

А.М. Исонкин, Р.К. Богданов

## НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОРОДОРАЗРУШАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ АЛМАЗНОЙ ИМПРЕГНИРОВАННОЙ КОРОНКИ

Розглянуто застосування методів імітаційного моделювання для вибору оптимальної насиченості алмазами породоруйнуючої поверхні імпрегнованої коронки та впливу її на працездатність бурового інструмента.

Рассмотрено применение методов имитационного моделирования для выбора оптимальной насыщенности алмазами породоразрушающей поверхности импрегнированной коронки и влияния её на работоспособность бурового инструмента.

Application of simulation methods is considered for the choice of optimal saturation the diamonds of destruction surface of impregnated drill bit and influences of it on the capacity of drilling instrument.

Одной из основных задач при научном обосновании оптимальной конструкции импрегнированной буровой коронки является установление влияния на работоспособность инструмента степени оснащённости алмазами её породоразрушающей поверхности.

Число алмазов, расположенных на единице площади рабочей поверхности матрицы, характеризует насыщенность алмазами рабочих элементов коронки, которая в совокупности с размерами алмазов, их прочностью и определенной износостойкостью матрицы при оптимальных параметрах режима бурения обеспечивает эффективное разрушение горных пород.

Сложность получения реалистической модели рабочей поверхности такого инструмента связана в первую очередь со стохастической природой его породоразрушающей части и обусловлена тем, что главенствующим является не её геометрические параметры, а зерновой состав и количество алмазов в рабочем слое.

Это значительно увеличивает объём исследований рельефа рабочей поверхности импрегнированной буровой коронки, требует применения методов математической статистики при моделировании и описании результатов экспериментальных исследований.

Моделирование рабочей поверхности алмазного бурового инструмента является определяющим этапом при разработке теоретических основ процесса разрушения горных пород в процессе бурения. Значительное количество работ в области моделирования и создания абразивно-алмазного инструмента было направлено на создание о нём модельных представлений [1-5].

При анализе основных моделей рабочей поверхности абразивно-алмазного инструмента, оказавших наибольшее влияние на развитие теории его эффективного применения, можно выделить основные присутствующие в них базисные элементы: форма и размеры абразивных зерен, а также и законы их распределения в объёме рабочего слоя инструмента и на его рабочей поверхности [1, 2, 3].

При теоретических расчетах и моделировании сложная геометрическая форма реальных алмазных зерен исследователями в зависимости от решаемой задачи обычно заменяется упрощенным эквивалентом в виде трехосного эллипсоида: шаром [1, 3] или эллипсоидом вращения с постоянным соотношением осей [2].

Общим для большинства моделей является то, что число зерен в единице объёма абразивного слоя определяется из соотношений его общего объёма и объёма алмазов с учетом их концентрации в инструменте. При этом зерна равномерно распределены по всему абразивному слою, а закон распределения их размеров соответствует нормальному.

Построение моделей рабочей поверхности производится относительно поверхности связки и распределение центров зерен относительно её принимается равновероятностным. Закон распределения вершин зерен относительно наиболее выступающих принимается соответствующим закону распределения их размеров.

При решении задач статистического (имитационного) моделирования абразивного инструмента генерирование последовательностей случайных чисел проводилось для равномерного распределения координат центров зерен в абразивном слое и законов распределения размеров зерен на основе нормального.

Поэтому перед началом разработки конструкции инструмента необходимо было смоделировать его породоразрушающую часть, чтобы обеспечить получение оптимальных статистических характеристик расположения режущих кромок алмазных зерен на поверхности инструмента.

Спецификой импрегнированных алмазных коронок является то, что алмазные зерна имеют случайные форму и размеры, а также характеризуются случайным расположением их в связке. Поскольку экспериментальные исследования состояния рабочего торца коронки, выполняемые по традиционной методике [6], трудоемки, более целесообразно было использовать возможность определения характеристик

рабочей поверхности на ПЭВМ с привлечением аппарата имитационного моделирования.

Матрицу алмазной буровой коронки представляли как пространство, в котором равномерно распределены центры тяжести алмазных зерен  $O_i$  т.е.

$$O_i \left( R : \frac{D_{вн}}{2}, \frac{D_n}{2}, R : 0, \varphi; R : 0, H \right), \quad (1)$$

где  $D_{вн}, D_n, H$  – соответственно внутренний и наружный диаметры буровой коронки, высота алмазосодержащего слоя матрицы,  $\varphi$  – центральный угол, образующий сектор коронки,  $R: a, b$  – обозначение случайной величины, равномерно распределенной в интервале от  $a$  до  $b$ .

