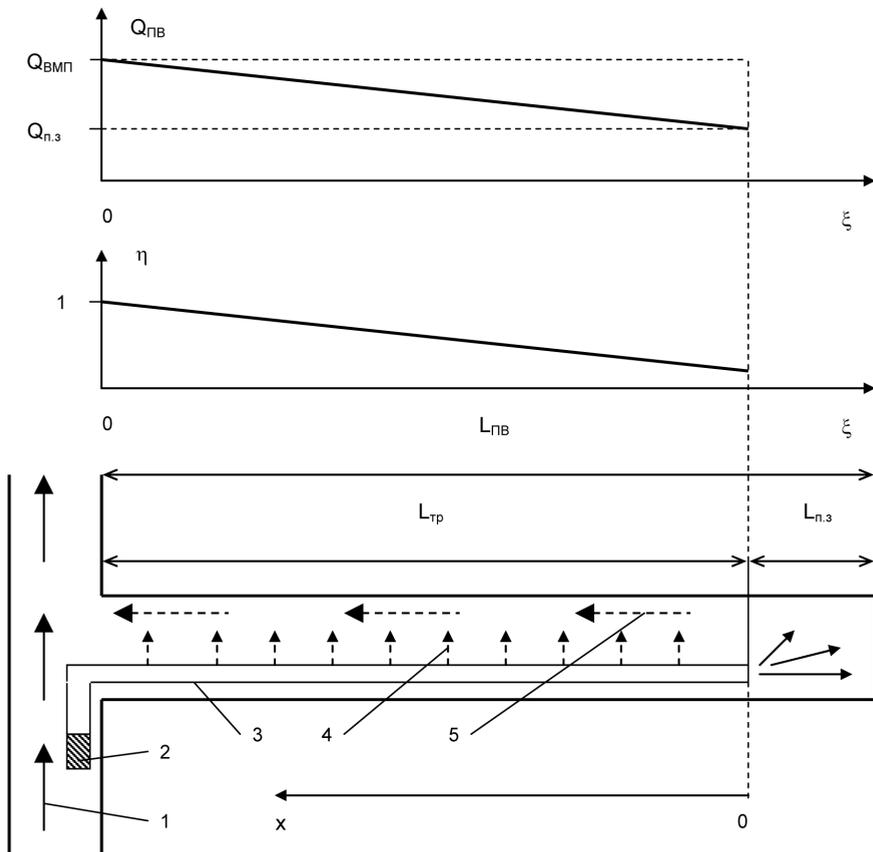


Рис. 1. Расчетные схемы выделения метана с поверхности обнажения разрабатываемого угольного пласта: подготовительная выработка (а); очистной забой (б)

$$\frac{dp^2}{dt} + t_r \frac{d^2 p^2}{dt^2} = \chi \frac{d^2 p^2}{dx^2} \frac{\partial p^2}{\partial t} + t_r \frac{\partial^2 p^2}{\partial t^2} = \chi \frac{\partial^2 p^2}{\partial x^2}, \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} p(z, 0) = p_0 = \text{const}, \quad \frac{d}{dt} p(z, 0) = 0, \\ p(0, t) = p_1 = \text{const}, \quad \lim p \neq \infty, \quad \text{при } z \rightarrow \infty \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

где p — давление свободного метана в трещиновато-пористой структуре угля; z — пространственная координата; t — время; t_r — период релаксации процесса ламинарной фильтрации метана в угольном пласте; χ — пьезопроводность угольного пласта, зависящая от фильтрационных и сорбционных свойств угля; p_0, p_1 — давление свободного метана в угольном пласте в начальный момент времени и на поверхности обнажения пласта соответственно.

