

## НОВЫЕ МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ В ГОРНОМ ДЕЛЕ

УДК 539.421

### ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАЗРЫВА ПЛАСТА ПРИ ДОБЫЧЕ ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

**А. В. Азаров, М. В. Курленя, С. В. Сердюков**

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,  
E-mail: antonazv@mail.ru, Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Представлены структура, особенности и примеры использования программного комплекса, созданного на основе расширенного метода конечных элементов в среде программирования ABAQUS и предназначенного для моделирования гидравлического разрыва проницаемого породного массива, определения траекторий развития трещин в условиях неоднородного напряженного состояния среды.

*Массив горных пород, гидравлический разрыв, трещина, математическое моделирование, расширенный метод конечных элементов, поропругая среда, программное обеспечение*

DOI: 10.15372/FTPRPI20200523

---

При добыче твердых полезных ископаемых гидравлический разрыв пласта (ГРП) применяют для дезинтеграции труднообрушаемой кровли [1], интенсификации дренирования породного массива [2, 3], формирования в нем противодиффузионных экранов [4]. Размеры создаваемых трещин не превышают 10–20 м, пропантами их не расклинивают. Осуществляют разрывы в основном в зоне значительного влияния горных выработок на напряженно-деформированное состояние пород, фильтрацию флюидов. Траектории образующихся трещин сильно зависят от неоднородности поля напряжений [5, 6]. Это затрудняет проектирование работ симуляторами, предназначенными для решения задач интенсификации извлечения нефти, например РН-ГРИД [7], которые сосредоточены на построении модели среды по результатам геофизических исследований скважин, процессах переноса и осаждения пропанта, проницаемости формируемых каналов. Существует практическая потребность в создании специализированного программного обеспечения для моделирования гидравлических разрывов применительно к задачам и условиям подземной разработки твердых полезных ископаемых.

Приведены структура, особенности и примеры использования такого программного обеспечения, разработанного на основе расширенного метода конечных элементов XFEM (eXtended Finite Element Method) [8, 9], реализованного в среде программирования мирового

уровня SIMULIA ABAQUS. Моделирование гидроразрыва этим методом позволяет решать задачу развития трещины в произвольном направлении с учетом разупрочнения породы в локальной зоне перед ее фронтом, темпа подачи, свойств рабочей жидкости и ее утечек в проницаемые породы.

В разработанном программном обеспечении породный массив описывается моделью слоисто-неоднородной пороупругой среды, компоненты деформации которой рассчитываются в квазистатическом приближении из решения уравнений

$$\sigma_{ij} = 2\mu\varepsilon_{ij} + \lambda\varepsilon_0\delta_{ij} - \alpha p\delta_{ij}, \quad (1)$$

где  $\sigma_{ij}$  — компоненты тензора напряжений;  $\varepsilon_{ij} = (\partial u_i / \partial x_j + \partial u_j / \partial x_i) / 2$  — тензор деформаций;  $u_i$  — смещения;  $\lambda, \mu$  — параметры Ламе;  $\varepsilon_0$  — объемная деформация твердого скелета;  $\alpha$  — коэффициент Био;  $p$  — давление жидкости в пороупругой среде;  $\delta_{ij}$  — символ Кронекера. Изменение объема жидкости определяется соотношением

$$\frac{1}{M} \frac{\partial p}{\partial t} + \alpha \frac{\partial \varepsilon_0}{\partial t} + v_{k,k} = 0, \quad (2)$$

где  $M = 2G(v_u - v) / (\alpha^2(1 - 2v_u)(1 - 2v))$  — модуль Био;  $v, v_u$  — коэффициенты Пуассона для дренируемого и недренируемого пороупругого материала, насыщенного жидкостью,  $G$  — модуль сдвига дренируемого материала;  $v_k$  — скорость фильтрации жидкости в среде согласно закону Дарси:

$$v_i = -\frac{k}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x_i}, \quad (3)$$

$k$  — проницаемость среды;  $\eta$  — динамическая вязкость жидкости.

