

УДК 681.518.52:622.53

Л. А. Лазебная

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

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ АЛГОРИТМЫ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ АЭРОГИДРОДИНАМИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ В АНИЗОТРОПНОЙ СРЕДЕ

L. A. Lazebnaya

State Educational Institution of Higher Professional Education «Donetsk National Technical University»
83001, Donetsk, st. Artema, 58

MATHEMATICAL MODELS AND COMPUTATIONAL ALGORITHMS IN THE CONTROL SYSTEM OF AEROHYDRODYNAMIC PROCESSES IN ANISOTROPIC MEDIUM

Рассматривается процесс управления комплексным пневматическим и гидравлическим воздействием на угольный пласт, который рассматривается как анизотропная сплошная среда. В составе системы автоматизированного управления предусматривается блок имитационного моделирования, состоящий из комплекса математических моделей и алгоритмов их численной реализации. В основу математических моделей положены уравнения частных производных, описывающие процессы с учетом трещиновато-пористой структуры пласта.

Ключевые слова: уравнение, математическая модель, процесс, алгоритм, численный метод.

The process of controlling the complex pneumatic and hydraulic action on a coal seam is considered, which is considered as an anisotropic continuous medium. As part of the automated control system, a block of simulation modeling is provided, consisting of a complex of mathematical models and algorithms for their numerical implementation. The mathematical models are based on partial differential equations that describe the processes taking into account the fractured-porous structure of the reservoir.

Key words: equation, mathematical model, process, algorithm, numerical method.

Актуальность работы. В комплексе средств предотвращения проявлений негативных свойств угольного пласта при подземной угледобыче обязательным мероприятием является предварительное многостадийное воздействие на разрабатываемый угольный пласт. Важным средством обеспечения эффективности воздействия является создание системы автоматизированного управления процессом, при этом возникает необходимость имитации процесса для расчета технологических параметров, что осуществляется с применением математического моделирования. Следовательно, в структуре системы управления одно из центральных мест занимает блок математического обеспечения, включающий математические модели и вычислительные алгоритмы. В этой связи тема разработки математических моделей и вычислительных алгоритмов в системе управления аэрогидродинамическими процессами в анизотропной среде является актуальной.

Цель работы – развитие комплекса математических моделей и алгоритмов, их численной реализации в системе автоматизированного управления процессом.

Основное содержание работы. Ставится задача 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 последовательность процесса.

1. Пневматическая обработка.

Основной вариант технологической схемы приведен в [1], где указывается рекомендуемое оборудование и геометрические параметры.

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

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

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.

Методика, технология и параметры этого этапа подробно описаны в работах авторов [1], [2].

Идея применения пневмообработки обоснована в [5], ряд важных результатов получен в [4].

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

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

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

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

где C – концентрация газа в фильтрационном объеме, 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 объем, г/см²·с;

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

Ввиду сложности полученной системы решить её аналитически не представляется возможным. Поэтому в качестве метода решения выбран универсальный конечно-разностный метод. Поскольку первые три уравнения системы (1-3) являются нелинейными, решение соответствующих разностных уравнений на каждом временном шаге может быть получено с использованием итераций [1-4].

С учётом сделанных предположений уравнения примут вид:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{kTR}{m^2 \mu} \frac{\partial}{\partial x} \left[C \frac{\partial C}{\partial x} \right]; \quad (4)$$

$$\frac{\partial C_M}{\partial t} = \frac{kTR}{m^2 \mu} \frac{\partial}{\partial x} \left[C_M \frac{\partial C}{\partial x} \right]; \quad (5)$$

$$\frac{\partial C_O}{\partial t} = \frac{kTR}{m^2 \mu} \frac{\partial}{\partial x} \left[C_O \frac{\partial C}{\partial x} \right]; \quad (6)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\beta \frac{C}{m\rho\beta_y} \frac{\partial T}{\partial x}. \quad (7)$$

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

T – абсолютная температура смеси газов, К°;

μ – вязкость смеси, н·с/м²;

m – мощность пласта, м;

ρ – плотность метано-воздушной смеси, г/см³;

β_y, β – удельные теплоемкости угля и метано-воздушной смеси, Дж/кг·град;

R – газовая постоянная, Дж/кг·град;

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

Начальные условия:

$$\begin{aligned} C(x,0) &= C_m(x,0) = C_{m.исх}; \\ C_o(x,0) &= 0; \\ T(x,0) &= T_o. \end{aligned} \tag{8}$$

Граничные условия:

$$\begin{aligned} C(0,t) &= \frac{P_n m}{RT}; \quad C_o(0,t) = 0.23 \frac{P_n m}{RT}; \\ C_m(0,t) &= 0; \quad C(L,t) = \frac{P_{амм} m}{RT}; \\ C_m(L_{м.с},t) &= 0.77 C(L_{м.с},t); \quad C_o(L_{м.с},t) = 0.23 C(L_{м.с},t); \\ 0 \leq x \leq L_{м.с}; \quad t \geq 0. \end{aligned} \tag{9}$$

Здесь $C_{m.исх}$ – концентрации свободного метана в необработанном массиве;
 P_n – давление нагнетания воздуха;
 $L_{м.с}$ – расстояние между нагнетательной и отточной скважинами, м.

Рассмотрим математический аппарат, предлагаемый для решения поставленной краевой задачи.