Решение уравнения (1) для условий (2) имеет следующий вид

$$\frac{p^2 - p_0^2}{p_1^2 - p_0^2} = \left\{ \exp[-0,5z(t_r \chi)^{-0,5}] + 0,5z(t_r \chi)^{-0,5} \int (\theta^2 - z^2 t_r \chi^{-1})^{-0,5} \exp(-0,5\theta t_r^{-1}) \times \right. \\ \left. \times I_1 \left[0,5t_r^{-1} (\theta^2 - z^2 t_r \chi^{-1})^{0,5} \right] d\theta \right\} \sigma_0 \left[t - z(t_r \chi^{-1})^{0,5} \right] \quad (3)$$

где $I_1 \left[0,5t_r^{-1} (\theta^2 - z^2 t_r \chi^{-1})^{0,5} \right]$ — модифицированная функция Бесселя первого порядка; $\sigma_0 \left[t - z(t_r / \chi)^{0,5} \right]$ — единичная функция Хэвисайда.

Из соотношения (3) следует аналитическая зависимость для расчета метановыделения с единичной площади поверхности обнажения угольного пласта [1]

$$J_1 = J_0 \exp(-0,5t / t_r) I_0(0,5t / t_r), \quad (4)$$

где J_1 — метановыделение с единичной площади поверхности обнажения угольного пласта; J_0 — начальная скорость газовыделения; $I_0(0,5t/t_r)$ — модифицированная функция Бесселя нулевого порядка для аргумента, записанного в круглых скобках.

В период проведения выработки дебит метана в подготовительную выработку J_2 с элементарной поверхности обнажения пласта dS можно определить как

$$dJ_2 = nm_n V_1 J_0 \exp(-0,5t / t_r) \times I_0(0,5t / t_r),$$

где n — количество поверхностей обнажения угольного пласта, контактирующих с атмосферой подготовительной выработки; m_n — мощность разрабатываемого угольного пласта; V_1 — скорость подвигания подготовительного забоя. Интегрируя уравнение, получим

$$J_2(t) = nm_n V_1 J_0 \int_0^t \exp(-0,5\zeta / t_r) d\zeta \quad (5)$$

где T — срок проведения подготовительной выработки.

Следовательно, максимальное значение метановыделения J_m будет при $t = T$, т.е. $J_m = J_0(T)$. В период обособленного проветривания выработки дебит метана в подготовительную выработку J_3 с элементарной поверхности обнажения угольного пласта dS можно определить как

$$dJ_3 = nm_n L_1 V_1 J_0 \exp(-0,5t / t_r) \times I_0(0,5t / t_r),$$

где L_1 — проектная длина подготовительной выработки. Интегрируя уравнение, получим

$$J_3(t) = J_m \exp[-0,5(t-T)/t_r] I_0[0,5(t-T)/t_r] \text{ при } t \geq T. \quad (6)$$

Модифицированная функция Бесселя нулевого порядка может быть представлена в интегральном виде, тогда, вводя обозначение $\tau = 0,5t/t_r$, можно записать

$$J_2(\tau) = 0,318nm_n t_r V_1 J_0 \theta_1(\tau), \text{ при } \tau \leq \tau_1 \quad (7)$$

$$J_m(\tau_1) = 0,318nm_n t_r V_1 \theta_1(\tau_1); \quad (8)$$

$$J_3(\tau) = J_m \theta_2(\tau - \tau_1) \text{ при } \tau \geq \tau_1 \quad (9)$$

где $\tau_1 = 0,5T/t_r$; τ_1 — безразмерный срок проведения подготовительной выработки;

$$\theta_1(\tau) = \int_0^\tau \exp(-\zeta) \int_0^\pi [\exp(\cos \zeta) + \exp(-\zeta \cos \zeta)] d\zeta \quad (10)$$

