

УДК 681.518.52:622.53

В. Н. Павлыш, Л. А. Лазебная

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк 83001, г. Донецк, ул. Артёма, 58

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ ДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА АНИЗОТРОПНЫЕ ПОДЗЕМНЫЕ МАССИВЫ

V. N. Pavlysh, L. A. Lazebnaya

State Educational Institution of Higher Education «Donetsk national technical University», Donetsk city 83001, Donetsk, Artema str., 58

THE MATHEMATICAL MODELS AND CONTROL ALGORITHMS OF DYNAMIC TREATMENT PROCESSES ON ANISOTROPIC UNDERGROUND MASSIFS

В. М. Павлиш, Л. О. Лазебна

Державна освітня установа вищої професійної освіти «Донецький національний технічний університет», м. Донецьк 83001, м. Донецьк, вул. Артема, 58

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ТА АЛГОРИТМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСАМИ ДИНАМІЧНОЇ ДІЇ НА АНІЗОТРОПНІ ПІДЗЕМНІ МАСИВИ

Представлены результаты формирования детерминированных математических моделей и разработки алгоритмов управления процессами динамического воздействия на угольный пласт как на анизотропный подземный массив для снижения его опасных свойств при подземной угледобыче. Рассмотрены три основных технологических способа воздействия, в основу алгоритмов положены требования равномерности распределения активных сил в области обработки, отражающие физику процесса.

Ключевые слова: процесс, математическая модель, управление, алгоритм, воздействие.

The results of determined mathematical models construction and automatic control algorithms of dynamic treatment processes on coal stratum as anisotropic underground massif for its dangerous properties reducing during underground mining are represented. Three main treatment technological schemes are considered, the base of algorithms is requirement of active forces uniform distribution in deal area, which attracts the physics of process.

Key words: process, mathematical model, control, algorithm, treatment.

Представлені результати формування детермінованих математичних моделей та розробки алгоритмів керування процесами динамічної дії на вугільний пласт як на анізотропний підземний масив для зниження його небезпечних властивостей при підземному вугледобутку. Розглянуто три основні технологічні способи дії, в основу алгоритмів покладено вимоги рівномірності розподілу активних сил в зоні обробки, що відбиває фізику процесу.

Ключові слова: процес, математична модель, керування, алгоритм, дія.

Актуальность работы. Применение способов и схем динамического воздействия на угольный пласт для борьбы с проявлениями его опасных свойств является обязательным на шахтах и регламентировано нормативными документами [1].

В работах многих отечественных и зарубежных учёных рассматриваются три основных способа воздействия на угольные пласты [2-4]: а) гидравлическое воздействие; б) пневматическая обработка; в) дегазация различных зон угольных пластов и их спутников.

Из них к настоящему времени наиболее широко внедрено гидравлическое воздействие, которое применяется как средство борьбы с основными опасностями при подземной угледобыче. Трудями многих исследователей созданы основы теории и технологии гидровоздействия, тем не менее, в этой области еще остаются проблемы как в теоретическом аспекте, так и в области технологии.

В частности, стоит задача разработки системы автоматизированного управления процессом для повышения эффективности воздействия.

В этой связи задача разработки алгоритмов управления процессами является актуальной.

Цель работы – обоснование алгоритмов функционирования и параметров подсистемы автоматизированного управления процессами комплексного воздействия на анизотропный угольный пласт.

Содержание работы

На данном этапе благодаря полученным в работах [3-5] результатам есть основания ставить задачу развития теоретических основ и технологии комплексного гидропневматического воздействия на угольные пласты, включающего три последовательные стадии.

1. Пневматическая обработка неувлажненного пласта. На этой стадии обеспечивается вынос свободного и десорбирующегося метана. Кроме того, этот способ имеет перспективу в аспекте изменения физико-химического состояния пласта и, возможно, позволит снизить способность пласта к самовозгоранию.

2. Гидравлическое воздействие. Этот вид воздействия за счет применения разработанных технологий позволяет произвести насыщение угольного пласта жидкостью, что обеспечивает снижение пылеобразования, способствует уменьшению газовыделения и тем самым оказывает положительное влияние на условия труда при подземной угледобыче.