Пусть имеем первую краевую задачу:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(K(x,t) \frac{\partial u}{\partial x} \right), \\ 0 \leq x \leq 1, \quad 0 \leq t \leq T \quad &u(x,0) = u_o(x) \\ u(0,t) = \mu_1(t), \quad u(1,t) &= \mu_2(t). \end{aligned} \right\} \tag{10}$$

Введем сетку $w_{h\tau} = w_h \times w_\tau$,

где $w_h = \{x_i = ih, i = 0, 1, \dots, N, hN = l\}$

$w_\tau = \{t_n = n\tau, n = 0, 1, \dots, K, K\tau = T\}$

Обозначим $y_i^n = y(x_i, t_n)$ $y_{t,i}^n = \frac{y_i^{n+1} - y_i^n}{\tau}$, $y_{xx,i}^n = \frac{y_{i+1}^n - 2y_i^n + y_{i-1}^n}{h^2}$,

$Lu \sim \Lambda(t)y_i$.

Разностная схема с весами для задачи имеет вид:

$$\frac{y_i^{n+1} - y_i^n}{\tau} = \Lambda(t) (\sigma y_i^{n+1} + (1-\sigma)y_i^n), i = 1, 2, \dots, N-1.$$

$$y_0^n = \mu_1(t_n), \quad y_N^n = \mu_2(t_n), \quad y_i^0 = u_0(x_i), \quad \text{где } t \in [t_n, t_{n+1}]$$

Рассмотрим нелинейное уравнение: $\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K(u) \frac{\partial u}{\partial x} \right) + f(u)$

Неявная схема: $\frac{y_i^{n+1} - y_i^n}{\tau} = \frac{1}{h} \left(a_{i+1} \frac{y_{i+1}^{n+1} - y_i^{n+1}}{h} - a_i \frac{y_i^{n+1} - y_{i-1}^{n+1}}{h} \right) + f(y_i^n)$, где

$a_i = 0.5(K(y_i^n) + K(y_{i-1}^n))$. Эта схема абсолютно устойчива и имеет погрешность аппроксимации порядка $O(\tau + h^2)$. В сокращенном виде:

$$y_{i,i}^n = \frac{1}{2} \left((Ky_{\bar{x}})_{x,i} + (Ky_x)_{\bar{x},i} \right) + f(y_i^n), \text{ где } K_i = K(y_i^n).$$

Рассматриваем задачу напорной фильтрации воздуха.

Воспользуемся схемой: $y_{i,i}^n = \frac{1}{2} \left((Ky_{\bar{x}})_{x,i} + (Ky_x)_{\bar{x},i} \right) + f(y_i^n)$, где $K_i = K(y_i^n)$, $a_i = 0.5(K(y_i^n) + K(y_{i-1}^n))$. Пусть x, y, z, w соответственно приближенное решение системы:

$$\begin{aligned} \frac{x_i^{n+1} - x_i^n}{\tau} &= \frac{Kw_i^n R}{m^2 \mu h} \left[\frac{(x_{i+1}^n + x_i^n)x_{i+1}^{n+1}}{2h} - \frac{(x_{i+1}^n + 2x_i^n + x_{i-1}^n)x_i^{n+1}}{2h} + \frac{(x_i^n + x_{i-1}^n)x_{i-1}^{n+1}}{2h} \right] \\ x_0^n &= \frac{P_n m}{Rw_0^n}, \quad x_N^n = \frac{P_{амм} m}{Rw_N^n}, \quad x_i^0 = C_{м.исх} = C_0 \\ \frac{y_i^{n+1} - y_i^n}{\tau} &= \frac{Kw_i^n R}{m^2 \mu h} \left[\frac{(y_{i+1}^n + y_i^n)x_{i+1}^{n+1}}{2h} - \frac{(y_{i+1}^n + 2y_i^n + y_{i-1}^n)x_i^{n+1}}{2h} + \frac{(y_i^n + y_{i-1}^n)x_{i-1}^{n+1}}{2h} \right] \\ y_0^n &= 0, \quad y_N^n = 0.77x_N^n, \quad y_i^0 = x_i^0 = C_0 \\ \frac{z_i^{n+1} - z_i^n}{\tau} &= \frac{Kw_i^n R}{m^2 \mu h} \left[\frac{(z_{i+1}^n + z_i^n)x_{i+1}^{n+1}}{2h} - \frac{(z_{i+1}^n + 2z_i^n + z_{i-1}^n)x_i^{n+1}}{2h} + \frac{(z_i^n + z_{i-1}^n)x_{i-1}^{n+1}}{2h} \right] \\ z_0^n &= 0.23 \frac{P_n m}{Rw_0^n}, \quad z_N^n = 0.23x_N^n, \quad z_i^0 = 0 \\ \frac{w_i^{n+1} - w_i^n}{\tau} &= -\beta \frac{x_i^n}{m\rho\beta_y} \cdot \frac{w_{i+1}^{n+1} - w_i^{n+1}}{h}, \quad w_i^0 = T_0. \end{aligned} \quad (11)$$

