

вания миграции загрязнений подземных вод не учитывают современные изменившиеся условия залегания и протекания подземных вод. Следовательно, для создания эффективной модели необходимо первоначально установить принципиально новые закономерности гидродинамического, гидрохимического баланса вод, взаимодействия водоносных горизонтов с техногенными объектами, условия распространения подземных вод на территориях с нарушенным геологическим строением массива.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Екологічний атлас Дніпропетровської області / За заг.ред. А.Г.Шапаря. - Дніпропетровськ: Моноліт, 2009. – 64 с.
2. Орадовская, А.Е. Санитарная охрана водозаборов подземных вод / А.Е. Орадовская, Н.Н. Лапшин. — М.: Недра, 1987. — 167 с.
3. Шварцев, С.Л. Общая гидрогеология: Учебник для вузов / С.Л. Шварцев. – М.: Недра, 1996. – 423 с.
4. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні Міністерства охорони навколишнього природного середовища України
5. Рошаль, А.А. Методы определения миграционных параметров / А.А. Рошаль. - М. ВНИИ экон. минер. сырья и геол.-развед. работ, 1980. - 62 с.
6. Мироненко, В.А. Горнопромышленная гидрогеология / В.А. Мироненко, Е.В.Мольский, В.Г.Румынии. - М.: Недра, 1989. — 287 с.
7. Лукнер, Л. Моделирование миграции подземных вод / Л. Лукнер, В.М.Шестаков. - М.: Недра, 1986.- 208 с.
8. Иванов, В.А. Прикладное математическое моделирование качества вод шельфовых морских экосистем / В.А. Иванов, Ю.С.Тучковенко. – Севастополь: МГИ НАН Украины. – 2006.- 368 с.

**УДК 621.6.04:[622.74:621.928-752.001.572].001.361**

П.Е. Филимонов, к. т. н.  
(ПАО «Шахта им. А.Ф. Засядько»),  
В.Л. Морус, к. т. н.  
(ИГТМ им. Н.С. Полякова НАН Украины)

### **МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ МНОГОПРОЛЕТНЫХ ГИБКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ, ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ С СЫПУЧЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ НАГРУЗКОЙ**

Для математичних моделей гнучкої віброуючої поверхні й сипучого навантаження розроблений метод ідентифікації параметрів, заснований на мінімізації квадратичного нев'язання контрольованого показника об'єкта і його математичного опису.

### **METHOD OF IDENTIFICATION OF THE PARAMETERS OF MATHEMATICAL MODELS MULTISPAN FLEXIBLE SURFACES, INTERACTING WITH BULK TECHNOLOGICAL LOADING**

For the mathematical models of flexible vibrating surface and bulk load developed a method of parameter identification based on the minimization of the quadratic residual rate controlled object and its mathematical description.

Построение математической модели, адекватной объекту исследования сопряжено со значительными трудностями. Затруднения связаны, как правило, с выбором степени детализации расчетной схемы, а также в связи с определением значений отдельных параметров объекта. Для построения математической моде-

ли могут быть использованы как теоретические, так и экспериментальные методы. Но нельзя построить математическую модель только на основе теоретических исследований физических процессов в системе. Поэтому в процессе проектирования новых систем (объектов) проводятся эксперименты по определению и уточнению математической модели.

Методы определения математических моделей по результатам экспериментальных исследований являются предметом теории идентификации. В зависимости от объема априорной информации об объекте различают задачи идентификации в широком и узком смысле. В широком смысле априорная информация об объекте либо незначительная, либо вообще отсутствует, объект - черный ящик и для его идентификации необходимо решение ряда задач, связанных с выбором класса модели, оценкой стационарности, линейности и пр. В настоящее время теория идентификации в широком смысле еще не получила достаточного развития.

При решении задачи в узком смысле считается, что известны структура объекта и класс моделей, к которым он относится. Априорная информация об объекте достаточно обширна. Такая постановка задачи идентификации наиболее соответствует реальным условиям проектирования и широко используется в инженерной практике. Качество идентификации повышается с увеличением числа измерений. Таким образом, принято различать две задачи идентификации:

- 1) определение структуры объекта, т.е. структурная идентификация;
- 2) определение оценок параметров объекта с известной структурой, т.е. параметрическая идентификация.

В случае задачи параметрической идентификации вид уравнений, описывающих поведение объекта, известен, либо может быть определен на основе априорных данных о его структуре, и коэффициенты этих уравнений оцениваются с использованием экспериментальной информации о поведении объекта.