3. Дегазация призабойной зоны пласта. Этот вид воздействия позволяет снизить газовыделение в лаву.

Рассмотрим основные звенья технологической цепочки при реализации комплексного гидропневматического воздействия.

1. Пневматическая обработка

Основной вариант технологической схемы приведен в [4], где указывается рекомендуемое оборудование и геометрические параметры.

Формирование математической модели процесса

Считая, что движение газовой смеси подчиняется закону Дарси, и используя уравнения неразрывности для компонентов потока, запишем уравнения фильтрации газов относительно их концентрации [3], [4]

$$n_{\text{э}} \frac{\partial C}{\partial t} = \operatorname{div} \left[\frac{kT}{\mu n_{\text{э}}} C \operatorname{grad} (CR) \right] - W_M - W_O. \quad (1)$$

$$n_{\text{э}} \frac{\partial C_M}{\partial t} = \operatorname{div} \left[\frac{kT}{\mu n_{\text{э}}} C_M \operatorname{grad} (CR) \right] - W_M, \quad (2)$$

$$n_{\text{э}} \frac{\partial C_O}{\partial t} = \operatorname{div} \left[\frac{kT}{\mu n_{\text{э}}} C_O \operatorname{grad} (CR) \right] - W_O, \quad (3)$$

где C – концентрация газа в фильтрационном объёме, г/см³;

T – абсолютная температура смеси газов, К°;

μ – вязкость смеси, н.с/м²;

R – газовая постоянная, дж/кг.град;

W – скорость притока газа из пористых блоков в фильтрационный объём, г/см².с;

«м», «о» – индексы, относящиеся соответственно к метану и кислороду; переменная без индексов относится к метановоздушной смеси.

Наиболее эффективным и экономичным является циклический режим пневмообработки угольного пласта, через длинные скважины, параллельные линии очистного забоя. Четные скважины являются нагнетательными, нечетные – отточными.

Темп нагнетания

$$q = 0,33 \cdot 10^{14} \operatorname{ml}_{\phi} K \frac{P_H^2}{L_{M.C.}}, \text{ м}^3/\text{мин}. \quad (4)$$

Продолжительность циклов нагнетания определяется снижением концентрации метана в отточной скважине до 50 – 60%, первоначальная продолжительность определяется по формуле

$$t_H = 0,2 \cdot 10^{-15} \frac{L_{M.C.}^2 n_{\text{э}} P_{\Gamma}}{K P_H^2}, \text{ сут}. \quad (5)$$

Общая продолжительность воздействия определяется интенсивностью выноса метана при нагнетании воздуха и в типичных условиях составляет 150 суток. Съём газа при пневмообработке за этот период на 35 – 40% выше, чем при дегазации. По такой технологии проводится пневмообработка неувлажнённого пласта.

Наряду с этим пневмообработка угольного пласта позволяет снизить его химическую активность практически до безопасных пределов. Для пластов, имеющих показатель химической активности угля 0,06 мл/г.час (максимальное значение для каменных углей), время пневмообработки, требуемое для снижения этого показателя до 0,015 мл/г.час (значение, соответствующее категории пластов, малоопасных по возгоранию), составляет 130 суток. При этом в большинстве случаев пневмообработка не приводит к существенному нагреву угольного пласта: в любых условиях повышение температуры не является опасным с точки зрения самовозгорания.

Промежуток времени между циклами нагнетания соответствует восстановлению концентрации метана в отточной скважине до максимального значения.

Общее время пневмообработки по фактору снижения газоносности определяется моментом, когда нагнетание воздуха перестаёт существенно влиять на вынос метана (когда продолжительность циклов нагнетания по вышеприведенному условию становится практически равной нулю). Снижение газоносности массива за все время воздействия составляет

$$\delta X = \frac{a_{M_0} - a_{M.ICX}}{1,1a_{M_0} - a_{M.ICX}} \cdot 100\%. \quad (6)$$

Время, требуемое для уменьшения показателя химической активности угля от исходного до значения a'_0

$$T_H = 2,5 \frac{a_{0_{исх}} - a'_0}{a_{0_{исх}} a'_0}, \text{ сут.} \quad (7)$$

2. Гидравлическая обработка

Рекомендуется как второй этап комплексного воздействия, следующий за пневмообработкой неувлажненного пласта.