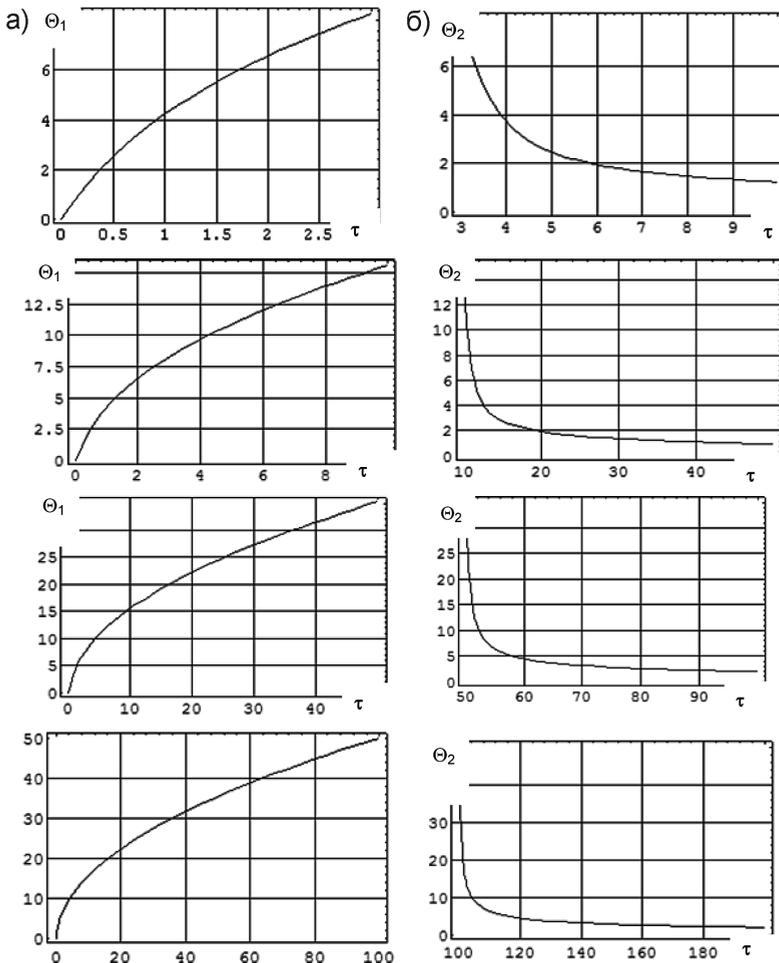


Рис. 2. Графики зависимостей $\Theta_1(\tau)$ и $\Theta_2(\tau)$ для различных интервалов значений переменной τ : период проведения подготовительной выработки (а); период обособленного проветривания подготовительной выработки (б)

$$\theta_2(\tau) = 0,159 \exp[-(\tau - \tau_1)] \int_0^\pi \{ \exp[(\tau - \tau_1) \cos \zeta] + \exp[-(\tau - \tau_1) \cos \zeta] \} d\zeta \quad (11)$$

Функции $\Theta_1(\tau)$ и $\Theta_2(\tau)$ представляют собой безразмерные значения метановыделения с поверхности обнажения угольного пласта в соответствующие моменты времени, которые присваиваются переменной τ . Графики функций $\Theta_1(\tau)$ и $\Theta_2(\tau)$ представлены на рис. 2.

Результаты вычислительных экспериментов, проведенных для возможных интервалов изменения исходных данных, отражающих условия проведения подготовительных выработок в шахтах Кузбасса, позволили получить инженерные формулы для расчета этих функций. Аппроксимации функций $\Theta_1(\tau)$ и $\Theta_2(\tau)$ приведены в табл. 1–2.

Аппроксимации, заданные соотношениями табл. 1, характеризуются значениями корреляционного отношения от 0,995 до 0,999, а заданные соотношениями табл. 2 — корреляционными отношениями от 0,967 до 0,996. По-

решность аппроксимации не превышает 1%. Из формул (7)–(8) следует, что интенсивность метановыделения непосредственно связана со скоростью подвигания подготовительного забоя и проектной длиной подготовительной выработки.