Важным этапом решения задачи идентификации является выбор критерия адекватности объекта и математической модели. В литературе встречается несколько разновидностей критериев, но наибольшее распространение получили следующие:

- 1) минимум среднеквадратического значения рассогласования функций объекта и модели;
- 2) критерий максимального правдоподобия;
- 3) критерии минимального риска.

Минимизацию целевых функций, соответствующих выбранному критерию, осуществляют, как правило, методами направленного или случайного поиска.

Ниже описана в общем виде постановка задачи идентификации параметров математических моделей механических систем типа "вибрационная машина - нагрузка". Считается, что объем существующей информации о системе достаточно велик и можно предположить, что структура механической системы определена. Последнее означает, что известно аналитическое описание системы с точностью до конечного числа неизвестных параметров  $C_1, \dots, C_m$ , для которых задана или может быть определена область их существования.

Контролируемый показатель (или критерий качества) механической системы функционально зависит, в том числе, и от вектора этих параметров  $C = \{C_1, \dots, C_m\}$ . Характер зависимости  $Q_m(X, C)$  определяется математической моделью системы. Исходными данными для задачи идентификации служат экспериментальные значения контролируемого показателя (функции качества) системы  $Q(X, C)$ , в несовпадающих состояниях системы  $X_1, \dots, X_N$ .

Задача идентификации формулируется следующим образом. При заданном числе  $N$  и имеющихся экспериментальных сведениях получить модельное описание  $Q_m(X, C)$  минимальным образом отличающееся от действительного  $Q(X, C)$  в смысле квадратичной невязки в наблюдаемых точках. Функция квадратичной невязки системы и ее модели

$$q(C) = \sum_{l=1}^N [Q_l - Q_m(X_l, C)]^2,$$

где  $N > m$ . Очевидно, что для определения неизвестного вектора  $C$  достаточно минимизировать функцию невязки  $q(C)$ .

Это требование формально приводит к системе  $N$  уравнений, представляющих собой в левой части частные производные по компонентам вектора  $C$ . Но поскольку далеко не всегда оказывается возможным прямое вычисление производных контролируемого показателя (критерия качества) системы  $Q_m$ , следует воспользоваться методами поисковой минимизации применительно к функции невязки  $q(C)$  т.е. решить задачу оптимизации

$$q(C) \rightarrow \min(C).$$

Полученные в результате таких манипуляций значения параметров  $C_1, \dots, C_m$  считаются решением задачи идентификации по данным экспериментальных измерений.

Далее идентификация математических моделей рассматривается как задача оптимизации с ограничениями в области определяемых параметров и решается методами поиска экстремума. Отыскивается вектор  $C = (C_1, \dots, C_m)$ , доставляющий глобальный минимум целевой функции

$$q(C) = \sum_{l=1}^N [Q_l - Q_m(X_l, C)]^2, \quad (1)$$

представляющей собой сумму квадратичных отклонений значений контролируемого показателя системы от математической модели.

Ограничения, накладываемые на параметры  $C = (C_1, \dots, C_m)$ , имеют вид неравенств типа

$$q_{ll}(C) \geq 0; (l = 1, \dots, p)$$

и определяют область  $S$  допустимых значений параметров  $C \in S$ . Функция цели в допустимой области значений параметров  $S$  должна обладать свойством экстремальности, т.е. иметь минимум хотя бы в одной допустимой точке  $C$ .

Но, как правило, на практике целевые функции типа (1) могут иметь не один экстремум. Поэтому следует различать локальный и глобальный экстремумы. Глобальный минимум определяется как наименьший из  $K$  локальных

$$Q(C_{zл}) = \min_{k=1, \dots, K} q(\tilde{C}_k).$$

Как видно, в этом случае задача о глобальном минимуме сводится к отысканию всех локальных минимумов с последующим их перебором, однако, подобный метод отыскания глобального экстремума крайне невыгоден, т.к. требует слишком большого числа измерений показателя качества системы. Нужны более эффективные алгоритмы, настроенные на глобальный экстремум.

В литературе известно много алгоритмов глобального поиска. Наибольшее же распространение получили алгоритмы, основанные на методах сканирования и случайного поиска. Случайный поиск является наиболее эффективным методом отыскания глобального экстремума в обстановке, когда о характере поведения функции цели почти ничего неизвестно. Именно такой информационный "голод" характерен для реальных многоэкстремальных объектов. Поэтому случайный поиск и претендует на роль универсального средства решения многоэкстремальных задач.

