

РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

УДК 622.026.3

ОЦЕНКА АБРАЗИВНОСТИ ДИСПЕРСНЫХ ГЕОМАТЕРИАЛОВ ПО ПАРАМЕТРАМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ДЕЗИНТЕГРАЦИИ

А. С. Вознесенский, С. В. Мазеин, В. В. Прищепов, Я. О. Куткин

*Университет науки и технологий “МИСиС”,
E-mail: al48@mail.ru, Ленинский проспект, 4, стр. 1, 119049, г. Москва, Россия*

Рассмотрена оценка абразивности песка при регистрации непрерывной акустической эмиссии во время проведения теста LCPC, предусматривающего дробление вращающейся прямоугольной крыльчаткой пробы массой 500 г в металлическом стакане. Информативными параметрами выступали средние амплитуды спектров сигналов акустической эмиссии, усредненные по ряду реализаций в разные моменты времени дробления и в шести полосах частот от 2 до 500 кГц. Получены коэффициенты уравнений множественной регрессии, позволяющие по усредненным амплитудам спектральных составляющих рассчитывать износ режущего инструмента и показатель абразивности ЛАС для разных времен дробления пробы. Данный метод может использоваться при проходке тоннелей с помощью тоннельных буровых машин, бурении скважин и в других приложениях для оперативного контроля абразивности грунтов и износа режущего инструмента с целью его своевременной замены.

Абразивность, грунт, тоннелепроходческие механизированные комплексы, режущий инструмент, износ

DOI: 10.15372/FTPRPI20240305
EDN: AJJTJ

Абразивность горных пород и грунтов — важный показатель износа и определения ресурса породоразрушающего инструмента. Среди работ отечественных ученых, посвященных данной теме, отметим классические труды, в которых описан способ оценки абразивности по потере веса стержня из стали-серебрянки при трении о горную породу [1–4], а также изданные справочники [5, 6] и статьи [7–10]. Применительно к влиянию абразивности на износ породоразрушающего инструмента тоннелепроходческих механизированных комплексов (ТПМК) можно привести публикации [11–13].

Разработка методов оценки абразивности грунтов и горных пород, как важная часть горной и строительной инженерии, интенсивно ведется и за рубежом [14, 15]. Расчет степени влияния горной породы и грунтов на породоразрушающий инструмент минимизирует аварийные ситуации, снижает простои оборудования, что необходимо при планировании и оптимизации

режимов проходки тоннелей с помощью ТПМК [16, 17]. Наибольшее распространение получили испытания абразивности пород и грунтов в соответствии со стандартами Cerchar и LCPC [18–22]. Пример испытания горных пород на абразивность по методу LCPC приведен в [23], тест Cerchar отражен в руководящих материалах Международного общества геомехаников [24]. По нему определяется показатель оценки абразивности горных пород в куске CAI. По тесту LCPC устанавливается показатель LAC для дисперсных материалов (грунтов и песков).

Одно из направлений развития методов определения абразивности грунтов и горных пород — использование акустического шума, т. е. непрерывной акустической эмиссии, возникающей при разрушении материала [25, 26]. В [27] исследована возможность оценки абразивности горных пород путем обработки во временной, частотной и частотно-временной областях акустических и вибрационных сигналов, генерируемых при бурении. В [28] описана методика, основанная на анализе свойств горных пород с помощью доминирующих частот по уровню звукового давления, генерируемого во время операций алмазного колонкового бурения. В [29, 30] абразивность оценивалась при воздействии на горную породу и ее разрушении с помощью вращающегося индентора, пути измерения мощности акустических колебаний в призабойной зоне с частотой 7–20 кГц и скорости относительного перемещения индентора и горной породы. На основании полученных данных определялась абразивность породы путем отнесения ее к соответствующей группе по абразивности, что позволило повысить оперативность и точность расчетов и спрогнозировать вид износа породоразрушающего инструмента. В то же время зависимость информативных параметров от большого количества сопутствующих факторов требует проведения предварительных исследований для получения достоверных результатов. Для оценки абразивности грунта и износа инструмента тоннелепроходческих механизированных комплексов данный метод не применялся.