Запишем систему для решения методом матричной прогонки:

$$\begin{aligned} -\frac{2h^2 m^2 \mu x_i^n}{Kw_i^n R \tau} &= (x_{i+1}^n + x_i^n)x_{i+1}^{n+1} - \left(x_{i+1}^n + 2x_i^n + x_{i-1}^n - \frac{2h^2 m^2 \mu}{Kw_i^n R} \right) x_i^{n+1} + (x_i^n + x_{i-1}^n)x_{i-1}^{n+1} \\ i &= 1, 2, \dots, N-1, \quad x_0^n = \frac{P_n m}{Rw_0^n}, \quad x_N^n = \frac{P_{амм} m}{Rw_N^n}, \quad n = 0, 1, \dots, K-1 \\ y_i^{n+1} &= y_i^n + \frac{Kw_i^n R \tau}{2h^2 m^2 \mu} \times \\ &\times \left[(y_{i+1}^n + y_i^n)x_{i+1}^{n+1} - (y_{i+1}^n + 2y_i^n + y_{i-1}^n)x_i^{n+1} + (y_i^n + y_{i-1}^n)x_{i-1}^{n+1} \right] \\ y_0^n &= 0, \quad y_N^n = 0.77x_N^n, \quad y_i^0 = x_i^0 = C_0 \\ z_i^{n+1} &= z_i^n + \frac{Kw_i^n R \tau}{2h^2 m^2 \mu} \times \\ &\times \left[(z_{i+1}^n + z_i^n)x_{i+1}^{n+1} - (z_{i+1}^n + 2z_i^n + z_{i-1}^n)x_i^{n+1} + (z_i^n + z_{i-1}^n)x_{i-1}^{n+1} \right] \\ z_0^n &= 0.23 \frac{P_n m}{Rw_0^n}, \quad z_N^n = 0.23x_N^n, \quad z_i^0 = 0 \\ \frac{-\beta x_i^n}{m\rho\beta_y h} w_{i+1}^{n+1} &+ \left(\frac{\beta x_i^n}{m\rho\beta_y h} - \frac{1}{\tau} \right) w_i^{n+1} = -\frac{1}{\tau} w_i^n, \quad w_i^0 = T_0 \end{aligned} \quad (12)$$

$$A_i y_{i-1} - C_i y_i + B_i y_{i+1} = -F_i, \quad i = 1, 2, \dots, N-1 \quad \alpha_{i+1} = \frac{B_i}{C_i - \alpha_i A_i}$$

$$\beta_{i+1} = \frac{A_i \beta_i + F_i}{C_i - \alpha_i A_i}$$

$$y_0 = \chi_1 y_1 + \mu_1 \quad y_N = \chi_2 y_{N-1} + \mu_2 \quad \alpha_1 = \chi_1 \quad \beta_1 = \mu_1$$

$$A_i \neq 0 \quad B_i \neq 0 \quad |C_i| \geq |A_i| + |B_i| \quad i = 1, 2, \dots, N-1 \quad |\chi_1| \leq 1 \quad |\chi_2| \leq 1$$

$$y_i = \alpha_{i+1} \cdot y_{i+1} + \beta_{i+1} \quad y_N = \frac{\chi_2 \beta_N + \mu_2}{1 - \chi_2 \alpha_N}.$$

Реализация предложенной вычислительной схемы позволяет промоделировать процесс пневмообработки для решения вопроса об области ее применения и возможной эффективности как средства снижения газовыделения из угольного пласта.

Как показано в работах ряда авторов [1], [2], [5], эффективным методом исследования динамики распространения жидкости в анизотропном угольном пласте для установления закономерностей движения и взаимодействия потоков при нагнетании жидкости является математическое моделирование. К настоящему времени сформированы системы уравнений, позволяющие эффективно решать задачи подобного рода.

Поэтому необходимо рассматривать двумерный случай (плоскостная фильтрация).

Уравнение процесса имеет вид:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \chi_x \frac{\partial}{\partial x} \left[(1 + \alpha(p - p_0)) \frac{\partial p}{\partial x} \right] + \chi_y \frac{\partial}{\partial y} \left[(1 + \alpha(p - p_0)) \frac{\partial p}{\partial y} \right]. \quad (13)$$

Начальные и граничные условия формулируются согласно технологической схеме.

Для решения задачи применяется схема продольно-поперечных направлений (схема Дугласа). Уравнение представляется в виде:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k(p) \frac{\partial p}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k(p) \frac{\partial p}{\partial y} \right]. \quad (14)$$

Область определения функции $p(x, y, t)$ покрывается сеткой:

$$x_i = i \cdot \Delta x, \quad i = 0, 1, 2, \dots, n;$$

$$y_j = j \cdot \Delta y, \quad j = 0, 1, 2, \dots, m;$$

$$t_k = k \cdot \Delta t, \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

Каждый шаг по времени осуществляется в два приема.

$$1) \quad \frac{p_{i,j}^{k+0,5} - p_{i,j}^k}{0,5 \cdot \Delta t} = \frac{1}{\Delta x^2} \left(k_{i+0,5,j}^{k+0,5} p_{i+1,j}^{k+0,5} - (k_{i+0,5,j}^{k+0,5} + k_{i-0,5,j}^{k+0,5}) p_{i,j}^{k+0,5} + k_{i-0,5,j}^{k+0,5} p_{i-1,j}^{k+0,5} \right) +$$

$$+ \frac{1}{\Delta y^2} \left(k_{i,j+0,5}^k p_{i,j+1}^k - (k_{i,j+0,5}^k + k_{i,j-0,5}^k) p_{i,j}^k + k_{i,j-0,5}^k p_{i,j-1}^k \right); \quad (15)$$