Начало воздействия непосредственно следует за окончанием пневмовоздействия, при этом важным является тот факт, что скважины, через которые производилась пневмообработка, могут быть использованы как элементы технологии гидравлического воздействия.

Формирование математической модели

Процесс фильтрации жидкости в угольном пласте описывается нелинейным дифференциальным уравнением параболического типа:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \text{div}(\lambda(P) \text{grad} P), \quad (8)$$

$$\text{где } \lambda(P) = \begin{cases} \frac{k}{\mu n_\varepsilon} P & \text{– на контуре потока жидкости;} \\ \chi = \frac{k}{\mu} E_y & \text{– в заполненной области;} \end{cases}$$

χ – коэффициент пьезопроводности;

E_y – модуль упругости вещества угля.

В качестве начального условия принимается равенство нулю давления жидкости в каждой точке:

$$P(x, y, z, 0) = 0. \quad (9)$$

В зависимости от вида рассматриваемой области, схемы расположения скважин и режима их работы могут использоваться различные типы граничных условий.

3. Алгоритмы управления процессами

Управление процессами гидравлического, пневматического и комплексного воздействия строится на основе математических моделей, т.к. объект воздействия является недоступным для непосредственного наблюдения, контроль процессов осуществляется по результатам измерений наблюдаемых параметров.

Введем обозначения структурных элементов системы управления:

ОС – одиночная скважина;

ЛС – локальный способ;

РС – региональный способ;

ВПК – вскрытие пластов квершлагами;

КГО – каскадная гидрообработка.

При построении системы управления процессом важной составляющей является блок математического обеспечения, предназначенный для имитации состояния и оперативного определения текущих результатов обработки.

Моделирование гидравлического воздействия с использованием численных методов представляет собой расчет изменения во времени поля давлений нагнетаемой жидкости в заданной области и определение на его основе распределения жидкости в массиве. Процесс напорного движения жидкости в трещиноватой среде, какой

является угольный пласт, описывается дифференциальным уравнением фильтрации, конкретная область воздействия и технологическая схема задаются в виде исходных данных, начальных и граничных условий.

Алгоритмы и программы, осуществляющие реализацию математической модели, являются открытыми, т.е. могут быть дополнены практически любыми условиями и исходными данными.

Общий алгоритм решения является универсальным, он обеспечивает возможность моделировать все приведенные выше схемы как для одиночной скважины, так и для каскада. Основная программа составлена для двумерной постановки задачи. Различные варианты схем, режимов и положения области решения задаются набором исходных данных и заменой некоторых операторов программы. Укрупненная блок-схема алгоритма представлена на рис. 1.