Цель настоящей работы — установление связи текущих потерь массы породоразрушающего инструмента и показателя LAC с параметрами акустической эмиссии, возникающей при дезинтеграции проб в лабораторной установке. Предполагается разработать методику испытаний проб песка в установке с сосудом и вращающейся крыльчаткой по тесту LCPC с одновременной регистрацией акустической эмиссии; разработать алгоритм обработки сигналов акустической эмиссии на пробах песка в сосуде с вращающейся крыльчаткой; провести спектрально-временной анализ сигналов акустической эмиссии в зависимости от времени обработки и полосы частот регистрации в диапазоне 2–500 кГц; получить уравнения связи потерь массы крыльчатки и показателя LAC по тесту LCPC с усредненными амплитудами спектральных составляющих в шести полосах частот.

ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ

Эксперименты осуществлялись на пробах песка одного из карьеров Московской области массой 500 г, выдержанных при комнатной температуре и влажности. Модуль крупности песка имел диапазон 2.5–2.7 мм и в соответствии с ГОСТ 8736-2014 по своему размеру относился к крупному [31].

Лабораторный комплекс состоял из испытательной установки для изучения абразивности грунта (рис. 1) и набора специальных сит для проведения ситового анализа в соответствии с ГОСТ 8736-2014. Установка питалась от сети 220 В через вариатор, с его помощью регулировалось число оборотов электромотора. Ось вариатора соединялась с осью, на противоположном

конце которой находилась стальная крыльчатка размером 25×50 мм и толщиной 5 мм. Крыльчатка опускалась в емкость, засыпалась проба. На внешней стороне емкости размещался пьезопреобразователь, подключенный к цифровому запоминающему USB-осциллографу АКИП-72206А. Полученные данные передавались на персональный компьютер.

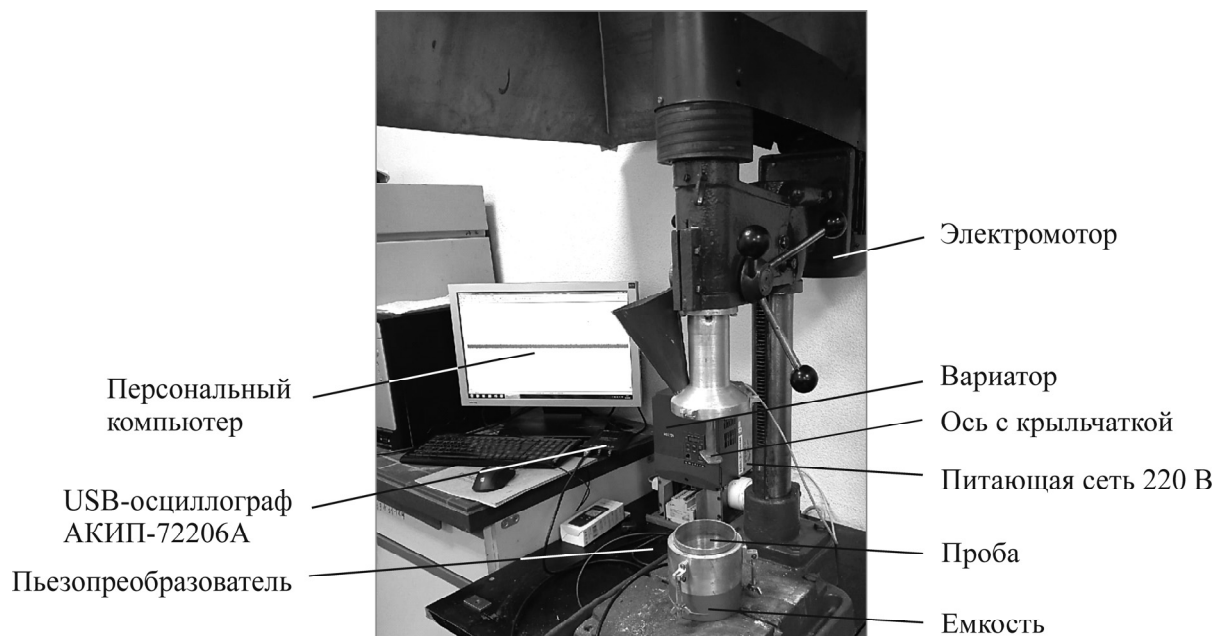


Рис. 1. Лабораторная установка для регистрации акустической эмиссии при дезинтеграции проб горных пород и грунтов с помощью вращающейся крыльчатки

Испытания на лабораторной установке включали ряд операций. Сначала взвешивалась начальная масса крыльчатки, затем включался персональный компьютер и с помощью программного обеспечения Picoscope 6 настраивались режимы USB-осциллографа, позволяющего регистрировать сигналы с частотой оцифровки до 500 Мвыб/с и полосой регистрируемых частот до 50 МГц. Частота дискретизации устанавливалась равной 3.125 МГц, частота напряжения после включения вариатора, питающего электромотор, — 42.50 Гц, что соответствовало частоте вращения крыльчатки 4500 об./мин.