Положение центра тяжести зерна  $O_i$  задает начало отсчета локальной системы координат, в которой определяются геометрические размеры зерна. Алмазное зерно принято в виде шара [7], размеры которого – случайная величина, аппроксимируемая нормальным распределением с параметром [8]

$$M[x] = \sqrt{x_{max}x_{min}}; \sigma = 0,11M[x], \quad (2)$$

где  $M[x]$  – математическое ожидание диаметра моделирующего шара;  $x_{max}, x_{min}$  – границы диапазона зернистости основной фракции алмазного порошка.

Тогда величины диаметра алмазов  $2r$  распределены нормально

$$2r = N : M[x], s. \quad (3)$$

Общее число зерен в объеме алмазного слоя  $N$  определяли как

$$N = PN_k \frac{V}{V_{ak}},$$

где  $P$  – вес алмазов в буровой коронке заданного типоразмера, карат;  $N_k$  – число алмазных зерен в 1 карате, шт/карат;  $V$  – моделируемый объем, см<sup>3</sup>;  $V_{ak}$  – объем алмазосодержащего слоя буровой коронки, см<sup>3</sup>.

Площадь, занимаемую на поверхности инструмента алмазным зерном, и объем его выступающей части определяем соответственно как:

$$S_i = \pi h_c (2r_i - h_c); \quad (4)$$

$$V_i = \frac{\pi}{3} (2r_i - h_c) h_c^2,$$

где  $h_c$  – высота шарового сегмента выступающей части  $i$ -го алмазного зерна, мм.

В соответствии с [6] предполагали, что зерна, центр тяжести которых находится над матрицей, выламываются и не участвуют в бурении. Исходя из этого высоту  $i$ -го зерна над поверхностью буровой коронки находим из условия

$$y_i = r_i - z > 0,$$

где  $r_i$  – радиус  $i$ -го зерна;  $z$  – уровень матрицы.

Если условие (4) не выполняется, зерно находится ниже уровня матрицы и в процессе разрушения горной породы также не участвует. Количество зерен в моделируемом объеме матрицы определяется зернистостью и концентрацией алмазного порошка.

Количество зерен, находящихся в моделируемом объеме матрицы, определяются зернистостью и концентрацией алмазного порошка.

Имитационное моделирование по формулам (1) – (3) позволяет оценить распределение высоты выступления алмазных зерен, объем их выступающих частей и экранируемую площадь матрицы.

Однако полученные распределения не учитывают условия взаимодействия алмазных зерен с породой при бурении, потому эти зависимости можно рассматривать только как характеристики новой коронки, алмазы которой вскрыты, например, электролитическим травлением.

При бурении часть алмазных зерен, выступающих над матрицей, взаимодействует с породой. Согласно [9]

$$h_i = P_i / \pi P_{um} D_{ai}, \quad (5)$$

где  $h_i$  – глубина внедрения  $i$ -го алмазного зерна в породу под действием усилия  $P_i$ ;  $P_{um}$  – твердость породы по Шрейнеру;  $D_{ai}$  – диаметр алмазного зерна.

Если (5) привести к виду

$$P_i = R_i \pi P_{um} D_{ai}$$

справедливы условия:

$$P_i < [P]; \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^n P_i = P_{oc}, \quad (7)$$

где  $[P]$  – предельно допустимая нагрузка на алмазное зерно;  $P_{oc}$  – осевая нагрузка на буровую коронку;  $n$  – число зерен, контактирующих с породой.

Формулы (6) и (7) представляют собой условия, связывающие в одно целое два иерархических уровня процесса бурения: макро- (режимы бурения) и микроуровень (взаимодействие с породой каждого алмазного зерна). Очевидно, в (7) могут быть учтены лишь те алмазные зерна, для которых выполняется условие (6). Предельно допустимая нагрузка на алмазное зерно является его стандартной характеристикой [6].

При имитационном моделировании может быть получена выборка, содержащая значения диаметров зерен и соответствующих им высот выступления, что позволяет численно исследовать (6) и (7), задавая различные значения  $P_{oc}$  и  $h_i$  относительно максимально выступающего зерна. Выборка значений выступления, полученная в результате проверки условий (6) и (7), характеризует рабочую поверхность буровой коронки в начальный момент бурения. Условия контактирования буровой коронки с породой определяются прочностными характеристиками алмазных зерен и породы, а также осевой нагрузкой на инструмент.

В начале бурения происходит приработка рабочей поверхности буровой коронки, при которой значения ее характеристик стабилизируются и в дальнейшем воспроизводятся в процессе бурения [6].

При имитационном моделировании этой стадии бурения корректно формализовали условия стабилизации характеристик рабочей поверхности коронки. При оценке такого критерия использованы положения термодинамики открытых систем применительно к трению и изнашиванию [10].

Это позволяет сформировать алгоритм оценки для стационарного состояния и расчетным путем определить характеристики выступления алмазных зерен, число зерен, контактирующих с горной породой, толщину среза на одно зерно и т.д.