Рабочая жидкость гидроразрыва считается ньютоновской, а ее течение в трещине — соответствующим закону Пуазейля. Для моделирования потока жидкости в трещине и среде используется уравнение неразрывности

$$\frac{\partial d}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{q} + v_t + v_b = 0. \quad (4)$$

Здесь  $d$  — раскрытие трещины;  $\vec{q} = (q_1, q_3, q_2)$ ;  $q_i = d\tilde{k}(\partial p / \partial x_i)$ ;  $v_t, v_b$  — скорости нормального потока к верхней и нижней поверхностям трещины,  $\tilde{k}$  — эффективная проницаемость трещины в  $i$ -м направлении:

$$\tilde{k} = -\frac{d^2}{12\eta}. \quad (5)$$

Скорость утечек рабочей жидкости через поверхности трещины задаются законом Дарси:

$$v_t = -\frac{k}{\eta}(p_f - p_t), \quad v_b = -\frac{k}{\eta}(p_f - p_b), \quad (6)$$

где  $p_f$  — давление жидкости в трещине;  $p_t$  и  $p_b$  — поровое давление жидкости на верхней и нижней поверхностях трещины соответственно.

Общее решение задачи с разрывом смещений  $u(x)$  имеет вид

$$u(x) = \sum_{i=1}^N [N_i(x)u_i + H(x)a_i], \quad (7)$$

$N_i(x)$  — интерполяционные функции;  $N$  — число узлов в элементе;  $u_i$  — смещения узлов;  $a_i$  — добавочные смещения узлов;  $H(x)$  — функция Хевисайда. Первый член суммы в (7) описывает непрерывную часть решения, второй — связанную с разрывом.

Считается, что разрушение среды начинается при достижении критического напряжения  $\sigma_c$  и описывается законом, связывающим степень разрушения  $D$  с деформацией за пределом линейной упругости среды. Помимо  $\sigma_c$  задается критическая энергия  $G_{lc}$ , высвобождаемая при разрушении материала, которая вычисляется по формуле  $G_{lc} = \int_0^{u_f} \sigma du$ , где  $u_f$  — скачок смещений при образовании трещины. Значение  $D$  монотонно возрастает от 0 (сплошная среда) до 1 (разрыв). В программе используются дискретные значения  $D(u)$ , полученные опытным путем, либо их аппроксимации экспоненциальной зависимостью, что соответствует наблюдаемым в экспериментах закономерностям возникновения и накопления трещин в горных породах [10].

После превышения  $\sigma_c$  возникает новое состояние среды, характеризующееся другими значениями критического напряжения  $\bar{\sigma}_c = (1-D)\sigma_c$  и модуля упругости  $\bar{E} = (1-D)E$ . И так пошагово до тех пор, пока среда не переходит в полностью разрушенное состояние, при котором  $\bar{\sigma}_c = 0$ ,  $\bar{E} = 0$ .

В [6] показано, что результаты моделирования разрыва вблизи свободной поверхности упругой среды рассмотренным способом и методом интегральных сингулярных уравнений [5], протестированным на блоках оргстекла, практически идентичны. Выбор метода XFEM связан с его высокой производительностью в сложно построенных пороупругих средах, с возможностью решения широкого круга задач, возникающих при добыче твердых полезных ископаемых, например предотвращения прорыва трещин гидроразрыва в горные выработки.

#### **Состав программного комплекса:**

— модуль моделирования гидравлического разрыва пласта, в том числе формирования трещин вдоль и поперек одиночной скважины, а также магистральной трещины при синхронном разрыве параллельных скважин с набором специально разработанных сеток для разбиения расчетных областей указанных задач на конечные элементы;

— модуль моделирования фильтрации пластовых флюидов в окрестности дренажных каналов и противифльтрационных экранов, созданных методом гидроразрыва.

Для работы программного комплекса на персональный компьютер (ПК) должны быть установлены пакет конечно-элементного анализа ABAQUS и интерпретатор Python с расширенным интерфейсом сценариев ASI (Abaqus Scripting Interface), который позволяет управлять процессом решения задач: создавать и изменять параметры модели (геометрию, материалы среды, граничные нагрузки и др.), запускать расчетные задачи, обрабатывать и анализировать полученные результаты.

Дано описание модуля расчета трещин, приведены примеры решений двумерной и трехмерной задач.

