

**Р.К. Халкечев**

## **ЭКСПЕРТНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РАЗРУШЕНИЯ ГЕОМАТЕРИАЛОВ РАЗЛИЧНЫХ ПОРЯДКОВ СЛОЖНОСТИ**

Разработана архитектура экспертной системы, которая в зависимости от условий задачи подбирает критерий разрушения, позволяющий построить адекватную математическую модель, удовлетворяющую требованию достаточной простоты. Данная система является представителем нового поколения экспертных систем, отличающихся от существующих тем, что база знаний наряду с эвристиками, содержит математические модели, направляющие ход решения поставленной задачи.

**Ключевые слова:** экспертная система, научное исследование, база знаний, математическая модель, геоматериал.

---

**О**дним из важнейших этапов научных исследований физических процессов горного производства является разработка математических моделей разрушения геоматериалов различных порядков сложности.

На данный момент не существует единой теории, математическое моделирование в рамках которой, позволяет для любых задач горного производства разрабатывать адекватные математические модели геоматериалов относительно процесса разрушения, удовлетворяющие требованию достаточной простоты. При этом согласно [1], математическая модель соответствует данному требованию, если современные средства исследования дают возможность провести экономно по затратам труда и средств, но с разумной точностью, качественный и (или) количественный анализ исследуемых свойств и осмыслить результат.

Отсутствие единой теории разрушения обусловлено сложной природой изучаемого явления и связанного с этим отсутствия полного физического понимания его сущности. По этой причине при использовании той или иной теории разрушения для построения математических моделей, описывающих процессы разрушения геоматериалов различных порядков сложности, приходиться учитывать лишь основные решающие факторы, которые в рамках рассматриваемой задачи играют определяющую роль в процессе разрушения. В противном случае поставленная задача окажется либо чрезмерно сложной, либо не разрешимой.

Такое состояние дел привело к разработке в рамках существующих теорий большого количества критериев разрушения, зарекомендовавших себя при решении различных научно-практических задач.

При этом возникает естественный вопрос – какую теорию, а следовательно, и какой критерий разрушения, использовать для построения адекватной математической модели геоматериала при решении той или иной задачи горного производства. К сожалению, наиболее полный и точный ответ на этот вопрос может дать только натурный эксперимент. Именно, сопоставляя те ответы, которые дает на тот или иной вопрос математическая модель, с результатами эксперимента, можно судить, допустимо ли использование той или иной теории и критерия разрушения для решения поставленной задачи.

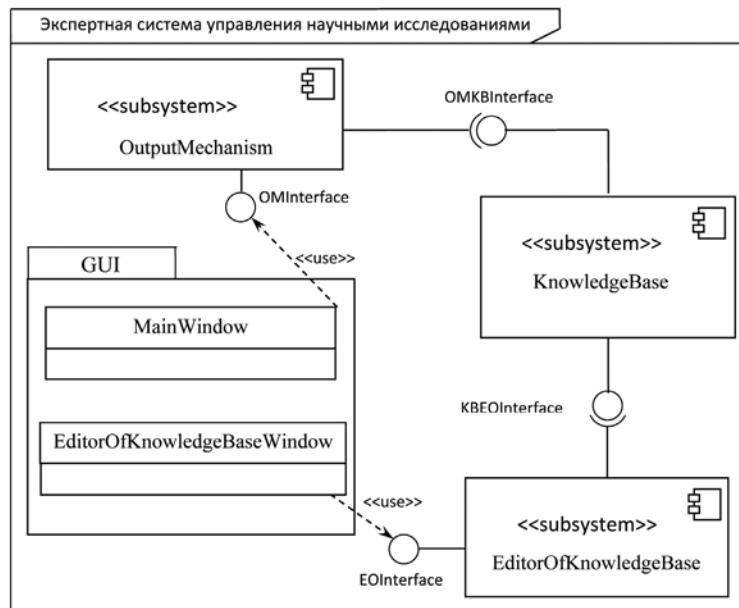
Несмотря на это, современными исследователями наработан большой объем знаний относительно границ применимости и эффективности теорий и критериев разрушения при решении различных задач горного производства. Однако эти знания до сих пор по большей части являются неформализованными, неявными и недоступными.

В сложившейся ситуации приобретает актуальность разработки экспертной системы, позволяющей в зависимости от условий решаемой задачи выбирать такую теорию и критерии разрушения, что при их использовании существенно снижается риск получения неадекватной математической модели геоматериала.

Разрабатываем архитектуру рассматриваемой экспертной системы. Согласно [2, 3], любая экспертная система должна включать в свою архитектуру три подсистемы: база знаний, механизм вывода, редактор базы знаний.