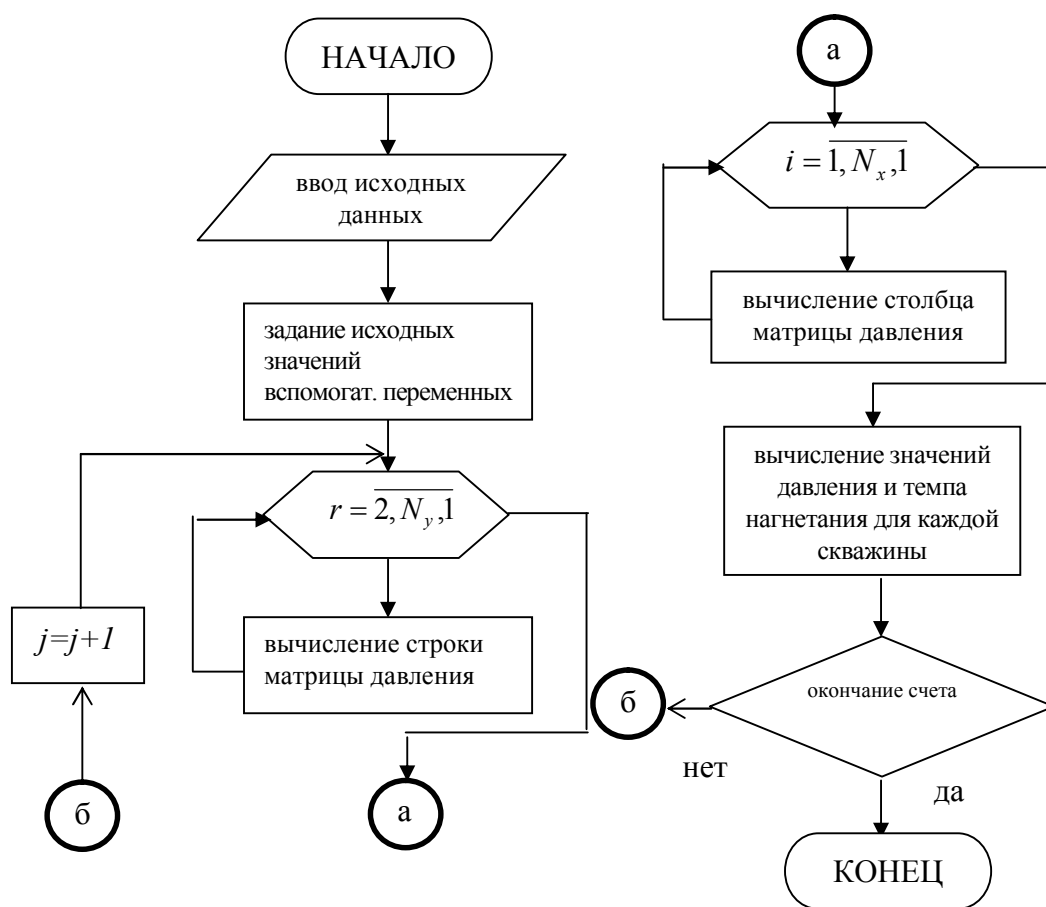


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритма основной программы (MODEL)

Задача автоматизации управления – стабилизация параметров технологии воздействия.

В состав системы включаются технологические схемы всех способов воздействия, координацию работы осуществляет центральный модуль (ЦМ). Обобщенная структура системы приведена на рис. 2.

Коммутатор выбирает заданную технологическую схему и задает направление дальнейшего функционирования.