Смысл случайного поиска заключается во введении элемента случайности в процесс определения точки  $C$ , где вычисляется функция цели  $q(C)$ . Существует несколько разновидностей случайного поиска глобального экстремума. Нами же при построении алгоритма идентификации параметров математических моделей использован детерминированный аналог метода Монте-Карло ЛП поиск [1]. Последний является методом дискретного обзора пространства исследуемых параметров произвольной размерности.

Метод основан на использовании точек ЛП - последовательности [2]  $R_1, R_2, \dots, R_i$  равномерно заполняющих  $m$ -мерный единичный параллелепипед с наилучшими характеристиками равномерности среди известных в настоящее время равномерно распределенных последовательностей. Такие преимущества, как независимость ЛП - поиска от свойств экстремизируемой функции, относительная простота алгоритма генерации точек последовательности предопределили сделанный в настоящей работе выбор метода поиска экстремума.

Идея этого численного метода проста и состоит в следующем:  $m$ -мерное пространство исследуемых параметров зондируется набором квазислучайных точек  $\{C_i\}, i \in [1, \dots, N]$ , каждая из которых представляет собой вектор  $C(C_1, \dots, C_m)$ , компонентами которого являются  $m$  варьируемых параметров. В каждой точке про-

странства  $C_i$  вычисляется соответствующее значение функции цели  $q_i(C_i)$ . Точка  $C_0$ , доставляющая экстремум функции цели, определяется в результате перебора точек множества  $\{q_i\}$  по принципу

$$q(C_0) = \min_{i \in [1, \dots, N]} q_i(C_i).$$

В используемом методе должна быть известна область изменения варьируемых параметров, которая задается  $m$  числом неравенств

$$C_j^* \leq C_j \leq C_j^{**}; j \in [1, \dots, m],$$

определяющих некоторый гиперпараллелепипед  $G$ , в котором в дальнейшем и осуществляется поиск точки глобального экстремума функции цели  $q(C)$ .

Расчет пробных точек  $\{C_i\}, i \in [1, \dots, N]$  в гиперпараллелепипеде  $G$  осуществляется в методе ЛП-поиска на основе Декартовых координат точек  $R_i = (r_{i,1}, \dots, r_{i,j}, \dots, r_{i,m})$

$$C_{i,j} = C_j^* + r_{i,j}(C_j^{**} - C_j^*), j \in [1, \dots, m].$$

Координаты же точек  $R_i$  ЛП-последовательности рассчитываются в зависимости от двоичного представления номера пробной точки  $i = e_k e_{k-1} \dots e_2 e_1$  с использованием направляющих чисел  $V_j = (v_{j,1}, \dots, v_{j,k})$  по формулам [3].

$$r_{i,j} = e_1 v_{j,1} \times e_2 v_{j,2} \times \dots \times e_k v_{j,k}, j \in [1, \dots, m] r_{i,j},$$

где  $v_{j,k} = S_{j,k} 2^{-k}$  в [3] приведена таблица  $S_{j,k}$  для случая  $j \leq 51$ , в которой выбор нужного значения осуществляется в соответствии с номерами  $j$  строки и  $k$  столбца; символ \* означает поразрядное сложение по модулю 2 в двоичной системе.

Число точек испытаний (пробных точек)  $N$  назначается равным некоторой степени числа 2, т.е.  $N = 2^p$  и в общем случае зависит от характера экстремизируемой функции и требуемой точности решения.

Описанный выше алгоритм идентификации с использованием ЛП-поиска реализован в виде компьютерной программы.

Выполненный на математических моделях развернутый численный эксперимент, а также результаты лабораторного эксперимента позволили сформулировать основные положения по расчету конструктивных параметров рабочих элементов гибких многопролетных поверхностей грохочения.

Конечная цель расчета рабочих элементов (РЭ) просеивающих поверхностей видится в обеспечении допустимого уровня колебаний последних, который определяется как несущей способностью их конструкции, так и влиянием колебаний на технологический процесс грохочения. С названных позиций ниже формули-

руются критерии оценки эксплуатационной пригодности РЭ.

Множественность эксплуатационных требований и сложность действительной работы конструкций РЭ обуславливает значительное число критериев и необходимость их классификации. С этой целью вводится понятие расчетного предельного состояния, при котором рассчитываемая конструкция РЭ либо теряет вообще способность сопротивляться внешним воздействиям, либо перестает удовлетворять предъявляемым к ней эксплуатационным требованиям.