База знаний экспертной системы содержит правила (или другие представления знаний), использующая их как основу для принятия решений. Механизм вывода содержит общие знания о схеме управления решением задач. Данный механизм содержит две составляющие: интерпретатор и диспетчер. Первая из них определяет, каким образом применять правила для вывода новых знаний, а вторая – устанавливает порядок применения этих правил. Редактор базы знаний предназначен для модификации правил экспертной системы, а также для ввода новых знаний в экспертную систему.

Как известно в современных экспертных системах правила, входящие в базу данных являются эвристиками, т.е. эмпирическими правилами, упрощающими или ограничивающими поиск решения в предметной области. Существующие экспертные системы используют эвристики, потому что задачи, которые они решают, не поддаются строгому математическому анализу или алгоритмическому решению. В свою же очередь, алгоритмический метод гарантирует корректное или оптимальное решение задачи, тогда как эвристический метод дает приемлемое решение в большинстве случаев.



Воспользуемся гибридным методом решения задачи, при котором правила базы знаний экспертной системы наряду с эвристиками будут содержать математические модели. Очевидно, что такой подход за счет повышения степени формализации исследуемой задачи будет более эффективным, по сравнению с классическим эвристическим подходом, используемым при построении существующих экспертных систем.

В результате, используя объектно-ориентированный подход к проектированию и язык UML (Unified Modeling Language – унифицированный язык моделирования), получим следующую архитектуру рассматриваемой экспертной системы (рисунок).

На рисунке представлено три подсистемы и один пакет. Подсистемы «KnowledgeBase», «OutputMechanism», «EditorOfKnowledgeBase» представляют собой соответственно базу знаний, механизм вывода и редактор базы знаний. При этом подсистема «KnowledgeBase» играет роль сервера по отношению к двум оставшимся. Графические окна «MainWindow» и «EditorOfKnowledgeBaseWindow» составляют пакет «GUI» – графического интерфейса пользователя и посредством интерфейсов «OMInterface» и «EOInterface» обеспечивают взаимодействие подсистем с пользователем экспертной системы.

Среди представленных подсистем особого внимания заслуживает подсистема «KnowledgeBase». Рассмотрим ее более подробно.

Данная подсистема содержит эвристические правила и математические модели, позволяющие осуществить выбор теории и критерия разрушения, при использовании которых существенно увеличивается вероятность разработки математической модели геоматериала, удовлетворяющей требованиям достаточной простоты.

Все существующие критерии разрушения, применяемые в научных исследованиях горного производства, можно сгруппировать по следующим теориям, в рамках которых они применимы: классическая теория прочности; феноменологическая теория длительной прочности; теория трещин; статистическая теория прочности.

Проводя анализ работы [4], получим следующие эвристики на верхнем уровне:

1) ЕСЛИ для геоматериала существует элементарный объем и процессы разрушения протекают в объемах превышающих элементарный объем геоматериала, процесс разрушения зависит только от средних напряжений и деформаций, ТО использовать классическую теорию прочности.

2) ЕСЛИ для геоматериала существует элементарный объем, процесс разрушения протекает в объемах превышающих элементарный объем геоматериала, процесс разрушения зависит от средних напряжений и деформаций, являющихся функциями от времени и других термодинамических параметров, ТО использовать феноменологическую теорию длительной прочности.

3) ЕСЛИ размеры трещин превышают элементарный объем геоматериала, ТО использовать теорию трещин.

4) ЕСЛИ проявляется масштабный эффект и прочностные свойства структурных элементов геоматериала являются случайной величиной, ТО использовать статистическую теорию прочности.

Математические модели, входящие в базу знаний весьма разнообразны. Однако вне зависимости от используемой теории и критерия разрушения механизм вывода экспертной системы с целью нахождения решения какой-либо за-

дачи горного производства должен определять элементарный объем геоматериала на основе математической модели [5], а также деформационные свойства согласно следующим математическим моделям [6]:

1) Мультифрактальная математическая модель минерала относительно деформационных свойств:

$$\overset{(efmp)}{C} = \langle \overset{(mp)}{C} \left( I + \overset{(mp)}{B} \cdot \overset{(1mp)}{C} \right)^{-1} \rangle \cdot \langle \overset{(mp)}{C} \left( I + \overset{(mp)}{B} \cdot \overset{(1mp)}{C} \right)^{-1} \rangle^{-1},$$