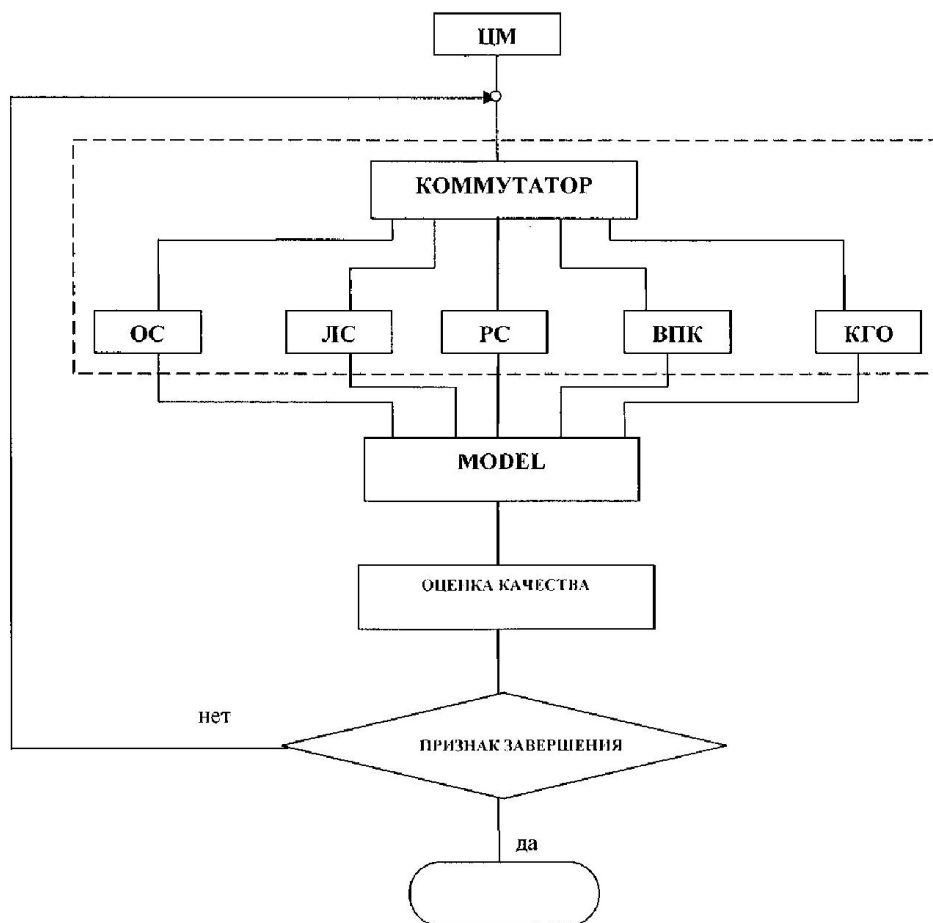


Рисунок 2 – Структурно-функциональная схема системы

Введем обозначения:

САУППО – система автоматизированного управления процессами гидропневмообработки угольного пласта;

ПСУППО – подсистема управления процессом пневмообработки;

ПСУПГО – подсистема управления процессом гидрообработки.

При реализации комплексного воздействия гидравлическая обработка рекомендуется как второй этап, следующий за пневматической обработкой неувлажненного пласта.

Начало воздействия непосредственно следует за окончанием пневмовоздействия, при этом важным является тот факт, что скважины, через которые производилась пневмообработка, могут быть использованы как элементы технологии гидравлического воздействия.

На рис. 3 приведена обобщенная структура системы автоматизированного управления процессами гидропневмообработки угольных пластов, учитывающая рассмотренные особенности.

Установлено, что процесс гидравлического воздействия на угольный пласт сопровождается резкими колебаниями основных технологических параметров (давления и темпа нагнетания) в широком диапазоне, обусловленными выраженной анизотропией фильтрационных свойств угольного массива, что определяет необходимость применения средств контроля и управления технологическим оборудованием, обеспечивающих стабилизацию параметров процесса и повышение эффективности обработки пласта.