**Модуль моделирования гидравлического разрыва пласта** включает в себя следующие подсистемы:

- инициализация входных параметров;
- генерация модели и первичного входного файла ABAQUS с расширением inp;

- обработка первичного входного файла ABAQUS и внесения в него дополнительных команд, не поддерживаемых графическим интерфейсом ABAQUS CAE;
- запуск входного файла решателем ABAQUS;
- экспорт результатов моделирования в файле формата odb с информацией о напряженно-деформированном состоянии среды, поровом давлении, параметрах трещин.

Обработка полученных результатов осуществляется в интерактивном режиме с помощью пользовательского графического интерфейса ABAQUS CAE. В состав модуля входят следующие программные компоненты: mnFRAC.py, inputData.py, abaqusCAE.py и procInputFile.py. Программа inputData.py задает входные параметры модели, которые используются компонентой abaqusCAE.py, генерирующей первоначальный входной файл. Он передается для обработки в программу procInputFile.py, которая создает новый входной файл с расширением .inp. Программный компонент mnEFRAC.py передает входной файл на исполнение решателю ABAQUS. Результаты расчета в виде файла с расширением .odb можно открыть в графической среде ABAQUS CAE.

Входные параметры модели задают область среды, параметры ее слоисто-неоднородного строения и полых включений, свойства пород, пластовых флюидов, граничные условия, а также параметры расчетной сетки.

В программном модуле текущей версии реализована возможность моделирования пересечения трещиной гидроразрыва разлома, геометрические параметры и свойства которого могут быть дополнительно заданы в файле inputData.py. Отметим, что по умолчанию метод XFEM в ABAQUS не позволяет моделировать пересечение трещин. Чтобы снять это ограничение в программном комплексе прописаны дополнительные плагины, реализующие подход, предложенный в [11]. Решение этой проблемы возможно также за счет введения в ABAQUS специальных соединительных элементов бесконечно малой толщины с прочностными свойствами, описываемыми законом Кулона–Мора, которые располагают на границах между основными конечными элементами и по которым происходит разрушение среды [12, 13]. Но такой подход выходит за рамки расширенного метода конечных элементов, используемого в текущей версии разработанного программного комплекса.

Ниже представлен список входных параметров, задаваемых в файле inputData.py:

- геометрические параметры: ширина, высота и глубина расчетной области среды; геометрия границ раздела пластов (в случае произвольной формы задается с помощью графического редактора из состава ASI); параметры, задающие положение и форму сечения горной выработки в пределах расчетной области среды; параметры, задающие положение и форму сечения скважин (включая щелевые инициаторы на их стенках); параметры, задающие расположение и толщину (раскрытие) разлома, сброса и сдвига пород вдоль него;
- физические свойства: свойства пород, слагающих, пласты, в том числе модули упругости, коэффициенты Пуассона, плотности, проницаемости, критические напряжения на разрыв, критические энергии разрушения; свойства пластового флюида и рабочей жидкости гидроразрыва (динамические вязкости, сжимаемости, плотности); свойства разлома и его наполнителя, (нормальная и сдвиговая жесткости, удельное сцепление, угол трения);
- граничные и начальные условия: внешние напряжения на границах модели; начальное поровое давление в среде; проницаемость стенок выработки, скважин (по интервалам); давление на стенках выработки, скважин (по интервалам);

- параметры гидроразрыва: параметры, задающие один или несколько интервалов гидроразрыва; скорость закачки рабочей жидкости; максимальное давление закачки;
- параметры сетки и расчета: параметры сетки вокруг скважин, выработки, в том числе расстояние между круговыми контурами, их число и радиус первого контура; расстояние между узлами сетки на круговых контурах; расстояние между узлами сетки в ребрах на границе расчетной области среды; размер сетки в расчетной области; число потоков, запрашиваемых для параллельных вычислений.

Программный модуль предназначен для работы на персональном компьютере, оснащенный процессором Intel Core i7 или более производительным с тактовой частотой не менее 2.0 ГГц, оперативной памятью не менее 32 Гб и объемом дискового накопителя не менее 500 Гб.

**Моделирование гидравлического разрыва пласта в двумерной постановке.** Во многих практических задачах горного дела анализ гидроразрыва пласта можно свести к двумерной постановке, например при создании трещин вдоль образующей протяженного участка скважины, пробуренной в направлении одного из главных напряжений, действующих в породном массиве.

