

УДК 622.02

Е. В. Пугачев, В.А. Корнеев

АДАПТАЦИЯ МЕТОДА БАРОНА – ГЛАТМАНА К ИЗМЕРЕНИЮ КОНТАКТНОЙ ПРОЧНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД В СКВАЖИНАХ И ТЕХНИЧЕСКОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ЕГО РЕАЛИЗАЦИИ

Контактная прочность является основной характеристикой сопротивляемости горных пород механическому разрушению в приповерхностном слое, что делает ее важнейшим показателем при выборе горного инструмента для решения технологических задач с наименьшими энергетическими затратами. При этом наличие зависимостей между контактной прочностью и различными физико-механическими свойствами пород способствует использованию данного показателя в качестве информативного индикатора при проведении экспресс-мониторинга окрестностей подземных горных выработок.

В отечественной и зарубежной практике известны различные методы измерения контактной прочности горных пород в натуральных условиях, общим принципом которых является построение диаграммы «напряжение-деформация» при вдавливании индентора в испытуемую породу. Интерпретация прочностных и деформационных свойств исследуемой породы осуществляется обычно по установленной корреляции с контактной прочностью, что не всегда по уровню надежности соответствует требованиям ведения горных работ.

В связи с указанными обстоятельствами одной из актуальных задач для науки и практики является разработка технического устройства для определения контактной прочности горных пород в скважинах, с привлечением математической модели пространственного напряженно-деформированного состояния (НДС) горных пород для интерпретации показаний прибора.

Одним из наиболее близких к физической сущности процесса разрушения горных пород механическими способами при добыче твердых полезных ископаемых, является метод определения контактной прочности, предложенный Л.И. Бароном и Л.Б. Глатманом, и заключающийся во вдавливании в естественную (необработанную) поверхность горной породы индентора с плоской контактной поверхностью [1]. Адаптация данного метода для определения контактной прочности горных пород в скважинах, осуществленная автором настоящей статьи, привела к корректировке существующей методики и разработке специального устройства для его реализации «Прочностномер ПСШ-1» (рис. 1).

Конструктивно прочностномер ПСШ-1 состоит из гидроцилиндра, соединенного с насосом рукавом высокого давления и измерительного блока. Шток поршня гидроцилиндра оснащен инденто-

ром, вдавливаемым в горную породу при работе прибора.

Измерительный блок устройства включает в себя модуль сбора данных, тензометрический датчик, взаимодействующий с индентором прибора, и датчик давления рабочей жидкости. Совокупность данных, полученных с датчиков, регистрируется на карте памяти модуля сбора данных и при дальнейшей обработке позволяет получить график «напряжение-деформация» при вдавливании индентора в горную породу.



Рис. 1. Прочностномер ПСШ-1

Гидравлический цилиндр прибора представляет собой конструкцию с двумя поршнями (нагрузочным и бесштоковым), позволяющую достигать усиления нагрузки, с которой осуществляется воздействие индентора на горную породу, по сравнению с давлением подводимой жидкости в соответствии со следующей зависимостью [2]:

$$P = \frac{q_0 \cdot S_1}{S_1 - S_2} \cdot S_2, \quad (1)$$

где P - усилие на инденторе; q_0 - давление подводимой жидкости; S_1 , S_2 - площадь сечения бесштокового и нагрузочного поршней в гидравлическом цилиндре.

Интерпретация прочностных и деформационных свойств массива осуществляется по результатам анализа диаграммы вдавливания индентора в стенку скважины с привлечением авторского пакета программ «Индентирование» v 1.0, представляющего собой математическую модель НДС горных пород под воздействием индентора [3].

Специфические особенности проведения исследований в скважине, заключающиеся во вдавливании индентора в закругленную поверхность,