Для гибких поверхностей грохочения устанавливаются два вида предельных состояний:

- первое предельное состояние по несущей способности, означающей непригодность конструкции к эксплуатации по прочности, усталости материала;
- второе предельное состояние, означающее непригодность конструкции поверхности к нормальной эксплуатации по деформациям и перемещениям.

Критерии первого предельного состояния в общем виде сводятся к проверке условия

$$N \leq \Phi(S, k, R)$$

и состоят в требовании, чтобы максимально возможное (с учетом перегрузки) усилие любого типа  $N$  в элементе конструкции было не больше его минимальной несущей способности  $\Phi$ , определяемой геометрическими характеристиками сечения  $S$ , физико-механическими характеристиками материала конструкции  $R$  с учетом их изменчивости в процессе эксплуатации с помощью коэффициентов  $K$ .

Расчет по второму предельному состоянию в общем виде характеризуется следующей формулой

$$\Delta \leq f,$$

где  $\Delta$  - перемещение или деформация, являющиеся функцией геометрической формы конструкции и механических свойств материала;  $f$  - предельно допустимая величина перемещения или деформации.

Таким образом, исходная идея метода расчетных предельных состояний заключается в получении надлежащих гарантий, что за время эксплуатации поверхности грохочения не наступит ни одно из предельных состояний. Наступление же того или иного расчетного предельного состояния зависит от многих факторов, важнейшими из которых являются: технологическая нагрузка, качество и механические свойства материала конструкции поверхности грохочения, общие условия ее работы, условия изготовления и т.п. Все перечисленные факторы должны быть введены в расчет с учетом изменчивости их параметров.

Далее приводятся критериальные соотношения, вобравшие в себя все наложенные выше положения. Критерии первого предельного состояния сводятся к следующим проверкам.

1. Проверка элементов конструкции на выносливость

$$\sigma_c + \sigma_0 \leq \sigma^{бвн},$$

где  $\sigma_c, \sigma_0$  - статическое и динамическое напряжение, определяемые соответствующими расчетами элементов конструкции; расчетный предел выносливости материала конструкции.

2. Проверка статической несущей способности по нормальным напряжениям РЭ в экстремальных условиях загрузки поверхности

$$\sigma_{max} \leq R_\sigma,$$

где  $\sigma_{max}$  - максимальные нормальные напряжения в наиболее нагруженных сечениях элементов поверхности;  $R_\sigma$  - расчетное сопротивление материала РЭ изгибу.

3. Проверка статической несущей способности по касательным напряжениям РЭ в экстремальных условиях загрузки поверхности

$$\tau_{max} \leq R_\tau,$$

где  $\tau_{max}$  - максимальные касательные напряжения в наиболее нагруженных сечениях элементов поверхности;  $R_\tau$  - расчетное сопротивление материала РЭ сдвигу.

Расчетное сопротивление материала РЭ должны вычисляться по значениям статических напряжений из диаграмм для резины, соответствующим остаточному относительному удлинению 0,2 %  $\sigma_{0,2}$  и  $\tau_{0,2}$  умножением последних на так называемые коэффициенты безопасности по материалу  $K_\sigma$  и  $K_\tau$

$$R_\sigma = K_\sigma \sigma_{0,2};$$

$$R_\tau = K_\tau \tau_{0,2}.$$

Критерии второго предельного состояния и соответствующие им условия проверок формулируются следующим образом. Для эффективного использования упругих колебаний РЭ гибкой поверхности необходимо соблюдение определенного соотношения частот

$$\omega < \omega_c,$$

где  $\omega_c$  - наименьшая собственная частота рассчитываемого элемента, вычисленная с учетом присоединенной массы нагрузки;  $\omega$  - частота колебаний жесткого каркаса поверхности.

Проверка, исключая наступление, ударного резонанса для РЭ в условиях режима вибрации поверхности с подбрасыванием нагрузки

$$\omega < \frac{1}{2} \omega_{c1},$$

где  $\omega_{c1}$  - наименьшее значение частоты возможного резонанса.

Перечисленные условия второго предельного состояния должны быть дополнены соответствующими условиями, регламентирующими жесткость сечения РЭ на кручение, изгиб и т.п.

Результаты исследований сводятся к следующему.

1. Для математических моделей гибкой вибрирующей поверхности и сыпучей нагрузки разработан метод идентификации параметров, основанный на минимизации квадратичной невязки контролируемого показателя объекта и его математического описания.