Приведем пример моделирования такого разрыва разработанным программным комплексом. Рассматривается 2D область конечных размеров, содержащая проницаемый угольный пласт со скважиной, на стенках которой имеются вертикальные щелевые инициаторы (рис. 1). Граница области и ось скважины считаются закрепленными (смещения в вертикальном и горизонтальном направлениях равны нулю).



Рис. 1. Двумерная модель среды, содержащей угольный пласт и скважину с двумя вертикальными щелевыми инициаторами, пробуренную в направлении главного напряжения

Задача состоит в определении параметров создаваемых трещин (траектория, длина, раскрытие) в зависимости от напряженного состояния пласта, свойств, скорости и объема закачки рабочей жидкости, мощности пласта, положения в нем скважины (в центре или смещена в сторону кровли, подошвы пласта), физических свойств горных пород, радиуса скважины, угла наклона и длины щелевых инициаторов.

Пример расчетов, выполненных при следующих значениях входных параметров: пласт угля мощностью 2 м, модуль упругости угля  $3 \cdot 10^9$  Н/м<sup>2</sup>, коэффициент Пуассона угля 0.3, критическое напряжение угля на разрыв – 1 МПа, критическая энергия разрушения угля  $2 \cdot 10^4$  Н/м, проницаемость угля 0.1 мД, модуль упругости вмещающих уголь пород  $8 \cdot 10^9$  Н/м<sup>2</sup>, коэффициент Пуассона вмещающих уголь пород 0.2, критическое напряжение вмещающих уголь пород на разрыв  $5 \cdot 10^6$  Н/м<sup>2</sup>, критическая энергия разрушения вмещающих уголь пород  $4 \cdot 10^4$  Н/м, проницаемость вмещающих уголь пород 5 мД, динамическая вязкость пластовых вод и рабочей жидкости гидроразрыва 0.001 Па·с, радиус скважины 0.05 м, глубина щелевого инициатора 0.05 м.

На рис. 2 показаны траектории трещин гидроразрыва, рассчитанные при одинаковом объеме закаченной жидкости, но различном напряженном состоянии среды. Горизонтальные и вертикальные смещения среды в окрестности трещины при горизонтальном напряжении 10 МПа (рис. 2в), приведены на рис. 3.

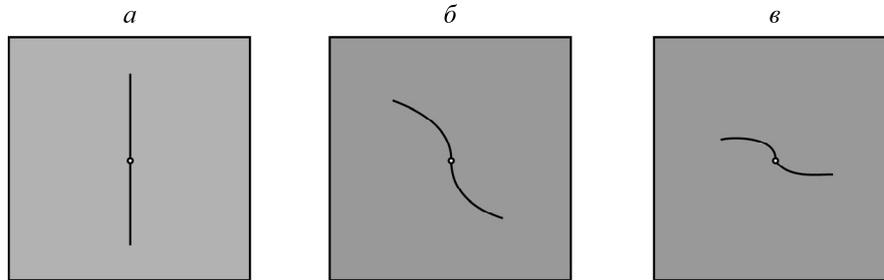


Рис. 2. Траектории трещин гидроразрыва среды, содержащей угольный пласт и скважину с двумя вертикальными целевыми инициаторами. Вертикальное напряжение  $\sigma_v = 5$  МПа, горизонтальное напряжение  $\sigma_h$ : 2.5 МПа (а); 7 МПа (б); 10 МПа (в)

Результаты показывают, что при секущем продольном разрыве пласта (вдоль образующей скважины) в зависимости от его мощности, параметров напряженного состояния и свойств пород возможен разворот трещины параллельно границам пласта как вне, так и в его пределах. Последний случай представляет интерес в технологиях интенсификации дегазации угольных пластов, горизонтальные напряжения в которых часто превышают вертикальные [14], а формирование послойной трещины способствует более эффективному снижению фильтрационного сопротивления дренажных скважин [15].

**Моделирование гидравлического разрыва пласта в трехмерной постановке.** Трехмерное моделирование гидравлического разрыва пласта при добыче твердых полезных ископаемых имеет практическое значение при формировании трещин сложной формы, например вдоль криволинейной скважины или скважины с боковым стволом (Y-образный инициатор разрыва [16]), с выходом в борт выработки или растущей вдоль параллельных скважин.