$$\begin{aligned}
 2) \quad & \frac{P_{i,j}^{k+0,5} - P_{i,j}^k}{0,5 \cdot \Delta t} = \frac{1}{\Delta x^2} \left(k_{i+0,5,j}^{k+0,5} P_{i+1,j}^{k+0,5} - (k_{i+0,5,j}^{k+0,5} + k_{i-0,5,j}^{k+0,5}) P_{i,j}^{k+0,5} + k_{i-0,5,j}^{k+0,5} P_{i-1,j}^{k+0,5} \right) + \\
 & + \frac{1}{\Delta y^2} \left(k_{i,j+0,5}^{k+1} P_{i,j+1}^{k+1} - (k_{i,j+0,5}^{k+1} + k_{i,j-0,5}^{k+1}) P_{i,j}^{k+1} + k_{i,j-0,5}^{k+1} P_{i,j-1}^{k+1} \right);
 \end{aligned} \tag{16}$$

Повышение качества воздействия возможно при условии поддержания стабильных значений параметров технологической схемы (давления и темпа нагнетания). Как показано в [3], эти параметры связаны между собой через коэффициент проницаемости, что соответствует физике процесса, а именно: снижение проницаемости при постоянном расходе приводит к возрастанию давления из-за увеличения сопротивления движению жидкости, и для приведения давления к расчетному необходимо расход соответственно снизить; напротив, увеличение проницаемости приводит к падению давления, и для его нормализации расход необходимо увеличить.

Частые колебания параметров происходят по причине изменения величины коэффициента фильтрации, что определяет необходимость автоматизации контроля параметров и их регулирования в процессе обработки массива.

Проект системы включает набор специализированных электронных устройств, функционирование которых координируется с помощью программируемого микроконтроллера, и пакета программ.

Структура базовой единицы системы приведена на рис. 1.

Сигналы с датчиков в виде синусоидального напряжения поступают на вход преобразователей с целью согласования выходного напряжения датчика с уровнем входного напряжения микроконтроллера. В микроконтроллере реализуется прием, хранение и обработка данных, расчет фактических параметров и их сравнение с паспортными данными, а также выработка и выдача на регулятор управляющих сигналов, если необходимо корректировать расход.

Контролируемые параметры: P, Q, T, t (здесь t – текущее время). Перед началом процесса задаются исходные данные, устанавливается $t = 0$, запускается устройство контроля и управления (УКУ).

УКУ считывает исходные данные и вычисляет установочные величины.

Величина Q задается на регулятор, устанавливающий требуемый расход, и осуществляется пуск насоса, после чего задается период опроса датчиков Δt . При достижении таймером значения времени, кратного Δt , выполняется очередной сеанс контроля – с датчиков считываются текущие значения $P(t)$ и $Q(t)$. Если $|P(t) - P| < 0,1P$, то работа продолжается, в противном случае вычисляется новое текущее значение коэффициента проницаемости k , необходимое для поддержания давления, значение Q и регулятор отработывает новое значение расхода. Критерием окончания процесса является достижение заданного времени обработки.

Блок-схема алгоритма приведена на рис. 2.