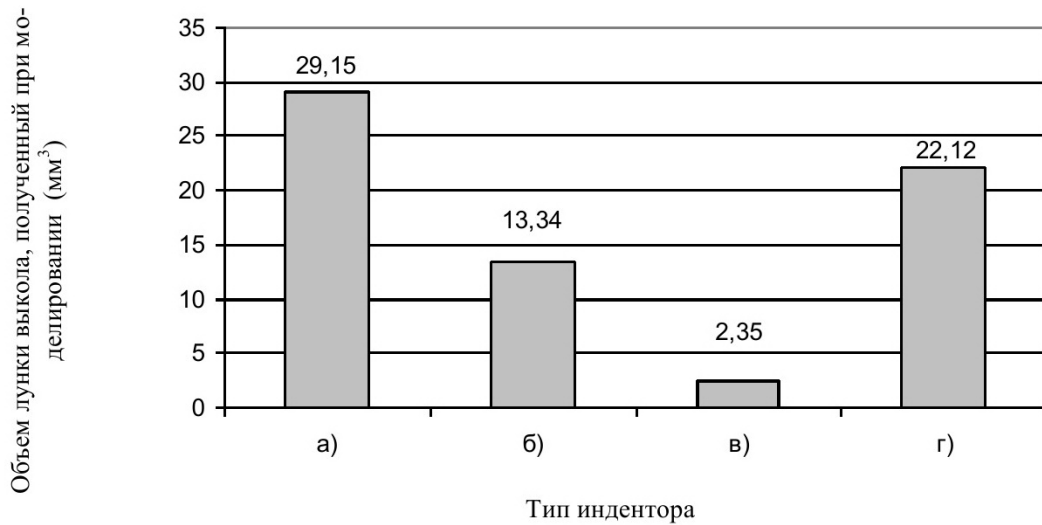


Рис. 2. Влияние изменения геометрической формы и размеров индентора на процесс деформации и разрушения горных пород в скважинах

не позволяют использовать плоские инденторы в виду концентрации разрушающей нагрузки в локальных областях взаимодействия индентора и горной породы. В связи с этим, адаптация метода Барона – Глатмана к скважинным измерениям потребовала проведения исследований влияния геометрической формы индентора на процесс разрушения горной породы. Исследования проводились посредством математического моделирования в авторском пакете программ [3]. В эксперименте использовались следующие типы инденторов: а) точечный, б) индентор с цилиндрической контактной плоскостью ($a=8$ мм, $b=3$ мм); в) индентор с цилиндрической контактной плоскостью ($a=8$ мм, $b=6$ мм); г) индентор – лезвие ($b=9$ мм), где a – длина дуги контактной поверхности, b – ширина индентора. Результаты исследований приведены на рис. 2.

Из приведенной диаграммы видно, что наиболее эффективное разрушение происходит под воздействием точечного индентора, однако в силу малой площади взаимодействия с горной породой, приложение разрушающей нагрузки осуществляется непосредственно к кристаллитам, что не позволяет судить об агрегатных свойствах горной породы.

Аналогичные замечания также могут быть отнесены к индентору в форме лезвия. Таким образом, наиболее предпочтительной является форма индентора с цилиндрической контактно плоскостью, с размерами достаточными для нивелирования влияния масштабного эффекта при проведении измерений.

В связи с вышеописанными соображениями в прочностномере ПСШ-1 используются инденторы в форме усеченного конуса с закругленной контактной частью диаметром 1,6 мм, что для слагающих горные массивы литологических разно-

видностей пород в угольных шахтах позволяет получить достаточно приемлемые результаты [1]. Инденторы, используемые при проведении исследований методом Барона – Глатмана и его адаптированным вариантом для скважинных измерений, приведены на рис. 3.

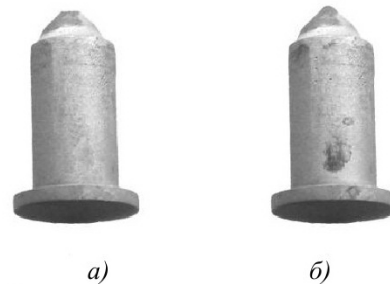


Рис. 3. Инденторы, используемые для определения контактной прочности:

- а) методом Барона – Глатмана;
б) адаптированным методом

В основе пакета программ «Индентирование» v 1.0, используемого для интерпретации показаний прибора, лежит аппроксимация непрерывного смещения исследуемого материала посредством набора линейных функций, описывающих деформирование в объеме конечного элемента. В качестве конечного элемента в реализованной математической модели используется трехмерный симплекс-элемент, представляющий собой тетраэдр. Интерполяционный полином для такого элемента имеет вид:

$$\varphi = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y + \alpha_4 z, \quad (2)$$

где φ – исследуемая скалярная величина; x, y, z – координаты тетраэдра.