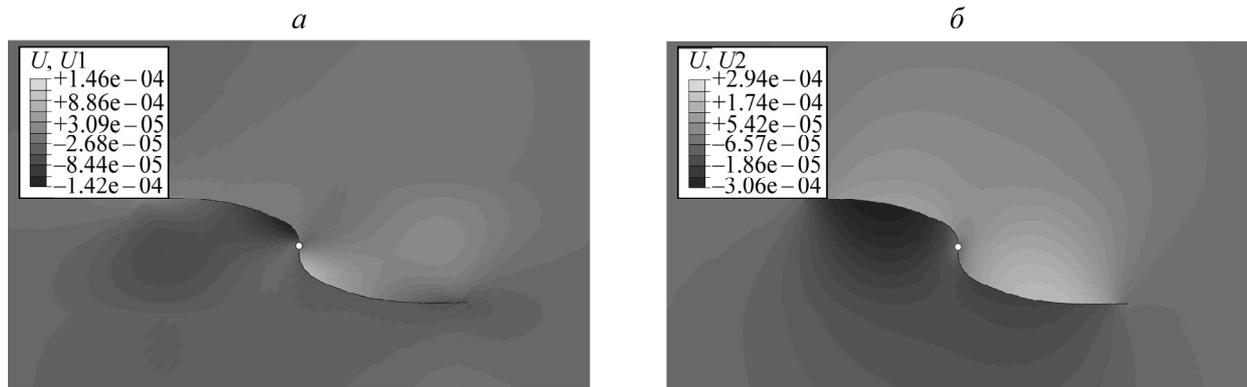


Рис. 3. Смещения среды в окрестности трещины гидроразрыва при  $\sigma_h = 2\sigma_v = 10$  МПа: а — горизонтальные смещения; б — вертикальные

Рассматривается трехмерная симметричная постановка задачи, когда две параллельные скважины располагаются на небольшом расстоянии друг от друга. Между их устьями находится дискообразный инициатор (трещина), диаметр которого совпадает с линией, соединяющей

середины осей скважин. В силу симметрии для расчетов берется часть области, ограниченная плоскостью симметрии между скважинами (рис. 4). Внешние границы расчетной области закреплены. На границе вдоль плоскости симметрии задается условие нулевых смещений в ортогональном ей направлении, среда однородная изотропная.

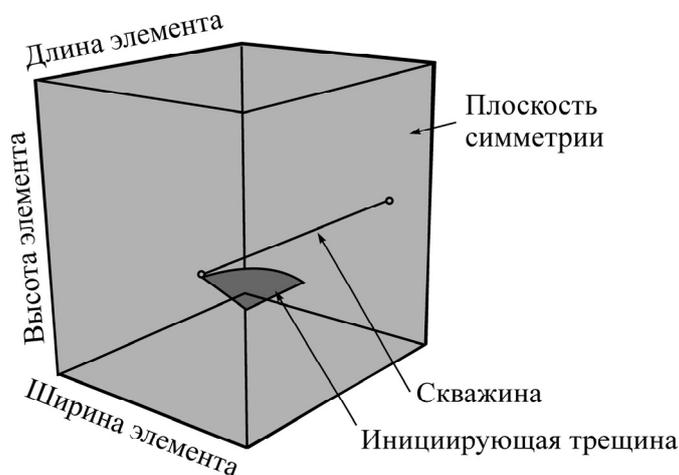


Рис. 4. Модель элемента трехмерной области угольного пласта, содержащего скважину и иницирующую трещину

Задача состоит в моделировании роста трещины гидроразрыва в среде при одновременной подаче рабочей жидкости в скважины и инициатор, определении формы и раскрытия созданных трещин на контуре скважин в зависимости от напряженного состояния среды, объема закачки рабочей жидкости, расстояния между скважинами и диаметров их сечений.