Описанный алгоритм реализован и использован для модельного изучения изменения характеристик поверхности импрегнированных коронок диаметром 59 мм, оснащенных синтетическими алмазами зернистостью 315/250 мкм [11].

Относительная их концентрация в матрице составляла от 100 до 200%.

Процесс бурения моделировался при удельной осевой нагрузке 160 даН/см<sup>2</sup> в малоабразивных породах X категории буримости ( $P_{ш} = 400$  кг/мм<sup>2</sup>) с низкой шероховатостью поверхности забоя (группа горных пород I из [12]).

Моделирование продолжалось до возникновения признака прекращения бурения, когда величина зазора между матрицей коронки и поверхностью забоя равнялась нулю (т. е. до заполирования алмазов). Результаты исследований приведены в табл. 1, где указаны данные, характерные для всех исследованных условий.

Анализ табл. 1 показывает, что при повышении концентрации алмазов в буровой коронке увеличивается число алмазных зерен на ее рабочей поверхности, однако при контактировании с поверхностью забоя число поломанных зерен, число зерен, контактирующих с породой, а также максимальная и средняя высоты выступления алмазных зерен над поверхностью матрицы практически не изменяются. Это объясняется тем, что при увеличении содержания алмазов в силу нормального закона распределения их диаметральных размеров прежде всего возрастает число зерен, размер которых близок к среднему значению.

В процессе бурения при постоянной осевой нагрузке по мере износа алмазов, контактирующих с породой, их число увеличивается с ростом концентрации, что должно приводить к увеличению износостойкости буровой коронки. В табл. 1 это отражается ростом числа циклов моделирования до полного заполирования буровой коронки, причем наиболее эффективно увеличение концентрации с 125 до 150%, так как здесь получен наибольший прирост износостойкости инструмента. Коронки с концентрацией алмазов 150% и 175% практически должны мало отличаться по износостойкости.

Можно предположить, что попытка увеличить производительность бурения путем увеличения осевой нагрузки на коронку не приведет к желаемому результату, так как достаточно большое число алмазных зерен, контактирующих с поверхностью забоя и воспринимающих осевое усилие, обеспечит разрушение горной породы без существенного увеличения средней величины среза на алмазном зерне. Альтернативный путь роста производительности – повышение частоты вращения инструмента, что требует бурового оборудования с широким диапазоном регулирования частоты вращения.

Таблица 1

Характеристики рабочей поверхности буровой коронки в зависимости от концентрации синтетических алмазов зернистостью 315/250 мкм в объемном слое коронки

Относительная концентрация алмазов, %	Кол-во циклов моделирования	Кол-во алмазных зерен, шт./см <sup>2</sup>			Высота выступления алмазов, мкм	
		выступающих из матрицы	контактирующих с породой	поломанных	максимальная	средняя
100	51	340	52	5	118	56
125	61	430	57	10	114	54
150	82	560	59	6	122	57
175	80	630	64	5	121	54
200	92	760	56	12	118	56

С целью проверки вышеизложенных предположений были проведены лабораторные исследования по оценке влияния степени насыщенности рабочего торца импрегнированных буровых коронок синтетическими монокристаллическими алмазами в матрице на их работоспособность и энергоёмкость разрушения ими горной породы.

С целью исключения влияния конструкции инструмента, прочности и зернистости алмазов на работоспособность все опытные коронки типа БА30 диаметром 59 мм выполнялись одинаковыми с плоским рабочим профилем и высотой алмазоносного слоя 4 мм, оснащенного взятыми из одной исходной партии алмазами АС125 зернистостью 315/250 мкм. Бурение скважин на частотах вращения 400 мин<sup>-1</sup>, 600 мин<sup>-1</sup>, 800 мин<sup>-1</sup> и постоянной углубке за оборот 80 мкм осуществлялось в коростышевском граните X категории буримости ( $\rho_{мех} = 51,2$  Р<sub>шт</sub> = 400 кгс/мм<sup>2</sup>).

Износостойкость коронок оценивалась по величине интенсивности изнашивания – отношению линейного износа матрицы коронки по высоте к длине пути трения. На каждом режиме бурения при помощи ваттметра Н-395 производилась запись мощности,

расходуемой на разрушение горной породы. Па её величине и объему разрушенной породы рассчитывалась энергоёмкость разрушения [6].

Полученные результаты по энергоёмкости разрушения гранита и интенсивности изнашивания матриц опытных коронок представлены на рис. 1 и 2.

Наименьшую величину энергоёмкости имеют коронки БА-30 с относительной концентрацией 150 и 175%. С уменьшением либо увеличением концентрации их энергоёмкость возрастает. Это объясняется тем, что при концентрации 100 и 125% значительная доля энергии расходуется на трение слабо защищенной алмазами матрицы о шлам горной породы и ее износ. Об этом свидетельствует также величина интенсивности изнашивания этих коронок, более высокая, чем у коронок с 150 и 175%-й концентрацией.