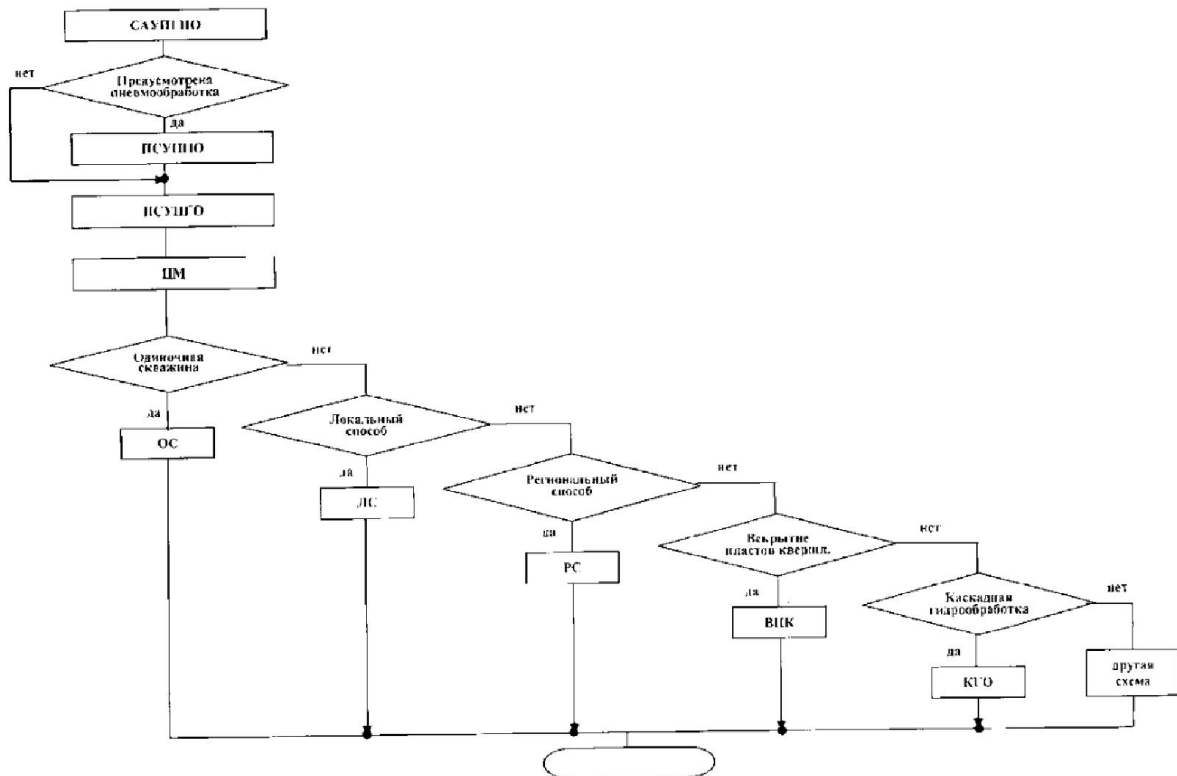


Рисунок 3 – Обобщенная структура системы автоматизированного управления процессами гидропневмообработки угольного пласта

Разработаны структура и алгоритм функционирования устройства контроля параметров и управления процессом нагнетания жидкости в анизотропный пласт через одиночную скважину, которая является базовой единицей системы автоматизированного управления процессом гидравлического воздействия. В основу функционирования устройства положен программный принцип выполнения алгоритма управления процессом нагнетания, реализуемый микроконтроллером.

Математические модели процесса гидравлического воздействия на угольный пласт составляют математическое обеспечение системы автоматизированного управления обработкой анизотропных массивов. Определены параметры технологии и системы управления:

- а) контролируемые параметры – давление и темп нагнетания, объем поданной рабочей жидкости, время обработки, показатель качества и эффективности процесса;
- б) управляющий параметр – темп нагнетания.

Вывод

В результате проведенных исследований сформированы детерминированные математические модели процесса гидравлического воздействия на угольный пласт, в основу которых положены уравнения нелинейно-упругой фильтрации жидкости в сплошной среде.

Разработана общая структура системы управления процессом гидравлического воздействия, включающая все практически используемые схемы и режимы гидравлической обработки.

Разработаны структура и состав математического обеспечения системы, включающие математические модели процесса и алгоритмы их реализации.

Сформирована математическая модель процесса напорной фильтрации воздуха в угольном пласте при пневмообработке, основанная на системе нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных и краевых условий.

Разработана структура подсистемы управления процессом пневмообработки, а также системы автоматизированного управления процессами комплексного гидропневматического воздействия на угольный пласт.

Список литературы

1. ДНАОП 1.1.30-1.ХХ-04. Безопасное ведение горных работ на пластах, склонных к газодинамическим явлениям (1-я редакция) [Текст]. – К. : Минтопэнерго Украины, 2004. – 268 с.
2. Гидродинамическое воздействие на газонасыщенные угольные пласты: монография [Текст] / А. Ф. Булат, К. К. Софийский, Д. П. Силин и др. – Днепропетровск, 2003. – 220 с.
3. Павлыш В.Н. Развитие теории и совершенствование технологии процессов воздействия на угольные пласты [Текст] : монография. – Донецк : РВА ДонНТУ, 2005. – 347 с.
4. Павлыш В. Н. Основы теории и параметры технологии процессов гидропневматического воздействия на угольные пласты [Текст] : монография / В. Н. Павлыш, Ю. М. Штерн. – Донецк : «ВИК», 2007. – 400 с.
5. Теоретические основы процессов комплексного гидропневматического воздействия на угольные пласты [Текст] : монография / Павлыш В. Н., Гребёнкин С. С., Бондаренко В. И., Агафонов А. В., Штерн Ю. М., Гальченко А. М. ; под общ. ред. Павлыша В. Н. – Донецк : «ВИК», 2006. – 273 с.
6. Павлыш В. Н. Проект построения алгоритма классификации текстовых документов [Текст] / В. Н. Павлыш, Е. И. Бурлаева // Проблемы искусственного интеллекта. – Донецк : ГУ ИПИИ. – 2017. – № 4 (7). – С. 24–32.