где  $\overset{(efmp)}{C}$  – эффективный тензор модулей упругости минерала;  $\overset{(mp)}{C}$  – тензор модулей упругости зерна;  $I$  – единичный четырехвалентный тензор;

$$\overset{(mp)}{B} = \frac{1}{4\pi} \int_{S_1}^{(0mp)} K(Ak) dS;$$

$A$  – тензор, определяющий невырожденное аффинное преобразование трехмерного пространства;

$\overset{(0mp)}{K}(k)$  – преобразование Фурье ядра  $\overset{(0mp)}{K}_{ijkl}(x - x') = -[\partial_i \partial_l \overset{(0mp)}{G}_{jk}(x - x')]_{(ij)(kl)}$ ;

$S_1$  – поверхность единичной сферы в Фурье-пространстве;  $\overset{(0mp)}{G}$  – тензорная функция Грина сплошной среды с упругими свойствами  $\langle \overset{(mp)}{C} \rangle$ ;  $\overset{(mp)}{C} = \overset{(mp)}{C} - \langle \overset{(mp)}{C} \rangle$ .

2) Мультифрактальная математическая модель минерала с наполненными газом (или жидкостью) порами относительно деформационных свойств:

$$\begin{aligned} \overset{(efmv)}{C} &= \overset{(efmp)}{C} + \left\langle \frac{\overset{(ELmv)}{V}}{\overset{(BVmv)}{V}} \overset{(1mv)}{C} \cdot \left( I + \overset{(mv)}{H} \cdot \overset{(1mv)}{C} \right)^{-1} \right\rangle \times \\ &\times \left\langle I - \overset{(0mv)}{H} \cdot \left\langle \frac{\overset{(ELmv)}{V}}{\overset{(BVmv)}{V}} \overset{(1mv)}{C} \cdot \left( I + \overset{(mv)}{H} \cdot \overset{(1mv)}{C} \right)^{-1} \right\rangle \right\rangle^{-1}, \end{aligned}$$

где  $\overset{(efmv)}{C}$  – эффективный тензор модулей упругости минерала с наполненными газом (или жидкостью) порами;  $\overset{(efmp)}{C}$  – эффективный тензор модулей упругости минерала;  $\overset{(ELmv)}{V}$  и  $\overset{(BVmv)}{V}$  – соответственно объем эллипсоида и объем блока Вороного в сплошной среде со структурой, соответствующей минералу с наполненными газом (или жидкостью) порами;  $\overset{(1mv)}{C} = p_0 I - \overset{(efmp)}{C}$ ;  $p_0$  – первоначальное давление в поре;

$$\overset{(mv)}{H} = \frac{1}{4\pi} \int_{S_1}^{(mv)} K(Ak) dS, \text{ при } A = 1;$$

$\overset{(mv)}{K}(k)$  – преобразование Фурье ядра  $\overset{(mv)}{K}_{ijkl}(x - x') = -[\nabla_k \nabla_l \overset{(mp)}{G}_{ij}(x - x')]_{(ik)(jl)}$ ;  $\overset{(mp)}{G}$  – тензорная функция Грина сплошной среды с упругими свойствами  $\overset{(efmp)}{C}$ ;

$$\overset{(0mv)}{H} = \frac{1}{4\pi} \int_{S_1}^{(0mv)} K(Ak) dS.$$

3) Мультифрактальная математическая модель минерала с газонаполненными (или наполненными жидкостью) включениями относительно деформационных свойств:

$$\begin{aligned} C^{(efmt)} &= C^{(efmv)} + \left\langle \frac{V^{(ELmt)}}{V^{(BVmt)}} C^{(1mt)} \cdot \left( I + Z^{(mt)} \cdot C^{(1mt)} \right)^{-1} \right\rangle \times \\ &\times \left\langle I - Z^{(0mt)} \cdot \left\langle \frac{V^{(ELmt)}}{V^{(BVmt)}} C^{(1mt)} \cdot \left( I + Z^{(mt)} \cdot C^{(1mt)} \right)^{-1} \right\rangle \right\rangle^{-1}, \end{aligned}$$

где  $C^{(efmt)}$  – эффективный тензор модулей упругости минерала с газонаполненными (или наполненными жидкостью) включениями;  $C^{(efmv)}$  – эффективный тензор модулей упругости минерала с наполненными газом (или жидкостью) порами;  $V^{(ELmt)}$  и  $V^{(BVmt)}$  – соответственно объем эллипсоида и объем блока Вороного в сплошной среде со структурой, соответствующей минералу с газонаполненными (или наполненными жидкостью) включениями;  $C^{(1mt)} = p_0 I - C^{(efmv)}$ ;  $p_0$  – первоначальное давление во включении;

$$Z^{(mt)} = \frac{1}{4\pi} \int_{S_1}^{(mt)} K(Ak) dS, \text{ при } A = 1;$$

$K(k)$  – преобразование Фурье-ядра  $K_{ijkl}^{(mt)}(x - x') = -[\partial_i \partial_l G_{jk}^{(mv)}(x - x')]_{(ij)(kl)}$ ;