Анализ зависимостей показывает, что в процессе проведения выработки метановыделение нарастает за счет увеличения площади обнаженной поверхности угольного пласта. Поверхность обнажения пласта вначале находится под перепадом давления приблизительно равным значению $p_0^2 - p_1^2$. Затем происходит дегазация краевой части угольного пласта, контактирующей с атмосферой подготовительной выработки, в соответствии с закономерностью (6). Аппроксимация кривой газового истощения приведена в табл. 2. Метановыделение с поверхности обнажения разрабатываемого угольного

Таблица 1

Аппроксимации зависимости $\Theta_1 = \Theta_1(\tau)$

Интервал безразмерного периода времени τ	Теоретически обоснованная аппроксимирующая формула
$\tau \in [0, 10]$	$\theta_1(\tau) = 0,3787\tau^3 - 2,4678\tau^2 + 6,7909\tau - 0,367$
$\tau \in [10, 100]$	$\theta_1(\tau) = 0,0003\tau^3 - 0,0329\tau^2 + 1,5865\tau + 1,177$

Таблица 2

Аппроксимации зависимости $\Theta_2 = \Theta_2(\tau)$

Интервал безразмерного периода времени τ	Теоретически обоснованная аппроксимирующая формула
$\tau \in [0, 3]$	$\theta_2(\tau) = -0,0467\tau^3 + 0,3314\tau^2 - 0,8283\tau + 0,9957$
$\tau \in [3, 10]$	$\theta_2(\tau) = -0,0003\tau^3 + 0,0074\tau^2 - 0,0738\tau + 0,4012$
$\tau \in [10, 50]$	$\theta_2(\tau) = 5 \cdot 10^{-3}\tau^2 - 0,047\tau + 0,0908$
$\tau \in [50, 100]$	$\theta_2(\tau) = 2 \cdot 10^{-6}\tau^2 - 0,0008\tau + 0,0908$

пласта в очистной забой также описывается уравнением (3) и условиями (4). Следовательно, соотношение (5) и закономерность (6) отражают динамику метанообильности очистного забоя, обусловленную газовыделением с поверхности обнажения пласта. Поэтому с учетом принятых обозначений можно записать, что

$$J_s = 0,318m_n t_r V_2 J_0 \int_0^{L_2/(2t_r V_2)} \exp(-\tau) \int_0^\pi [\exp(\tau \cos \zeta) + \exp(-\tau \cos \zeta)] d\zeta d\tau \quad (12)$$

где J_s — метановыделение с поверхности обнажения угольного пласта в очистном забое; V_2 — скорость подачи очистного комбайна; L_2 — длина очистного забоя.

$$J_s = 0,318nm_n t_r V_2 J_0 \Theta_1(\tau_2), \quad (13)$$

где $\tau_2 = L_2/(2t_r V_2)$; τ_2 — безразмерное значение длительности прохождения очистным комбайном всей лавы.

Из формул (12)—(13) следует, что интенсивность метановыделения непосредственно связана с планограммой работ в очистном забое. Анализ зависимости свидетельствует о том, что при выемочном цикле метановыделение нарастает за счет увеличения площади газоотдающей поверхности. Газоотдающая поверхность также находится под перепадом давления, приблизительно равным значению $p_0^2 - p_1^2$, а площадь частично дегазированной поверхности обнажения уменьшается с той же скоростью, с которой увеличивается площадь не дегазированной газоотдающей поверхности, поэтому при работе выемочного комбайна формируется стационарное состояние, определяемое формулой (12).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Качурин Н. М., Борщевич А. М., Качурина О. Н., Бухтияров А. А. Безопасность геотехнологий добычи угля по газовому фактору // Безопасность жизнедеятельности. — 2010. — № 5. — С. 24—28.
2. Socolov E. M. et al. System of imitation for forecasting the ^{137}Cs migration in the radioactive trace zone at the Chernobyl Atomic Power Station failure / International Symposium on Radiation Safety. — Moscow, 1994. — Pp. 101—103.
3. Kachurin N. M. Conceptual rules of the monitoring of the «Environment — Human Health» system in the Russian Federation / The 2-nd International Symposium «Mining and Environmental Protection». — Belgrade, 1998. — Pp. 21—26.
4. Kachurin N. M., Babovnikov A. L. Gassing during the break and transport of coal in a retreatlongwall / Development of new technologies and equipment for mine haulage and hoisting. — Budva, 2005. — С. 245—249.
5. Siemek J., Rajtar J. Simulation of gas outflow from porous fissured media // Arch. Mining Sci. — 1989. — 34, № 1. — Pp. 119—128.
6. Яновская М. Ф. О скорости десорбции метана из разрушенного угля / Проблемы рудничной аэрологии: сборник статей. — М.: Госгортехиздат, 1959. — С. 32—37.
7. Васючков Ю. Ф. Диффузия метана в ископаемых углях // Химия твердого топлива. — 1976. — № 4. — С. 76—79.
8. Качурин Н. М. Фильтрация газа в угольных пластах при конечной скорости распространения давления / Подземная разработка тонких и средней мощности угольных пластов: сборник статей. — Тула: ТулПИ, 1983. — С. 56—62.
9. Качурин Н. М. Прогноз газовыделений в подготовительные выработки с использованием гиперболического уравнения фильтрации / Физико-технические проблемы управления воздухообменом в горных выработках больших объемов: сборник статей. — Л., 1983. — С. 83.
10. Качурин Н. М. Газовыделение на очистных участках шахт Подмосковского бассейна при изменении давления воздуха / Подземная разработка тонких и средней мощности угольных пластов: сборник статей. — Тула: ТулПИ, 1983. — С. 74—80.