Одной из функций программного компонента *abaqusCAE.py* является ручная разметка расчетной области среды для решения типовых задач и автоматическое построение оптимизированных сеток встроенным в *ABAQUS* алгоритмом. Для решения задачи использована разметка из круговых контуров, коаксиальных скважине. Их количество, расстояние между ними и размер наименьшего контура задаются переменными во входном файле *inputData.py*. На рис. 5 показан пример разбиения расчетной области размером  $6 \times 5 \times 10$  м с расстоянием между скважинами 2 м. Разметка включает 15 контуров с наименьшим радиусом 0.1 м и удалением друг от друга 0.05 м. Расстояние между узлами на ребрах расчетной области составляет 0.3 м, исключая грань в плоскости симметрии (рис. 5), для ребер которой оно равно 0.1 м.

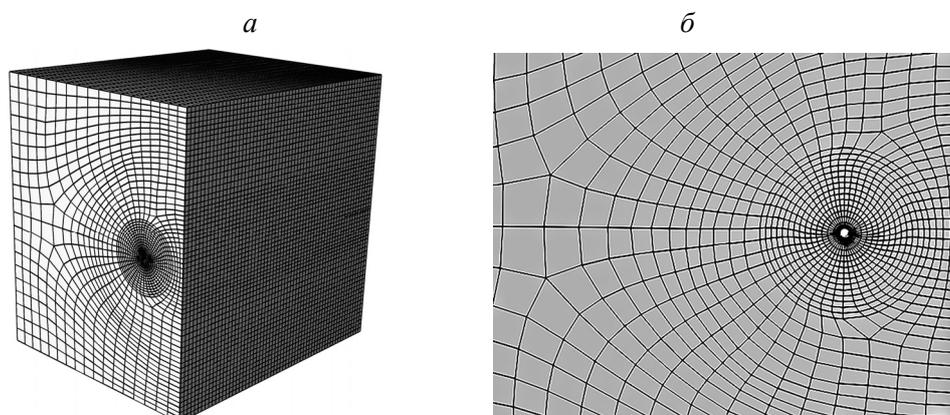


Рис. 5. Разбиение сеткой расчетной области: *а* — вся область; *б* — вблизи скважины

На рис. 6 приведены результаты расчета формы трещины гидроразрыва для объемов закачки рабочей жидкости 1.7 и 4.6 л при вертикальном напряжении 5 МПа, напряжениях в горизонтальной плоскости 10 МПа, модуле упругости непроницаемой среды  $3 \cdot 10^9$  Н/м<sup>2</sup>, коэффициенте Пуассона 0.3, критическом напряжении на разрыв –1 МПа, критической энергии разрушения  $2 \cdot 10^4$  Н/м и динамической вязкости жидкости 0.001 Па·с.

При заданных значениях параметров область развития трещины ограничена пространством между скважинами и пропорциональна объему закаченной жидкости. Такая геометрия разрыва может быть использована в технологиях, требующих локальной дезинтеграции породного массива, сбойки трещинами системы скважин.

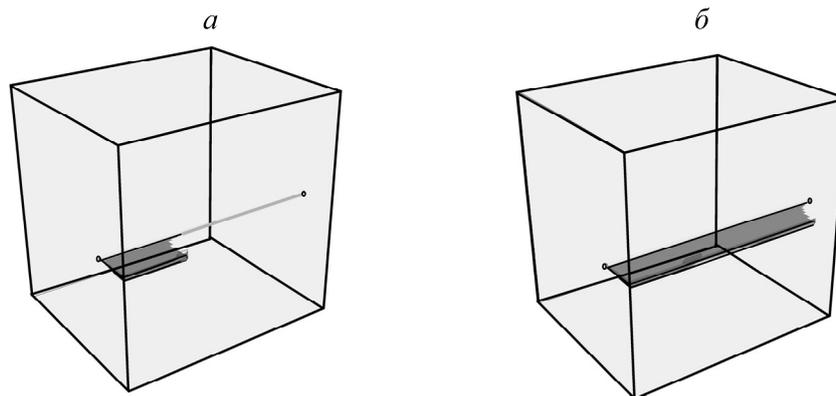


Рис. 6. Форма трещины при разрыве вдоль двух параллельных скважин при различном объеме закачки рабочей жидкости: *a* — 0.00168 м<sup>3</sup>; *b* — 0.0046 м<sup>3</sup>