2. Для решения задачи минимизации выбранного критерия адекватности модели и объекта использован ЛП-поиск, детерминированный аналог метода Монте-Карло.

3. Разработан численный алгоритм для ЭВМ идентификации параметров математических моделей.

4. Результаты дальнейших исследований будут использованы для идентификации параметров разработанных математических моделей колебаний многопролетной гибкой поверхности взаимодействующей с сыпучей технологической нагрузкой и проведении исследований технологических параметров процесса тонкослоевого грохочения при вращательном движении цилиндрической просеивающей поверхности и обосновании рациональных технологических и конструктивных параметров грохотов барабанного типа [4, 5].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соболев, И.И. ЛП-поиск и задачи оптимального конструирования. В кн.: Проблемы случайного поиска / И.И.Соболев, Р.В.Статников. – Рига: Зинатне, 1972, № 1. - 92 с.
2. Соболев, И.М. Многомерные квадратурные формулы и функции Хаара / И.М. Соболев. - М.: Наука, 1969. - 120 с.
3. Соболев, И.И. Получение точек, равномерно расположенных в многомерном кубе / И.И.Соболев, Ю.Л. Левитан - Препринт Ин-та прикладной математики АН СССР, 1976, № 40. – 30 с.
4. Червоненко, А.Г. Износостойкие динамически активные просеивающие поверхности из эластомеров для разделения сыпучих материалов и пульп / А.Г.Червоненко, В.Л. Морус // Труды II Международного симпозиума по механике эластомеров, июнь, 1997, г. Днепропетровск, 1997, Т1. - С. 296-309.
5. Морус, В.Л. Новые износостойкие резиновые рабочие поверхности для грохотов барабанного типа, закономерности перемещения материала внутри цилиндров с многозаходной транспортирующей спиралью / В.Л.Морус, А.В.Никутов // Геотехническая механика: Межвед.сб.научн.тр. – Днепропетровск, 1998, Вып. 7. - С. 125-132.

## **МЕТОД ЛАБОРАТОРНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ УСТРОЙСТВА ГИДРОИМПУЛЬСНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ**

Дана стаття описує лабораторний метод, що визначає: мету, умови, обсяг і порядок проведення досліджень параметрів пристрою гідроімпульсної дії.

## **THE LABORATORY METHOD FOR MEASURING OF THE HYDROIMPULSIVE EQUIPMENT**

This article describes the laboratory method that defines: the purpose, conditions, effort and procedure of the researching the device settings of hydroimpulsive impact.

Применение высоконапорных режимов нагнетания жидкости в угольные пласты с целью создания безопасных условий ведения горных работ по пылевому и газовому факторам многократно проверено и подтверждено практикой ведения горных работ. Вместе с тем ухудшение горно-геологических условий на больших глубинах привели к значительному снижению эффективности высоконапорного нагнетания жидкости с целью предотвращения газодинамических явлений и пылеобразования. В первую очередь это связано с изменением свойств угольного пласта и отсутствием технических средств, которые позволяют в этих условиях реализовать эффективное гидрорыхление и увлажнение угля по всей мощности пласта при статическом нагнетании жидкости. Кроме этого, в условиях больших глубин при гидрорыхлении выбросоопасных пластов возрастает вероятность проявления гидроразрыва и гидротжима краевой части с последующим провоцированием внезапных выбросов.

Уменьшить негативное влияние вышеотмеченных факторов и повысить эффективность нагнетания жидкости через шпуры или скважины, пробуренные из горных выработок, представляется возможным при переходе от статического нагнетания к импульсному в режиме кавитации, так называемому гидроимпульсному воздействию.

Отличительной особенностью технологии гидроимпульсного воздействия является использование малорасходных высокочастотных генераторов упругих колебаний в потоке нагнетаемой жидкости (далее генератор упругих колебаний – ГК-2,5). При этом ГК-2,5 обеспечивает стабильность режима кавитации в необходимом диапазоне давления подачи жидкости в угольный массив. Взаимосвязь характеристик насосных установок и ГК-2,5 позволяет эффективно реализовывать процессы интенсификации трещинообразования, заполнения трещин жидкостью и изменения физико-механических свойств угольного пласта.

Генераторы кавитаций ГК-2,5 используются в составе устройств гидроимпульсного воздействия.

Устройства гидроимпульсного воздействия (УГИВ) применяются с целью повысить эффективность технологии гидрорыхления выбросоопасных уголь-