References

1. DNAOP 1.1.30-1.KHKH-04. *Bezopasnoye vedeniye gornyykh rabot na plastakh, sklonnykh k gazodina-mi-cheskim yavleniyam* (1-ya redaktsiya) [DNAOP 1.1.30-1.XX-04 Safe Mining Works on gas dynamic phenomenon stratum (1-st redaction)], K., Mintopenergo Ukrainy, 2004, 268 p.
2. Bulat A. F., Sofiyskiy K. K., Silin D. P. i dr. *Gidrodinamicheskoye vozdeystviye na gazonasyshchennyye ugol'nyye plasty*: monografiya [Hydrodynamic action on gas contains coal stratum: monograph], Dnepropetrovsk, 2003, 220 p.
3. Pavlysh V. N. *Razvitiye teorii i sovershenstvovaniye tekhnologii protsessov vozdeystviya na ugol'nyye plasty* [The development of theory and modification of technology of coal stratum treatment: monograph], Donetsk, RVA DonNTU, 2005, 347 p.
4. Pavlysh V. N., Shtern J. M. *Osnovy teorii i parametry tekhnologii protsessov gidropnevmaticheskogo voz-deystviya na ugol'nyye plasty* [The base of theory and technological parameters of hydro-pneumatic treatment processes on coal stratum: monograph], Donetsk, “VIK”, 2007, 400 p.
5. Pavlysh V. N., Grebyonkin S. S., Bondarenko V. I., Agafonov A. V., Shtern J. M., Galchenko A. M. *Teoreticheskiye osnovy protsessov kompleksnogo gidropnevmaticheskogo vozdeystviya na ugol'nyye plasty* [The theoretical base of complex hydro-pneumatic treatment processes on coal stratum: monograph] ; Red. Pavlysh V.N. ; Donetsk, “VIK”, 2006, 273 p.
6. Pavlysh V. N., Burlayeva Ye. I. *Proyekt postroyeniya algoritma klassifikatsii tekstovykh dokumentov* [Draft of the algorithm for the classification of text documents] *Problemy iskusstvennogo intellekta* [Problems of Artificial Intelligence], 2017, no. 4 (7), pp. 24–32.

RESUME

V. N. Pavlysh, L. A. Lazebnaya

The Mathematical Models and Control Algorithms of Dynamic Treatment Processes on Anisotropic Underground Massifs

The use of methods and schemes of hydraulic stimulation to combat manifestations of its hazardous properties, is compulsory in the mines. In the works of many domestic and foreign scientists examined three basic ways of influence on coal seams: hydraulic impact,

pneumatic handling and degassing of coal seams of different zones. Many scientists works based theory and technology of action, but there are as theoretical both technologic problems.

In this regard, the development of models and algorithms for managing is actual.

The purpose of the work – justification algorithms and parameters automatic control subsystem processes integrated effects on anisotropic coal seam.

To build deterministic mathematical model of process of pneumatic impact it is anticipated that the movement of a gas mixture that obeys the law of Darcy. Using the continuity equation for flow components, filtration equations are written on their concentration.

The most efficient and economical is cyclical mode pneumatic action coal seam through long wells, parallel lines of control. Even wells are pressure, odd- exiting.

When you implement a complex influence of hydraulic treatment is recommended as a second stage, following the pneumatic processing of non moistreservoir.