Пьезопреобразователем регистрировались сигналы акустической эмиссии, возникающие при работе установки без пробы и при дроблении пробы, загружаемой в емкость. Сигналы с выхода пьезопреобразователя подавались на вход USB-осциллографа. Регистрация проводилась по ручному запуску оператора блоками по 32 реализации. При объеме 31 254 отсчета и интервале дискретизации 0.32 мкс длительность одной реализации 10 мс, длительность блока из 32 реализаций — 0.32 с (25 оборотов крыльчатки).

Каждая проба испытывалась тремя циклами: первый — 1 мин; второй — 2–3 мин; третий — 4–5 мин. Каждый цикл состоял из двух блоков. Номера блоков регистрации акустического сигнала во времени обозначались индексом i : $i = 0$ — начальное состояние пробы до обработки; $i = 1, 2$ — в начале и конце 1-й мин обработки пробы; $i = 3, 4$ — в начале и конце 2–3-й мин; $i = 5, 6$ — в начале и конце 4–5-й мин. Внутри каждого блока зарегистрировано 32 реализации k .

На рис. 2 приведена последовательность испытаний. Блоки реализаций записывались в начале и конце каждого цикла. Текущий параметр ЛАС пробы на каждом цикле определялся по износу массы крыльчатки. Для промежуточных моментов времени, соответствующих начальной реализации, потери массы равнялись полусумме значений до и после обработки на каждом цикле. Коэффициент абразивности по стандарту LCPC рассчитывался после обработки пробы в течение 5 мин. Масса крыльчатки m измерялась путем взвешивания пробы до обработки и после каждого цикла испытаний. Затем вычислялась потеря массы Δm_i относительно значения в начале испытаний m_0 . По изменению массы крыльчатки рассчитывался текущий ЛАС:

$$\text{LAC}_i = \frac{10^6 \Delta m_i}{M}.$$

Здесь LAC_i — показатель абразивности по LCPC для времени t_i , г/т; M — масса пробы, г; $\Delta m_i = m_0 - m_i$ — потеря массы крыльчатки, г. Абразивность грунта оценивалась по ЛАС для обработки пробы в течение 5 мин.

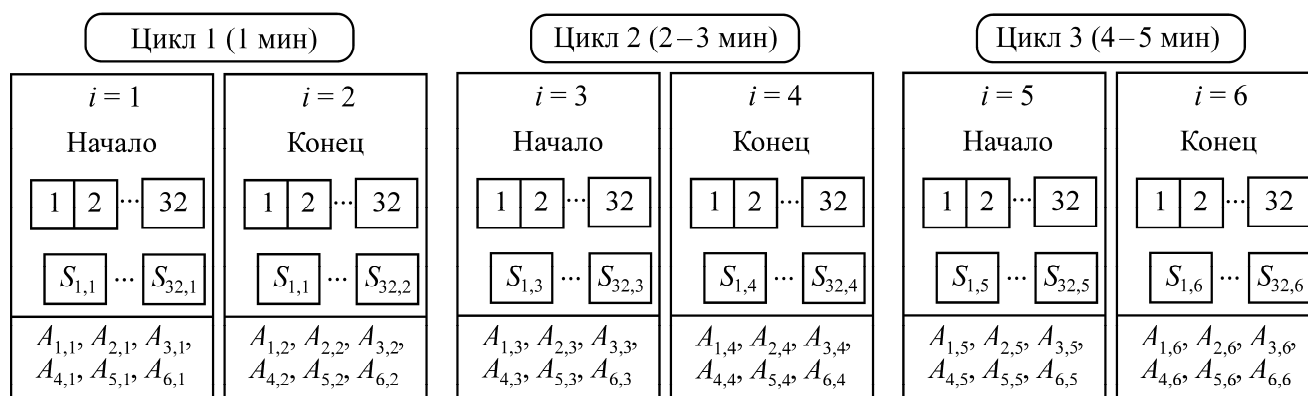


Рис. 2. Последовательность испытаний

Записи обрабатывались в следующей последовательности:

- чтение записи $u_{k,i}(t)$ k -й реализаций в i -м блоке;
- построение графиков сигналов $u_{k,i}(t)$;
- расчет спектров амплитуд сигналов с пробами $S_{k,i}$ и без пробы S_0 ;
- расчет относительных спектров сигналов на 1, 2, 3, 4, 5 мин, нормированных к спектру сигнала без пробы $N_{k,i} = S_{k,i} / S_0$. Для каждого цикла проведены два блока регистраций — в начале и в конце цикла. Общее число зарегистрированных реализаций 192;
- вычисление усредненных амплитуд спектральных составляющих $A_{j,i}$ в заданных шести полосах частот от нижней $f_{j\min}$ до верхней $f_{j\max}$ в соответствии с табл. 1 для каждого блока;
- вывод данных в виде файлов, содержащих усредненные относительные амплитуды $A_{j,i}$ для каждого i -го блока в шести полосах частот j для каждой реализации по времени.

Полученные данные обрабатывались с помощью программного обеспечения MathCAD и Statistica. Результаты представлены как таблица усредненных амплитуд спектральных составляющих размером 6×6 (строки — номер полосы частот, столбцы — номер минуты обработки пробы). Данные изменения массы крыльчатки приведены в виде таблицы с двумя столбцами, первый содержал информацию по износу крыльчатки (г), второй — ЛАС (г/т).

ТАБЛИЦА 1. Диапазон частот для усреднения амплитуд спектральных составляющих, кГц

Полоса частоты	$f_{j \min}$	$f_{j \max}$
1	2	4
2	20	40
3	40	90
4	90	180
5	220	300
6	300	500

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 3 приведена зависимость изменения массы крыльчатки Δm и показателя LAC от времени обработки пробы t . Поскольку эти величины связаны только постоянным коэффициентом, графики имеют одинаковую форму, отличаясь только шкалами вертикальных осей. Обе зависимости аппроксимированы экспонентами вида

$$\Delta m(t) = 0.096 \left(1 - \exp \left(\frac{-t}{2.42} \right) \right), \quad \text{LAC}(t) = 190.78 \left(1 - \exp \left(\frac{-t}{2.42} \right) \right).$$

Абразивность по стандарту LCPC оценивалась для момента $t = 5$ мин (LAC = 167.03 г/т).

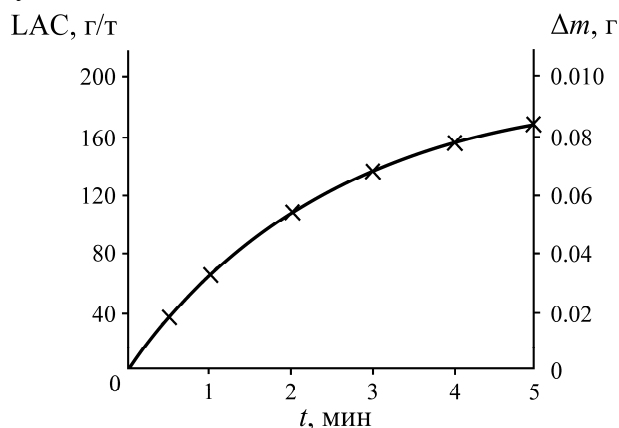


Рис. 3. Изменение массы крыльчатки Δm и LAC от времени обработки t

На рис. 4 приведены примеры осциллограмм сигналов акустической эмиссии, зарегистрированных в разные моменты t . Сигнал без пробы песка (рис. 4а) используется для расчета спектра S_0 , на который делятся амплитуды спектральных составляющих сигналов с пробой. Это дает возможность применения относительных $N_{k,i}$ и усредненных относительных $A_{k,i}$ спектров, не зависящих от спектра возбуждающего сигнала. Особенность такого сигнала помимо акустической эмиссии — наличие низкочастотной составляющей, характеризующей движение ротора, и коротких импульсных помех от работающего частотного преобразователя с высокочастотным спектром, имеющих электрическую природу. На рис. 4б, в показан сигнал акустической эмиссии в начале и конце 1-й мин обработки. В отличие от сигнала на рис. 4а здесь присутствуют дополнительные составляющие, источниками которых являются соударения частиц с крыльчаткой и стенками сосуда. Осциллограмма на рис. 4г зарегистрирована на 3–4-й мин с мощным сигналом, характеризующим взаимодействие грунта с крыльчаткой и стенками сосуда. Его амплитуда значительно больше, чем на рис. 4б, в. На осциллограмме сигнал акустической эмиссии от взаимодействия грунта с крыльчаткой и стенками на 4–5-й мин обработки пробы значительно меньше, так как уменьшились размеры частиц из-за дробления пробы (рис. 4д).