$G^{(mv)}$  – тензорная функция Грина сплошной среды с упругими свойствами  $C^{(efmv)}$ ;

$$Z^{(0mt)} = \frac{1}{4\pi} \int_{S_1}^{(mt)} K(Ak) dS.$$

4) Мультифрактальная математическая модель горной породы, состоящей из двух типов минералов с газонаполненными (или наполненными жидкостью) включениями:

$$\begin{aligned} C^{(efdmch)} &= C^{(efomch)} + \left\langle \frac{V^{(ELdmch)}}{V^{(BVdmch)}} C^{(1dmch)} \cdot \left( I + Z^{(dmch)} \cdot C^{(1dmch)} \right)^{-1} \right\rangle \times \\ &\times \left\langle I - Z^{(0dmch)} \cdot \left\langle \frac{V^{(ELdmch)}}{V^{(BVdmch)}} C^{(1dmch)} \cdot \left( I + Z^{(dmch)} \cdot C^{(1dmch)} \right)^{-1} \right\rangle \right\rangle^{-1}, \end{aligned}$$

где  $C^{(efdmch)}$  – эффективный тензор модулей упругости горной породы, состоящей из двух типов минералов с газонаполненными (или наполненными жидкостью) включениями;

$$C^{(efomch)} = \left\langle C^{(efmt)} \left( I + B^{(omch)} \cdot C^{(1omch)} \right)^{-1} \right\rangle \cdot \left\langle \left( I + B^{(omch)} \cdot C^{(1omch)} \right)^{-1} \right\rangle^{-1};$$

$$\overset{(1omch)}{C} = \overset{(efmt)}{C} - \langle \overset{(efmt)}{C} \rangle; \quad \overset{(omch)}{B} = \frac{1}{4\pi} \int_{S_1}^{(omch)} K(Ak) dS;$$

$K(k)$  – преобразование Фурье-ядра  $\overset{(omch)}{K}_{ijkl}(x - x') = -[\partial_i \partial_l G_{jk}(x - x')]_{(ij)(kl)}$ ;

$\overset{(mt)}{G}$  – тензорная функция Грина сплошной среды с упругими свойствами  $\overset{(efmt)}{C}$ ;

$$\overset{(1dmch)}{C} = \overset{(efmt)}{C} - \overset{(efomch)}{C};$$

$$\overset{(dmch)}{Z} = \overset{(0dmch)}{Z} = \frac{1}{4\pi} \int_{S_1}^{(dmch)} K(Ak) dS, \text{ при } A = 1;$$

$K(k)$  – преобразование Фурье-ядра  $\overset{(dmch)}{K}_{ijkl}(x - x') = -[\partial_i \partial_l G_{jk}(x - x')]_{(ij)(kl)}$ ;

$\overset{(omch)}{G}$  – тензорная функция Грина сплошной среды с упругими свойствами  $\overset{(efomch)}{C}$ ;  $\overset{(Eldmch)}{V}$  и  $\overset{(BVdmch)}{V}$  – соответственно объем эллипсоида и объем блока

Вороного в сплошной среде со структурой, соответствующей горной породе, состоящей из двух типов минералов с газонаполненными (или наполненными жидкостью) включениями.

5) Мультифрактальная математическая модель породного массива, состоящего из двух типов горных пород:

$$\begin{aligned} \overset{(efdmpy)}{C} &= \overset{(efompy)}{C} + \left\langle \frac{\overset{(Eldmpy)}{V}}{\overset{(BVdmpy)}{V}} \overset{(1dmpy)}{C} \cdot \left( I + \overset{(dmpy)}{Z} \cdot \overset{(1dmpy)}{C} \right)^{-1} \right\rangle \times \\ &\times \left\langle I - \overset{(0dmpy)}{Z} \cdot \left\langle \frac{\overset{(Eldmpy)}{V}}{\overset{(BVdmpy)}{V}} \overset{(1dmpy)}{C} \cdot \left( I + \overset{(dmpy)}{Z} \cdot \overset{(1dmpy)}{C} \right)^{-1} \right\rangle \right\rangle^{-1}, \end{aligned}$$