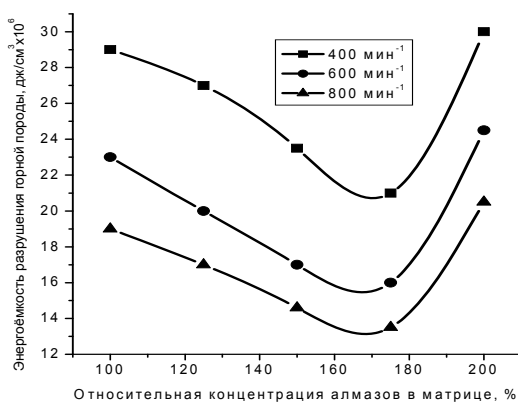


Рис. 1. Зависимость энергоёмкости разрушения горной породы от концентрации алмазов в матрице импрегнированной коронки при разной частоте вращения

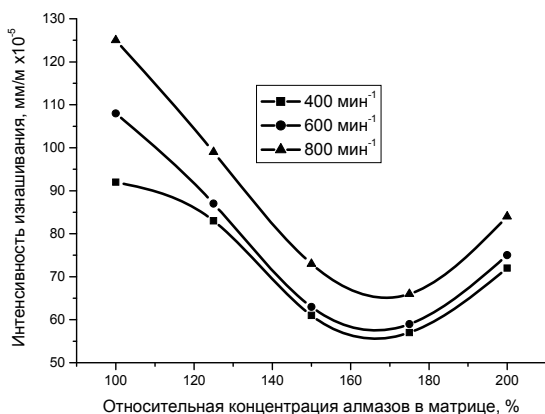


Рис. 2. Зависимость интенсивности изнашивания от концентрации алмазов в матрице импрегнированной коронки при разной частоте вращения

Из-за большой насыщенности рабочего торца алмазами у коронок с 200%-й концентрацией значительная доля энергии затрачивается на внедрение алмазов в горную породу, для чего необходимо увеличивать осевую нагрузку на коронку на 10-15% по сравнению с коронками со 175%-й концентрацией. Вследствие этого при повышении сил взаимодейст-

вия матрицы с горной породой возрастает её интенсивность изнашивания.

**Выводы.** Несмотря на приближенность рассмотренной модели, анализ показывает, что она достаточно реально отражает процессы, происходящие при работе алмазной буровой коронки.

Это свидетельствует о перспективности предложенного подхода для исследования процесса бурения и износа алмазного бурового инструмента и может быть основой для разработки экспертных систем и систем поддержки технологических решений при проектировании оптимальных условий алмазного бурения.

### Список литературы

1. Малов Е.Н. Теория шлифования материалов. – М.: Машиностроение, 1974. – 320 с.
2. Абразивная и алмазная обработка материалов: Справочник / Под ред. д-ра техн. наук А.Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. – 391 с.
3. Байкалов А.К. Введение в теорию шлифования материалов. – К.: Наук. думка, 1978. – 207 с.
4. Доброскок В.Л. Статистическое моделирование распределения размеров зерен в навеске шлифпорошка из сверхтвердых материалов // Високі технології в машинобудуванні: Зб. наук. праць / ХДПУ. – Харків, 1999. – С. 102-106.
5. Ляшко В.А., Потемкин М.М. Изучение характеристики рабочей поверхности алмазного шлифовального круга // Сверхтвердые материалы. – 1996. – № 4. – С. 53-59.
6. Сверхтвердые материалы в геологоразведочном бурении / Зыбинский П.В., Богданов Р.К., Загора А.П., Исонкин А.М. – Донецк: – Норд-Пресс, 2007. – 244 с.
7. Резников А. Н., Гаврилов Г.И. Аппроксимация распределения размеров зерен в алмазных порошках // Синтетические алмазы. – 1974. – № 4.
8. Хастингс Н., Пикок Дж. Справочник по статическим распределениям. – М.: Статистика, 1980.
9. Буровой инструмент для геологоразведочных скважин: Справочник / Под ред. Н.И. Корнилова. – М.: Недра, 1990.
10. Волькенштейн М.В. Энтропия и информация. – М.: Наука, 1986.
11. Исонкин А.М., Богданов Р.К. Влияние микрогеометрии рабочей поверхности импрегнированных буровых коронок на показатели их работоспособности // Научно-технические достижения и передовой опыт в области геологии и разведки недр. – М.: ВИЭМС, 1990.
12. Пономарев П.П., Петрова Г. В. Исследование влияния физико-механических свойств и петрографических особенностей горных пород на износ алмазного инструмента // Совершенствование технических средств ССК и повышение эффективности их внедрения. – Л.: ВИТР, 1987.

Рекомендовано до публікації д.т.н. О.М. Давиденком 27.11.09