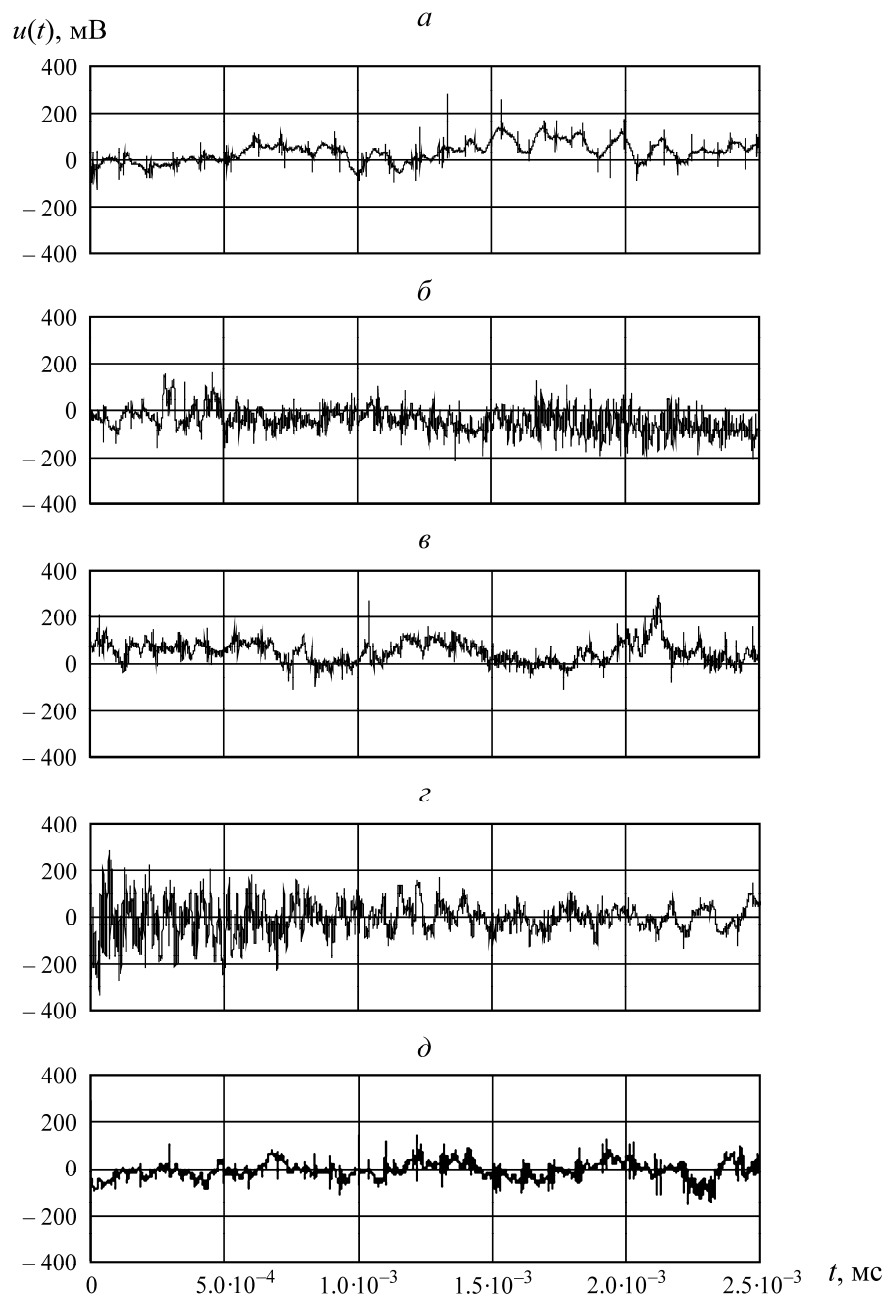


Рис. 4. Примеры реализаций акустических сигналов, зарегистрированных на стадии обработки без пробы (а), в начале и конце 1-й (б, в), 2–3-й (г) и 4–5-й мин (д)

По зарегистрированным реализациям рассчитаны соответствующие спектры с помощью быстрого преобразования Фурье и сглаженных взвешенным средним с использованием гауссова ядра шириной 2000 элементов (рис. 5). Различия на спектрах обусловлены особенностями дробления пробы в разные моменты времени. На рис. 5а спектр характеризует сигнал при работе экспериментальной установки без пробы. При его сравнении с другими спектрами, зарегистрированными с пробой в разные моменты времени, наблюдается более высокий уровень амплитуд спектральных составляющих с пробой, а также отдельные максимумы в определенных полосах частот, в частности в районе 100 кГц. Кроме того, выражен более высокий уровень в начале второй минуты по сравнению со спектрами в другие моменты.