11. Качурин Н. М., Ермаков А. Ю., Сенкус Вал. В. Аэрогазодинамика очистных и подготовительных забоев при обработке мощных пологих пластов. — Кемерово: АИ «Кузбассвуиздат», 2017. — 287 с.

12. Ярунин С. А., Бухны Д. И. Расчет газодинамического состояния призабойной части угольного пласта / Вентиляция и газодинамические явления в шахтах: сборник статей. — Новосибирск, 1981. — С. 6–12. **ИДБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Ермаков Анатолий Юрьевич — кандидат технических наук, управляющий филиалом ООО «Сибниииуглеобогащение», г. Прокопьевск.

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018. No. 4, pp. 98–105.

A.Yu. Ermakov

METHANE RELEASE FROM EXPOSED COAL AT HIGH RATE OF ADVANCE OF DEVELOPMENT AND PRODUCTION FACES

The theoretical research shows that prediction of methane hazard in development headings should account for the final rate of methane pressure propagation in coal seams. The law of resistance during methane seepage in coal seams is the functional relation between the gas flow, the gas pressure gradient and the gas flow velocity variation. Gas permeability of coal seams is a generalized characteristic of properties of methane, reservoir characteristics of coal, and relaxation of methane flow; in this case, the numerical value of gas permeability is proportional to the third degree of effective porosity of rock mass. Methane flow processes in a coal seam are described by the hyperbolic equation, and the application of the hyperbolic equations is physically valid for the long-term periods of time. The rate of methane release is connected with the operating schedule of production faces and, depending on the face advance rate per methane release cycle, is increasing due to the growth of the gas-emitting exposed surface area. The gas-emitting area is subjected to differential pressure, and the area of partly degassed exposed surface is diminishing at a rate of enlargement in the area of non-degassed emitting surface; for this reason, steady-state conditions are formed during operation of cutter-loaders.

Key words: release, methane, exposed coal surface, coal seam, advance rate, production face, development face.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-4-0-98-105

AUTHOR

Ermakov A.Yu., Candidate of Technical Sciences, Manager of the Branch, LLC «Sibniiiugleobogashenie», Prokopyevsk, Russia.

REFERENCES

1. Kachurin N.M., Borshchevich A.M., Kachurina O.N., Bukhtiyarov A.A. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti*. 2010, no 5, pp. 24–28.

2. Socolov E.M. et al. System of imitation for forecasting the ¹³⁷Cs migration in the radioactive trace zone at the Chernobyl Atomic Power Station failure. *International Symposium on Radiation Safety*. Moscow, 1994, pp. 101–103.

3. Kachurin N.M. Conceptual rules of the monitoring of the «Environment Human Health» system in the Russian Federation. *The 2-nd International Symposium «Mining and Environmental Protection»*. Belgrade, 1998, pp. 21–26.