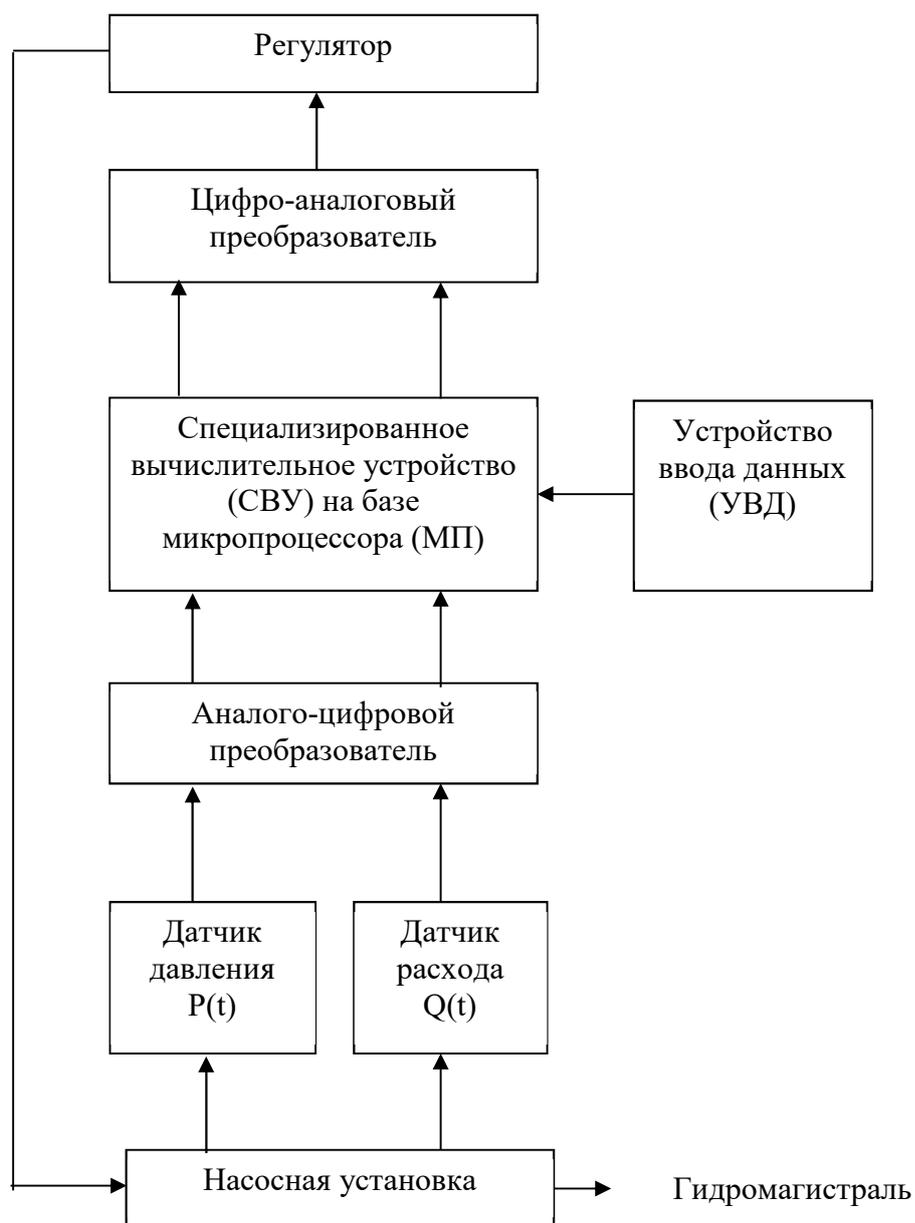


Рисунок 1 – Структура базовой единицы системы автоматизированного контроля и управления процессом нагнетания жидкости в угольный пласт

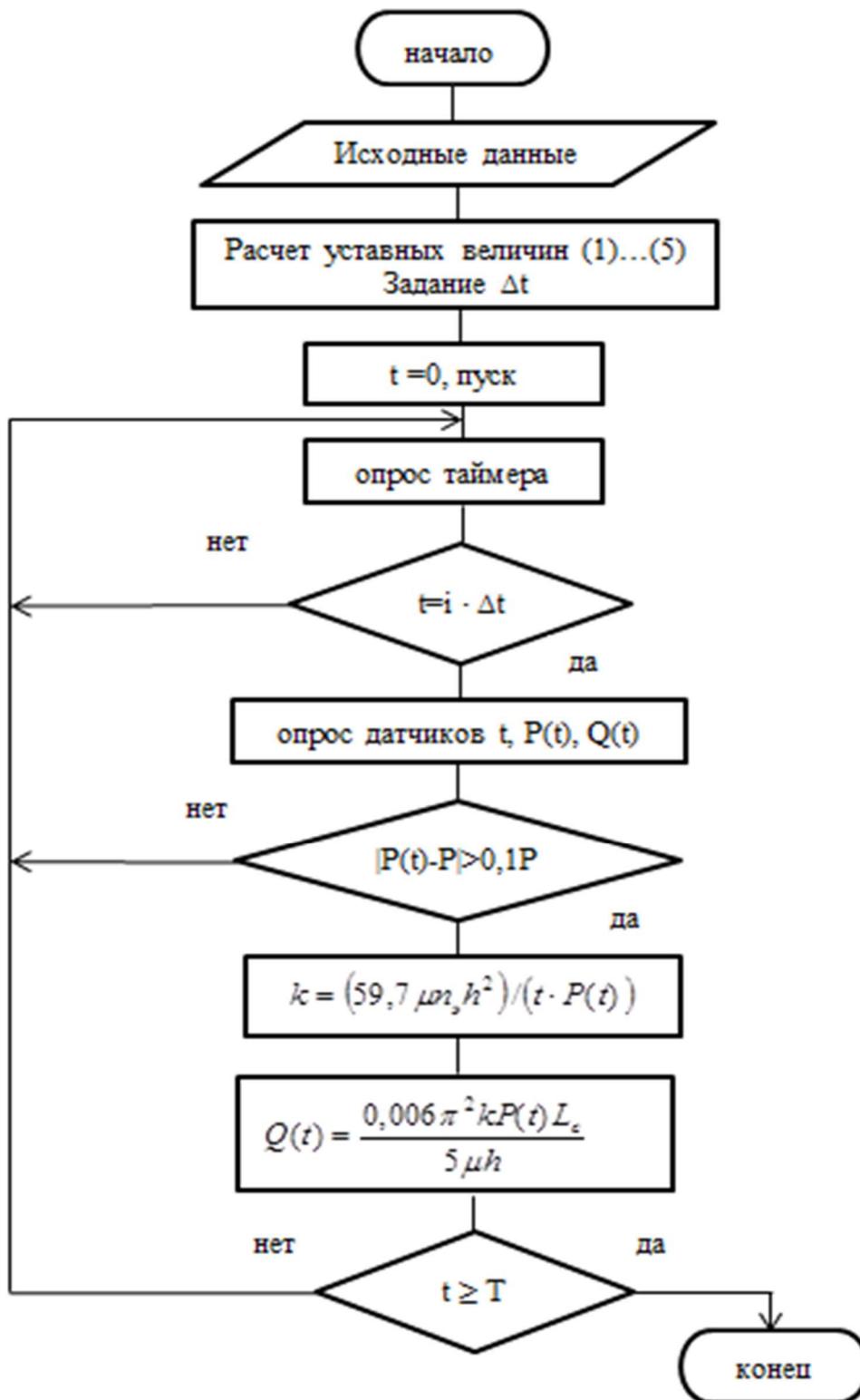


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма функционирования УК

В основу функционирования устройства положен программный принцип выполнения алгоритма управления процессом нагнетания, реализуемый микроконтроллером. Аппарат может быть выполнен либо на базе общепромышленных (универсальных) контроллеров, работающих на поверхности, либо во взрывобезопасном исполнении для использования в подземных условиях. В настоящее время свободно-программируемые контроллеры (ПК) приобрели законченную форму программно-технических устройств – это компьютер на микропроцессорной основе, отличающийся простотой программирования и технического обслуживания, а также приспособленный к эксплуатации в различных (в том числе и неблагоприятных) промышленных условиях (вибрация, нагрев, запыленность и т.д.).