Данные допущения позволяют свести процесс интегрирования сложных дифференциальных

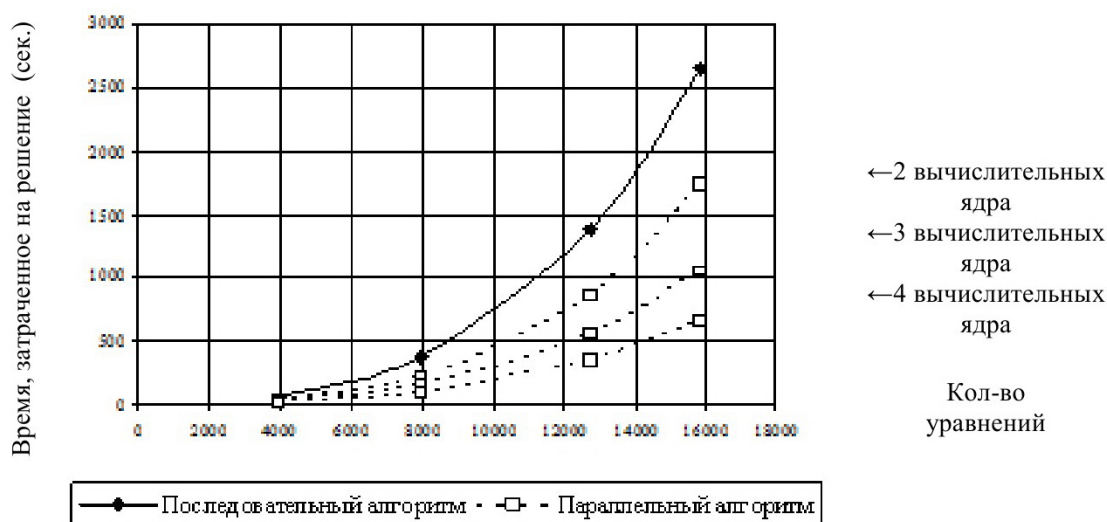


Рис. 4. Время, затраченное ЭВМ на решение задачи

уравнений к решению системы линейных уравнений вида:

$$\{F\} = [K]\{\delta\}, \quad (3)$$

где $\{F\}$ – вектор-столбец нагрузок на конечные элементы; $[K]$ – глобальная матрица жесткости; $\{\delta\}$ – вектор-столбец перемещений вершин конечных элементов, определяемый после решения системы уравнений.

Глобальная матрица жесткости включает в себя матрицы жесткости всех конечных элементов. Для I -го элемента системы матрица жесткости принимает вид:

$$[K_I] = \int_{V_I} [B_I]^T [D_I] [B_I] dV, \quad (4)$$

где $[K_I]$ – матрица жесткости I -го элемента системы; $[B_I]$ – матрица коэффициентов вида конечных элементов системы и типа рассматриваемой задачи; $[D_I]$ – матрица упругих констант материала в конечном элементе системы.

Система уравнений (3) решается методом исключения Гаусса, который является весьма ресурсоемким процессом при расчетах на ЭВМ. В этой связи автором был разработан алгоритм параллельного решения системы линейных уравнений методом исключения Гаусса [4].

Наличие в теле алгоритма циклов с независимыми итерациями позволяет осуществлять разбиение решаемой задачи на отдельные процессы и их выполнение в произвольном порядке различными процессорами используемой ЭВМ.

При этом ленточное строение и сильная разреженность матрицы делают возможным оптимизацию вычислительных процессов посредством работы программы исключительно с ненулевыми

элементами матрицы.

Разработанный алгоритм может быть использован в качестве подпрограммы в различных вычислительных приложениях.

Программная реализация разработанной математической модели осуществлена с использованием алгоритмического языка программирования высокого уровня High Performance Fortran, ориентированного на системы с распределенной памятью и реализующего парадигму параллелизма данных с использованием модели обработки данных SIMD [5]. Компиляция программного кода производилась на компиляторе Fortran DVM.

На рис.4 приведены графики, иллюстрирующие время, затраченное ЭВМ на решение задачи посредством известных последовательных [6] и разработанного параллельного алгоритмов в зависимости от заданных условий.

Условия задачи включали в себя число слоев углеродного массива и размеры сетки конечных элементов, что в итоге влияло на количество уравнений, решаемых ЭВМ.

Из рис. 4 видно, что использование предлагаемого параллельного алгоритма сокращает время расчета в среднем на 30 % за счет каждого вычислительного ядра, что на практике позволяет осуществлять расчеты с большей точностью и меньшими временными затратами.

Апробация устройства для определения контактной прочности горных пород в скважинах «Прочностномер ПСШ-1» была осуществлена посредством определения прочностных и деформационных свойств образца мрамора с линейными размерами 500 x 150 x 200 мм, в котором были пробурены 2 скважины диаметром 58 мм. Диаграмма вдавливания индентора, полученная с карты памяти прибора приведена на рис. 5.