4. Kachurin N.M., Babovnikov A.L. Gassing during the break and transport of coal in a retreatlong-wall. *Development of new technologies and equipment for mine haulage and hoisting*. Budva, 2005, pp. 245–249.

5. Siemek J., Rajtar J. Simulation of gas outflow from porous fissured media. *Arch. Mining. Sci.* 1989. 34, no 1, pp. 119–128.
6. Yanovskaya M. F. *Problemy rudnichnoy aerologii: sbornik statey* (Problems of mine aerology: collection of articles), Moscow, Gosgortekhzdat, 1959, pp. 32–37.
7. Vasyuchkov Yu. F. *Khimiya tverdogo topliva*. 1976, no 4, pp. 76–79.
8. Kachurin N. M. *Podzemnaya razrabotka tonkikh i sredney moshchnosti ugol'nykh plastov: sbornik statey* (Underground development of thin and average power of coal seams: collection of articles), Tula, TulPI, 1983, pp. 56–62.
9. Kachurin N. M. *Fiziko-tekhnicheskie problemy upravleniya vozdukhooobmenom v gornykh vy-rabotkakh bol'shikh ob'emov: sbornik statey* (Underground development of thin and average power of coal seams: collection of articles), Leningrad, 1983, pp. 83.
10. Kachurin N. M. *Podzemnaya razrabotka tonkikh i sredney moshchnosti ugol'nykh plastov: sbornik statey* (Physical-technical problems of control of air in mines large volumes: collection of articles), Tula, TulPI, 1983, pp. 74–80.
11. Kachurin N. M., Ermakov A. Yu., Senkus Val. V. Aerogazodinamika ochistnykh i podgotovitel'nykh zaboev pri otrabotke moshchnykh pologikh plastov (Aerogasdynamics cleaning and preparatory faces during the mining of thick flat seams), Kemerovo, AI «Kuzbassvuzizdat», 2017, 287 p.
12. Yarunin S. A., Bukhny D. I. *Ventilyatsiya i gazodinamicheskie yavleniya v shakhtakh: sbornik statey* (Ventilation and gas – dynamic phenomena in mines: collection of articles), Novosibirsk, 1981, pp. 6–12.

FIGURES

Fig. 1. Models of methane release from exposed surface of coal seam under mining: development heading (a); production heading (b).

Fig. 2. Graphs of $\Theta_1(\tau)$ and $\Theta_2(\tau)$ for different ranges of the variable τ : during driving development heading (a); in the period of isolated ventilation of development heading (b).

TABLES

Table 1. Approximation of the relation $\Theta_1 = \Theta_1(\tau)$.

Table 2. Approximation of the relation $\Theta_2 = \Theta_2(\tau)$.



НОВИНКИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ГОРНАЯ КНИГА»



Кузнецов Ю.Н., Курцев Б.В., Стадник Д.А., Стадник Н.М.
**Научные основы формирования геоинформационной базы прогно-
 зирования и оценки запасов угольных месторождений: Монография**
 Год: 2017

Страниц: 126
 ISBN: 978-5-98672-475-1
 UDK: 622.1; 622.28

Осуществлен анализ результатов научных исследований, тенденций и направлений совершенствования теории и практики создания систем автоматизированного проектирования горных предприятий с учетом позитивной динамики развития трехмерного моделирования угольных месторождений. Установлено, что при наличии в настоящее время мощных и высокоразвитых систем автоматизированного проектирования на первый план выходят вопросы совершенствования методов трехмерного моделирования угольных месторождений, позволяющих эффективно прогнозировать характеристики горно-геологических условий их залегания и зонировать их в автоматизированном режиме. Обоснована необходимость разработки и сформирована структура интегрированной геоинформационной базы прогнозной оценки запасов угольных месторождений, освоение запасов которых должно быть реализовано на базе технологических систем, адаптивных к специфике их природной аккумуляции. Предложены нейросетевая модель распознавания природных геоструктур, способная «работать» в условиях неполной и нечеткой информации о месторождении, и алгоритм ее практической реализации.