Компанией GIC разработан ПК, который может быть реализован в различном исполнении (пылевлагозащищенный, искробезопасный шахтный и пр.) [1], [4]. Он состоит из четырех основных компонентов: центральный процессор (ЦП), устройство ввода-вывода (УВВ), блок электропитания (БЭП), память программ (ПП).

ЦП представляет собой основной блок ПК, координирующий обработку информации. В нем находится микропроцессорная логика, сканирующая программу и состояние блоков оборудования.

УВВ состоит из модулей, применяющихся для сопряжения ПК с оперативными устройствами и механизмами. Модули УВВ действуют в качестве преобразователей сигналов так, чтобы напряжения высокого уровня были представлены на уровне, приемлемом для ПК. Источники сигналов ввода – датчики, кнопки, клавиатура и другие. Адреса вывода – пускатели электродвигателей, контакторы, насосы и т.д. Дополнительно могут применяться специализированные аналоговые модули ввода-вывода (САМВВ).

БЭП преобразует сетевое напряжение в отфильтрованное стабилизированное электропитание ПК, ПП сохраняет программы управления.

Обобщенная схема ПК приведена на рис. 3.

Особенностью является то, что память программируется пользователем. ПК программируют по цепной схеме, т.е. на языке, схожем с релейной логикой управления. При внесении изменений в программу к ПК подключают программирующее устройство и соответствующие изменения выполняют без перемонтажа.

В течение кванта времени, определяемого частотой устройства управления, производится контроль текущего значения давления. Если его величина вследствие колебания проницаемости изменяется более чем на 10%, необходимо скорректировать темп нагнетания.

Пусть P_t – текущее значение давления, тогда $q_t = q \frac{P_t}{P_c}$. Управляющее устройство

«отрабатывает» текущее значение темпа q_t с помощью исполнительного механизма.

Таким образом, разработана структура и алгоритм функционирования устройства управления процессом воздействия через одиночную скважину на участок пласта с ограничением на время обработки (УУВОСОВ).

Рассмотренный принцип распространяется на построение алгоритмов управления всеми технологическими схемами, используемыми для гидравлического воздействия. Характеристики устройства управления процессом определяются параметрами управляющего автомата: быстродействие автомата и аппаратные затраты, т.к. устройства устанавливаются на каждую нагнетательную установку.

Для обеспечения эффективности процесса гидравлического воздействия на анизотропные породные массивы необходимо разрабатывать специализированные устройства управления процессом, поддерживающие стабильные технологические параметры. Набор исходных данных, контролируемых, управляемых и управляющих параметров определяется характеристиками объекта и целями воздействия.

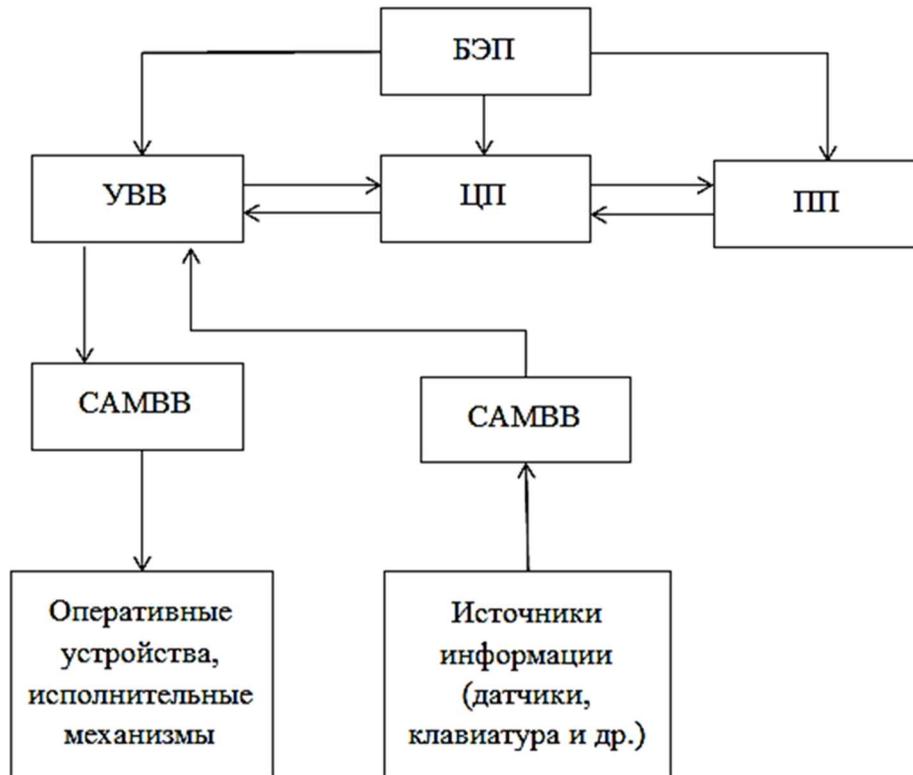


Рисунок 3 – Обобщенная схема программируемого контроллера (ПК)

Таким образом, направлением дальнейшего развития и совершенствования системы является разработка проекта, на основании которого осуществляются все последующие мероприятия, а также выбор и модификация элементной базы конструирования системы и её подсистем.