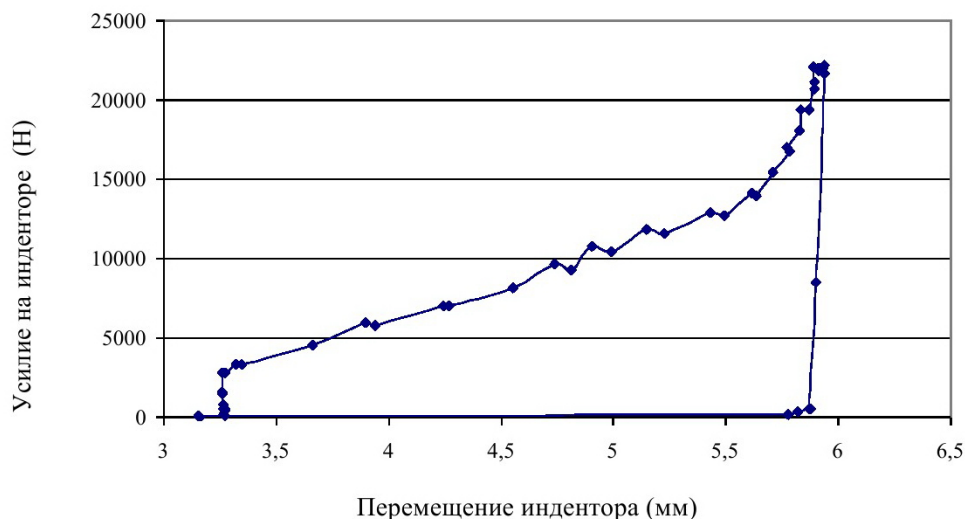


Рис.5. Диаграмма вдавливания индентора при исследовании мраморного блока

Обратный расчет физико-механических свойств мраморного блока посредством пакета программ «Индентирование» v 1.0 дал

$$E = 410000 \text{ т/м}^2, \quad \sigma_{СЖ} = 20,5 \text{ МПа},$$

где E - модуль упругости горной породы, т/м^2 ,
 $\sigma_{СЖ}$ - предел прочности горной породы при одноосном сжатии, МПа.

Результаты проведенных исследований докладывались на конференциях и научно-технических

совещаниях с ведущими горно-добывающими и научно-исследовательскими организациями региона.

Получены рекомендации к внедрению устройства для определения контактной прочности горных пород в скважинах «Прочностномер ПСШ-1» от ОАО «ВостНИГРИ», ОАО «СибНИИУглеобогатение», ЗАО «Уралгормаш», ООО ЭО Экспертпромуголь.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барон Л. И. Контактная прочность горных пород / Л. И. Барон, Л. Б. Глатман. – М. : Недра, 1966. – 227 с.
2. Патент № 2433266 РФ, МПК E21C39/00, G01N3/40. Погружной измеритель крепости горных пород / Л. Т. Дворников, В. А. Корнеев. – № 2010110978/03 ; заявл. 22.03.2010 ; опубл. 10.11.2011. – 5 с.: ил.
3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012612864 РФ. «Индентирование» v 1.0 / В. А. Корнеев. – № 2012610794 ; заявл. 08.02.2012 ; опубл. 22.03.2012. – 1 с.
4. Корнеев В. А. Реализация высокопроизводительных методов вычислений в задачах геомеханики / В. А. Корнеев // ГИАБ. – 2012. – № 2. – С. 383 – 385.
5. Немнюгин С. А. Параллельное программирование для многопроцессорных вычислительных систем / С. А. Немнюгин, О. Л. Стесик. – СПб.: БХВ-Петербург, 2002. – 400 с.
6. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике / А.Б. Фадеев. – М.: Недра, 1987. – 221 с.

□ Авторы статьи:

Пугачев
 Емельян Васильевич,
 д.т.н., проф., зав. каф. электро-
 механики (Сибирский государствен-
 ный индустриальный университет,
 г. Новокузнецк),
 тел.: (3843) 74-86-37

Корнеев
 Виктор Александрович,
 ст. преподаватель каф. элект-
 ромеханики (Сибирский государст-
 венный индустриальный
 университет, г. Новокузнецк),
 тел. 8-923-628-90-04,
 e-mail: corn@rdtc.ru