Beginning immediately after the end of exposure pneumatic action, while important, is the fact that the well was carried out through pneumatic action may be used as elements of technology of hydraulic impact.

The basis for the functioning of the device was based on the principle of software running discharge management, implemented by the microcontroller.

Mathematical model of hydraulic impact on coal seam form the mathematical software systems for automated control of anisotropic processing arrays. The parameters of technology and management systems:

a) parameters monitored-pressure and discharge temp amount filed, fluid processing time, an indicator of the quality and efficiency of the process;

b) managing the-tempo.

The generalized structure of computer aided process management hydro-pneumatic treatment of coal seams, considered sensitive features.

As a result of the lead researches formed deterministic mathematical models of hydraulic impact on coal seam based on the equation of nonlinear-elastic fluid filtration in solid Wednesday.

A general structure of hydraulic impact management system that includes almost all used hydraulic regimes and schema processing.

Developed the structure and composition of software systems including mathematical models and algorithms for their implementation process.

Developed subsystem pneumatic action management structure, as well as computer-aided process management integrated fluid power impact on coal seam.

РЕЗЮМЕ

В. Н. Павлыш, Л. А. Лазебная

Математические модели и алгоритмы управления процессами динамического воздействия на анизотропные подземные массивы

Применение способов и схем гидравлического воздействия на пласт для борьбы с проявлениями его опасных свойств является обязательным на шахтах. В работах многих отечественных и зарубежных учёных рассматриваются три основных способа воздействия на угольные пласты: гидравлическое воздействие, пневматическая обработка и дегазация различных зон угольных пластов.

Трудами многих исследователей созданы основы теории и технологии воздействия, тем не менее, в этой области еще остаются проблемы как в теоретическом аспекте, так и в области технологии.

В этой связи задача разработки моделей и алгоритмов управления процессами является актуальной.

Цель работы – обоснование алгоритмов функционирования и параметров подсистемы автоматизированного управления процессами комплексного воздействия на анизотропный угольный пласт.

Для построения детерминированной математической модели процесса пневматического воздействия предполагается, что движение газовой смеси подчиняется закону Дарси. Используя уравнения неразрывности для компонентов потока, записываются уравнения фильтрации газов относительно их концентрации.

Наиболее эффективным и экономичным является циклический режим пневмообработки угольного пласта, через длинные скважины, параллельные линии очистного забоя. Четные скважины являются нагнетательными, нечетные – отточными.

При реализации комплексного воздействия гидравлическая обработка рекомендуется как второй этап, следующий за пневматической обработкой неувлажненного пласта.

Начало воздействия непосредственно следует за окончанием пневмовоздействия, при этом важным является тот факт, что скважины, через которые производилась пневмообработка, могут быть использованы как элементы технологии гидравлического воздействия.

В основу функционирования устройства положен программный принцип выполнения алгоритма управления процессом нагнетания, реализуемый микроконтроллером.

Математические модели процесса гидравлического воздействия на угольный пласт составляют математическое обеспечение системы автоматизированного управления обработкой анизотропных массивов. Определены параметры технологии и системы управления:

- а) контролируемые параметры – давление и темп нагнетания, объем поданной рабочей жидкости, время обработки, показатель качества и эффективности процесса;
- б) управляющий параметр – темп нагнетания.

Приведена обобщенная структура системы автоматизированного управления процессами гидропневмообработки угольных пластов, учитывающая рассмотренные особенности.

В результате проведенных исследований сформированы детерминированные математические модели процесса гидравлического воздействия на угольный пласт, в основу которых положены уравнения нелинейно-упругой фильтрации жидкости в сплошной среде.

Разработана общая структура системы управления процессом гидравлического воздействия, включающая все практически используемые схемы и режимы гидравлической обработки.

Разработаны структура и состав математического обеспечения системы, включающие математические модели процесса и алгоритмы их реализации.

Разработана структура подсистемы управления процессом пневмообработки, а также системы автоматизированного управления процессами комплексного гидропневматического воздействия на угольный пласт.

Статья поступила в редакцию 05.02.2019.