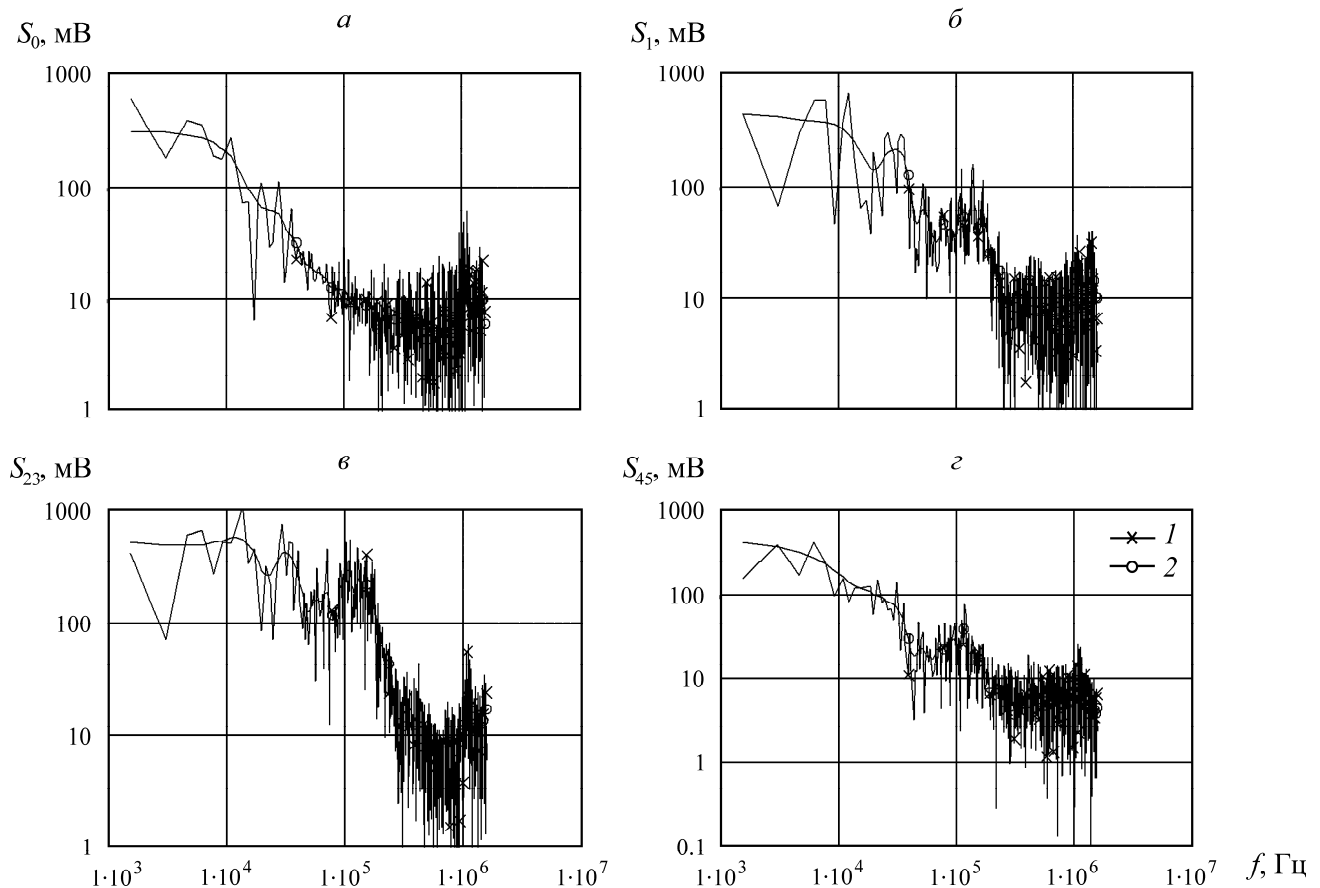


Рис. 5. Примеры исходных (1) и smoothed (2) спектров сигналов без пробы (а), в начале 1-й (б), 2–3-й (в) и 4–5-й мин (г)

Более наглядно smoothed спектры представлены на рис. 6, что позволяет сравнить между собой амплитуды и их формы. Отражены не все спектры, а лишь выборочные, что не нарушает общие закономерности: уменьшение в целом амплитуд спектральных составляющих с увеличением частоты; локальное увеличение амплитуд в диапазоне 80–180 кГц; повышенная амплитуда на 2–3-й мин обработки по сравнению с амплитудами в другие моменты времени.