## ВЫВОДЫ

Разработан программный комплекс для моделирования гидравлического разрыва проницаемого породного массива, обеспечивающий определение траекторий развития трещин в условиях неоднородности поля напряжений. Комплекс создан на основе расширенного метода конечных элементов, реализованного в среде программирования SIMULIA ABAQUS, и состоит из программ инициализации входных параметров, генерации модели, построения расчетной сетки, моделирования роста трещин в двумерной и трехмерной постановках, расчета напряженно-деформированного состояния среды, распределения порового давления, параметров трещин.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Леконцев Ю. М., Сажин П. В. Технология направленного гидроразрыва пород для управления труднообрушающимися кровлями в очистных забоях и дегазации угольных пластов // ФТПРПИ. — 2014. — № 5. — С. 137–142.
2. Курленя М. В., Сердюков С. В., Патутин А. В., Шилова Т. В. Интенсификация подземной дегазации угольных пластов методом гидроразрыва // ФТПРПИ. — 2017. — № 6. — С. 3–9.
3. Mills K., Jeffrey R., Black D., Meyer T., Carey K., and Goddard S. Developing methods for placing sand-propped hydraulic fractures for gas drainage in the bulli seam, In: Underground Coal Operators' Conference, July 7–8, 2006, Wollongong, Australia, 2006. — P.190–199.
4. Shilova T., Patutin A., and Serdyukov S. Sealing quality increasing of coal seam gas drainage wells by barrier screening method, Int. Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM, 2013, Vol. 1. — P. 701–708.

5. Шер Е. Н., Михайлов А. М. Моделирование роста осесимметричных трещин при взрыве и гидроразрыве вблизи свободной поверхности // ФТПРПИ. — 2008. — № 5. — С. 53–61.
6. Азаров А. В., Курленя М. В., Сердюков С. В., Патутин А. В. Особенности развития трещины гидроразрыва вблизи свободной поверхности в изотропной пороупругой среде // ФТПРПИ. — 2019. — № 1. — С. 3–11
7. Симулятор гидроразрыва пласта нового поколения “РН-ГРИД” [Электронный ресурс]//URL: <https://rn.digital/rngrid/> (дата обращения: 13.09.2020).
8. Song J. H., Areias P. M. A., and Belytschko T. A method for dynamic crack and shear band propagation with phantom nodes, *Int. J. Numerical Methods in Eng.*, 2006, Vol. 67, No. 6. — P. 868–893.
9. Sukumar N. and Prévost J. H. Modeling quasi-static crack growth with the extended finite element method Part I: Computer implementation, *Int. J. Solids and Structures*, 2003, Vol. 40, No. 26. — P. 7513–7537.
10. Щербаков И. П., Куксенко В. С., Чмель А. Е. Температурная зависимость накопления микроповреждений при ударном разрушении гранита // ФТПРПИ. — 2013. — № 6. — С. 90–97.
11. Cruz F., Roehl D., and do Amaral Vargas Jr E. An XFEM implementation in Abaqus to model intersections between fractures in porous rocks, *Computers and Geotechnics*, 2019, Vol. 112. — P. 135–146.
12. Li Y., Deng J. G., Liu W., and Feng Y. Modeling hydraulic fracture propagation using cohesive zone model equipped with frictional contact capability, *Computers and geotechnics*, 2017, Vol. 91. — P. 58–70.
13. Wang S., Li H., and Li D. Numerical simulation of hydraulic fracture propagation in coal seams with discontinuous natural fracture networks, *Processes*, 2018, Vol. 6, No. 8. — P. 113.
14. Chaoru Liu Distribution laws of in-situ stress in deep underground coal mines, *Procedia Eng.*, 2011, Vol. 26. — P. 909–917.
15. Сердюков С. В., Курленя М. В., Рыбалкин Л. А., Шилова Т. В. Влияние гидроразрыва угля на фильтрационное сопротивление зоны дренирования дегазационной скважины // ФТПРПИ. — 2019. — № 2. — С. 3–13.
16. Пат. 2730688 РФ. Способ направленного гидроразрыва угольного пласта / С. В. Сердюков, А. В. Патутин, Л. А. Рыбалкин, Т. В. Шилова, А. В. Азаров // Опубл. в БИ. — 2020. — № 24.

*Поступила в редакцию 09/IX 2020*

*После доработки 10/IX 2020*

*Принята к публикации 11/IX 2020*