Выводы. В результате проведенных исследований сформированы детерминированные математические модели процессов пневматического и гидравлического воздействия на угольный пласт, в основу которых положены краевые задачи для уравнения нелинейно-упругой фильтрации жидкости в сплошной среде.

Обоснованы алгоритмы численного решения поставленных краевых задач и вычислительные методы оценки эффективности процесса и качества гидравлического воздействия на анизотропный угольный пласт.

Список литературы

1. Павлыш В. Н. Развитие теории и совершенствование технологии процессов воздействия на угольные пласты: Монография [Текст] / Павлыш В. Н. – Донецк: РВА ДонНТУ, 2005. – 347 с.
2. Павлыш В. Н. модели и алгоритмы управления процессами динамического воздействия на анизотропные подземные массивы [Текст] / В. Н. Павлыш, Л. А. Лазебная / Международный рецензируемый научно-теоретический журнал «Проблемы искусственного интеллекта». – 2019. – № 2(13). – Донецк : ГУ ИПИИ, 2019. – С. 13–21.

3. Павлыш В. Н. функционирования и технические элементы подсистемы автоматизированного управления процессом нагнетания жидкости в угольный пласт [Текст] / В. Н. Павлыш, И. В. Тарабаева, Л. А. Лазебная // Международный рецензируемый научно-теоретический журнал «Проблемы искусственного интеллекта». – 2017. – № 3(6). – Донецк, ГУ ИПИИ, 2017. – С. 32–39.
4. Павлыш В. Н. Основы теории и параметры технологии процессов гидропневматического воздействия на угольные пласты: монография [Текст] / Павлыш В. Н., Штерн Ю. М. – Донецк: «ВИК», 2007. – 400 с.
5. Теоретические основы процессов комплексного гидропневматического воздействия на угольные пласты: монография [Текст] / 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. Лазебная Л. А. Математическое моделирование процесса движения жидкости в угольном пласте с учетом подвижной границы фронта фильтрации [Текст] / Лазебная Л. А. // Международный рецензируемый научно-теоретический журнал «Проблемы искусственного интеллекта». – 2021. – № 3(22). – Донецк, ГУ ИПИИ, 2021. – С. 17–26.

References

1. Pavlysh V. N. *The development of theory and modification of technology of coal stratum treatment: monograph* [Razvitiye teorii i sovershenstvovaniye tekhnologii protsessov vozdeystviya na ugol'nyye plasty: Monografiya] Donetsk: RVA DonNTU, 2005. 347p.
2. Pavlysh V. N., Lazebnaya L. A. The mathematical models and control algorithms of dynamic action processes on anisotropy underground massifs [Modeli i algoritmy upravleniya protsessami dinamicheskogo vozdeystviya na anizotropnyye podzemnyye massivy] *International peer-reviewed scientific journal "Problems of artificial intelligence"* [Mezhdunarodnyy retsenziruyemyy nauchno-teoreticheskiy zhurnal «Problemy iskusstvennogo intellekta»]. Donetsk, PI «IPAI», 2019. p.13-21.
3. Pavlysh V. N., Tarabayeva I. V., Lazebnaya L. A. The functioning algorithms and technical elements of automatic control subsystem of liquid pumping process in coal seam [Funktsionirovaniya i tekhnicheskiye elementy podsystemy avtomatizirovannogo upravleniya protsessom nagnetaniya zhidkosti v ugol'nyy plast] *International peer-reviewed scientific journal "Problems of artificial intelligence"* [Mezhdunarodnyy retsenziruyemyy nauchno-teoreticheskiy zhurnal «Problemy iskusstvennogo intellekta»]. 2017 № 3(6). Donetsk, PI «IPAI», 2017. p.32-39.
4. Pavlysh V. N., Shtern J. M. *The base of theory and technological parameters of hydro-pneumatic treatment processes on coal stratum: monograph*. [Osnovy teorii i parametry tekhnologii protsessov gidropnevmaticheskogo vozdeystviya na ugol'nyye plasty: monografiya] Donetsk: «VIK», 2007. – 400p.
5. *The theoretical base of complex hydro-pneumatic treatment processes on coal stratum: monograph* [Teoreticheskiye osnovy protsessov kompleksnogo gidropnevmaticheskogo vozdeystviya na ugol'nyye plasty: monografiya] /Pavlysh V.N., Grebyonkin S.S., Bondarenko V.I., Agafonov A.V., Shtern J.M., Galchenko A.M. // Red. Pavlysh V.N. Donetsk: «VIK», 2006. 273p.
6. Lazebnaya L. A. Mathematical Modeling of Fluid Motion in the Coal Seams Taking into Account the Moving Boundary of the Filtration Front [Matematicheskoye modelirovaniye protsessa dvizheniya zhidkosti v ugol'nom plaste s uchedom podvizhnoy granitsy fronta fil'tratsii]. *International peer-reviewed scientific journal "Problems of artificial intelligence"* [Mezhdunarodnyy retsenziruyemyy nauchno-teoreticheskiy zhurnal «Problemy iskusstvennogo intellekta»]. 2021. № 3(22). Donetsk, PI «IPAI», 2021. p. 17-26.