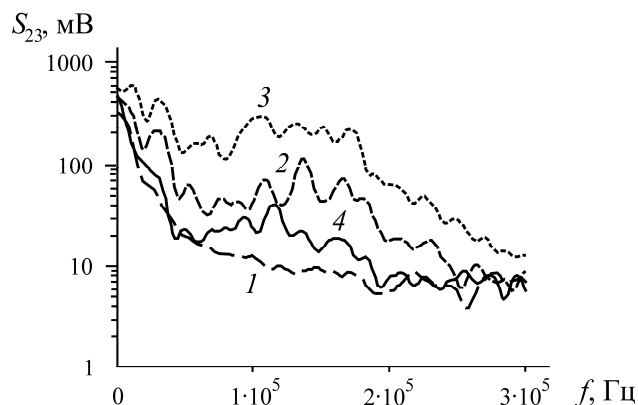


Рис. 6. Примеры спектров, smoothed по частоте скользящим средним: 1 — без пробы; 2, 3, 4 — с пробой в начале 1-й, 3-й, 5-й мин соответственно

На рис. 7 приведены относительные спектры, нормированные к спектру сигнала без пробы S_0 . Его собственные амплитуды равны единице.

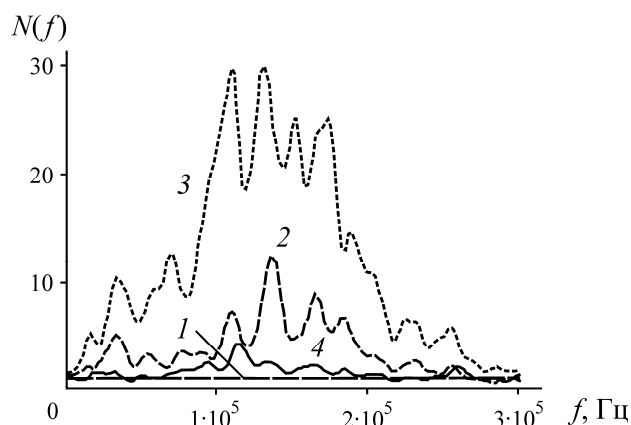


Рис. 7. Примеры сглаженных спектров сигналов при разном времени обработки, нормированных по спектру без пробы S_0 (по одной реализации): 1 — без пробы; 2, 3, 4 — с пробой на 1-й, 2–3-й, 4–5-й мин соответственно

Спектры усреднялись в каждой из шести частотных полос в соответствии с табл. 1. Обобщенные данные по усредненным амплитудам $A_{j,i}$ (j — номер частотной полосы, i — номер момента времени t_i) представлены на рис. 8. Ниже приведены парциальные коэффициенты корреляции между средними относительными амплитудами спектральных составляющих и показателем LAC:

Полоса частот	1	2	3	4	5	6
Коэффициент корреляции R	–0.991	–0.174	–0.373	–0.518	–0.608	–0.273

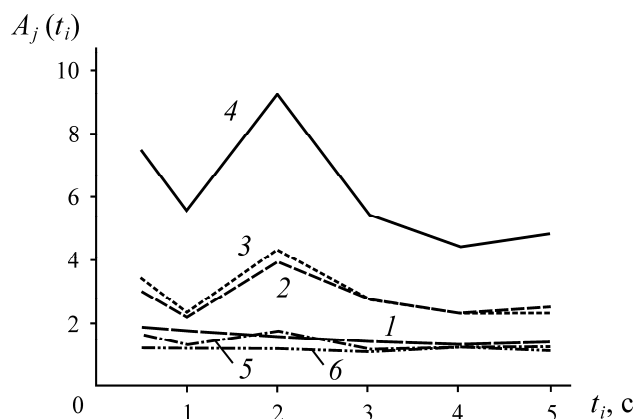


Рис. 8. Усредненные амплитуды спектральных составляющих в зависимости от времени обработки t_i

У всех коэффициентов R наблюдается отрицательный знак, свидетельствуя об уменьшении средних амплитуд сигналов с увеличением времени обработки проб. Максимальный R имеет 1-я полоса частот, после нее наиболее значимы 5-я и 4-я полосы, у 2-й и 3-й полос коэффициенты R незначительны. Не рассматривалась 6-я полоса, так как содержала преимущественно шумовой сигнал, а также спектры сигналов электрических импульсных помех от вариатора, не несущих полезную информацию.