где  $\overset{(efdmpy)}{C}$  – эффективный тензор модулей упругости породного массива, состоящего из двух типов горных пород,

$$\overset{(efompy)}{C} = \langle \overset{(efmsv)}{C} \left( I + \overset{(ompy)}{B} \cdot \overset{(1ompy)}{C} \right)^{-1} \rangle \cdot \langle \overset{(ompy)}{B} \cdot \overset{(1ompy)}{C} \rangle^{-1};$$

$$\overset{(1ompy)}{C} = \overset{(efdmch)}{C} - \langle \overset{(efdmch)}{C} \rangle; \quad \overset{(ompy)}{B} = \frac{1}{4\pi} \int_{S_1}^{(ompy)} K(Ak) dS;$$

$K(k)$  – преобразование Фурье-ядра  $\overset{(ompy)}{K}_{ijkl}(x - x') = -[\partial_i \partial_l G_{jk}(x - x')]_{(ij)(kl)}$ ;

$\overset{(dmch)}{G}$  – тензорная функция Грина сплошной среды с упругими свойствами  $\overset{(efdmch)}{C}$ ;  $\overset{(1dmpy)}{C}$  и  $\overset{(0dmpy)}{C}$  – тензорные функции Грина сплошной среды с упругими свойствами  $\overset{(efompy)}{C}$ ;

$$\overset{(dmpy)}{Z} = \overset{(0dmpy)}{Z} = \frac{1}{4\pi} \int_{S_1}^{(dmpy)} K(Ak) dS, \text{ при } A = 1;$$

$K(k)$  – преобразование Фурье-ядра  $\overset{(dmpy)}{K}_{ijkl}(x - x') = -[\partial_i \partial_l G_{jk}(x - x')]_{(ij)(kl)}$ ;

$\overset{(ompy)}{G}$  – тензорная функция Грина сплошной среды с упругими свойствами  $\overset{(efompy)}{C}$ ;  $\overset{(Elompy)}{V}$  и  $\overset{(BVompy)}{V}$  – соответственно объем эллипсоида и объем блока Вороного в сплошной среде со структурой, соответствующей породному массиву.

---

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мышкис А.Д. Элементы теории математических моделей. – М.: Физматлит, 1994. – 192 с.
2. Уотермен Д., Хейес Ротт Ф., Ленат Д. Построение экспертных систем. – М.: Мир, 1987. – 441 с.
3. Уотермен Д. Руководство по экспертным системам. – М.: Мир, 1989. – 388 с.
4. Любовиц Г. Разрушение, т. 2. – М.: Мир, 1975. – 634 с.
5. Халкечев Р.К. Стохастический метод определения элементарных объемов кристаллических и композиционных геоматериалов // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. – 2012. – № 2. – С. 38–41.
6. Халкечев Р.К. Теоретические основы мультифрактального моделирования трудноформализуемых объектов // Прикладная и промышленная математика: Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Отдельные статьи (специальный выпуск). – 2013. – № 9. – С. 8–16. **ГИАБ**

---

## КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Халкечев Руслан Кемалович – кандидат физико-математических наук, доцент, e-mail: syrus@list.ru, МГИ НИТУ «МИСиС».

---

UDC 004.9; 004.41; 51-74; 622

### EXPERT CONTROL SYSTEM OF SCIENTIFIC RESEARCHES PROCESS OF GEOMATERIALS DESTRUCTION OF COMPLEXITY VARIOUS ORDERS

*Khalkachev R.K., Doctor of Physical and Mathematical Sciences,  
Assistant Professor, e-mail: syrus@list.ru,  
Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS»,  
119049, Moscow, Russia.*

*In this article the architecture of expert system which depending on statements of the problem selects the criteria of destruction allowing to construct adequate mathematical model meeting the requirement of sufficient simplicity is developed. This system is the representative of new generation of the expert systems differing from existing that the knowledge base along with heuristics rules, contains the mathematical models directing the course of the solution of an objective.*

*Key words:* expert system, scientific research, knowledge base, mathematical model, geomaterial.

### REFERENCES

1. Myshkis A.D. *Elementy teorii matematicheskikh modelei* (Elements of theory of mathematical models), Moscow, Fizmatlit, 1994, 192 p.
2. Uotermen D., Kheies Rott F., Lenat D. *Postroenie ekspertnykh sistem* (Expert system construction), Moscow, Mir, 1987, 441 p.
3. Uotermen D. *Rukovodstvo po eksperimentnym sistemam* (Expert system guidelines), Moscow, Mir, 1989, 388 p.
4. Lyubovits G. *Razrushenie*, t. 2 (Failure, vol. 2), Moscow, Mir, 1975, 634 p.
5. Khalkachev R.K. *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo nauchnogo tsentra RAN*. 2012, no 2, pp. 38–41.
6. Khalkechev R.K. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*. Special edition. 2013, no 9, pp. 8–16.