RESUME

L. A. Lazebnaya

Mathematical Models and Computational Algorithms in the Control System of Aerohydrodynamic Processes in Anisotropic Medium

The process of controlling the complex pneumatic and hydraulic action on a coal seam is considered, which is considered as an anisotropic continuous medium. As part of the automated control system, a block of simulation modeling is provided, consisting of a complex of mathematical models and algorithms for their numerical implementation. The mathematical models are based on partial differential equations that describe the processes taking into account the fractured-porous structure of the reservoir.

The purpose of the work – development of a complex of mathematical models and algorithms for their numerical implementation in an automated process control system.

The task was set to develop the theoretical foundations and technology of complex hydropneumatic impact on coal seams, which includes three successive stages.

The most efficient and economical is the cyclic mode of pneumotreatment of the coal seam through long wells parallel to the line of the stope. Even wells are injection wells, odd wells are outflow wells.

It is recommended as the second stage of complex treatment, following the pneumatic treatment of a non-moistened formation.

Due to the complexity of the resulting system, it is not possible to solve it analytically. Therefore, the universal finite-difference method was chosen as the solution method. Since the first three equations of the system are non-linear, the solution of the corresponding difference equations at each time step can be obtained using iterations.

The system design includes a set of specialized electronic devices, the operation of which is coordinated by a programmable microcontroller, and a software package.

The operation of the device is based on the software principle of executing the injection process control algorithm implemented by the microcontroller. The device can be made either on the basis of general industrial (universal) controllers operating on the surface, or in an explosion-proof design for use in underground conditions. Currently, freely programmable controllers (PCs) have acquired a complete form of software and hardware devices - this is a microprocessor-based computer, which is distinguished by ease of programming and maintenance and is adapted for operation in various (including adverse) industrial conditions (vibration, heat, dustiness, etc.).

Solving the problem in a one-dimensional setting can serve to obtain information about the error of solutions, about changes in pressure over space for fixed values of time or over time at fixed points in space, however, to study the physics of the process, it is necessary to switch to a two-dimensional setting in order to investigate the change in pressure as a function of three coordinates $P(x, y, t)$.

As a result of the research, deterministic mathematical models of the processes of pneumatic and hydraulic impact on a coal seam were formed, which are based on boundary value problems for the equation of nonlinear elastic fluid filtration in a continuous medium.

Algorithms for the numerical solution of the formulated boundary value problems and computational methods for assessing the efficiency of the process and the quality of the hydraulic impact on an anisotropic coal seam are substantiated.

РЕЗЮМЕ

Л. А. Лазебная

Математические модели и вычислительные алгоритмы в системе управления аэрогидродинамическими процессами в анизотропной среде

Рассматривается процесс управления комплексным пневматическим и гидравлическим воздействием на угольный пласт, который рассматривается как анизотропная сплошная среда. В составе системы автоматизированного управления предусматривается блок имитационного моделирования, состоящий из комплекса математических моделей и алгоритмов их численной реализации. В основу математических моделей положены уравнения частных производных, описывающие процессы с учетом трещиновато-пористой структуры пласта.

Цель работы – развитие комплекса математических моделей и алгоритмов их численной реализации в системе автоматизированного управления процессом.

Поставлена задача развития теоретических основ и технологии комплексного гидропневматического воздействия на угольные пласты, включающего три последовательные стадии.

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

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

Ввиду сложности полученной системы решить её аналитически не представляется возможным. Поэтому в качестве метода решения выбран универсальный конечно-разностный метод. Поскольку первые три уравнения системы являются нелинейными, решение соответствующих разностных уравнений на каждом временном шаге может быть получено с использованием итераций

Проект системы включает набор специализированных электронных устройств, функционирование которых координируется с помощью программируемого микроконтроллера, и пакета программ.

В основу функционирования устройства положен программный принцип выполнения алгоритма управления процессом нагнетания, реализуемый микроконтроллером. Аппарат может быть выполнен либо на базе общепромышленных (универсальных) контроллеров, работающих на поверхности, либо во взрывобезопасном исполнении для использования в подземных условиях. В настоящее время свободно-программируемые контроллеры (ПК) приобрели законченную форму программно-технических устройств – это компьютер на микропроцессорной основе, отличающийся простотой программирования и технического обслуживания и приспособленный к эксплуатации в различных (в том числе и неблагоприятных) промышленных условиях (вибрация, нагрев, запыленность и т.д.).

Решение задачи в одномерной постановке может служить для получения информации о погрешности решений, об изменениях давления по пространству для фиксированных значений времени или во времени в фиксированных точках пространства, однако для исследования физики процесса необходимо переходить к двумерной постановке, чтобы исследовать изменение давления как функции трех координат: $P(x, y, t)$.

В результате проведенных исследований сформированы детерминированные математические модели процессов пневматического и гидравлического воздействия на угольный пласт, в основу которых положены краевые задачи для уравнения нелинейно-упругой фильтрации жидкости в сплошной среде.

Обоснованы алгоритмы численного решения поставленных краевых задач и вычислительные методы оценки эффективности процесса и качества гидравлического воздействия на анизотропный угольный пласт.

Статья поступила в редакцию 06.07.2022.