Коэффициенты из табл. 2 использовались для расчета текущих коэффициентов ЛАС:

$$LAC_i = -b_0 + b_1A_1(t_i) + b_2A_2(t_i) + b_3A_3(t_i) + b_4A_4(t_i) + b_5A_5(t_i),$$

где b_j — коэффициенты по соответствующим частотным полосам. Для параметров 1, 4, 5 данное уравнение имеет вид

$$LAC = 439.95 - 246.85A_1(t_i) - 4.12A_4(t_i) + 56.27A_5(t_i),$$

для 1, 2, 3, 5

$$LAC = 322.86 - 203.22A_1(t_i) + 89.29A_2(t_i) - 84.70A_3(t_i) + 71.32A_5(t_i).$$

ТАБЛИЦА 2. Коэффициенты корреляции между ЛАС и средними относительными амплитудами спектральных составляющих, а также коэффициенты линейных уравнений множественной регрессии

Параметр	Полоса частот			
	1, 4, 5	1, 2, 5	1, 2, 4, 5	1, 2, 3, 5
Коэффициент корреляции R	0.995	0.995	0.996	0.999
Среднеквадратическое отклонение	7.81	8.21	10.82	3.81
b_0	439.95	460.11	418.20	322.86
b_1	-246.85	-256.59	-232.39	-203.22
b_2	-4.12	-8.43	11.28	89.29
b_3	56.27	51.28	-8.12	-84.70
b_4	—	—	51.04	71.32

Информативные параметры с наибольшими коэффициентами корреляции не всегда вносили наибольший вклад при их использовании в группе, как это следует из табл. 2. Усредненные амплитуды $A_j(t_i)$, по которым подбирались уравнения связи, рассчитывались на основании большого объема исходных выборок. Однако коэффициенты корреляции R могут иметь завышенные значения ввиду малых объемов завершающих выборок после промежуточной статистической обработки данных для подбора уравнений множественной регрессии, что обуславливает дальнейшую проверку при большем количестве проб.

ВЫВОДЫ

Амплитуды спектральных составляющих акустической эмиссии, возникающей при дезинтеграции проб песчаного грунта в разные моменты времени, связаны с износом крыльчатки прямоугольной формы, вращающейся в рабочей камере лабораторной установки при проведении теста на абразивность по методике LCPC. Получены уравнения связи между показателем ЛАС и усредненными параметрами спектров сигналов акустической эмиссии, позволяющие рассчитывать текущий износ крыльчатки и абразивность грунта. Достоинство рассмотренного метода при его распространении на натурные объекты — оперативность определения текущего износа породоразрушающего инструмента для прогнозирования его замен, недостаток — подверженность большому количеству помеховых факторов (минеральный состав, влажность

грунта, конструкция режущих элементов и режимов работы оборудования и др.). Данный метод можно использовать для лабораторной оценки абразивности грунта, а также на натуральных объектах в качестве дополнения при оперативном контроле износа породоразрушающего инструмента. Направление дальнейших испытаний — аналогичное тестирование на серии проб для получения более обоснованных уравнений связи и совершенствования методик определения абразивности грунта в лабораторных условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шрейнер Л. А., Петрова О. П., Якушев В. П., Портнова А. Т., Садиленко К. М. Механические и абразивные свойства горных пород. — М.: Гостоптехиздат, 1958. — 201 с.
2. Барон Л. И., Кузнецов А. В. Абразивность горных пород при добычании. — М.: Изд-во АН СССР, 1961. — 168 с.
3. Любимов Н. И. Принципы классификации и эффективного разрушения горных пород при разведочном бурении. — М.: Недра, 1967. — 317 с.
4. Спивак А. И. Абразивность горных пород. — М.: Недра, 1972. — 240 с.
5. Любимов Н. И. Классификация горных пород и рациональное применение буровой техники. — М.: Недра, 1977. — 239 с.
6. Справочник по механическим и абразивным свойствам горных пород нефтяных и газовых месторождений / М. Г. Абрамсон, Б. М. Байдюк, В. С. Заварецкий и др. — М.: Недра, 1984. — 207 с.
7. Танайно А. С. К проблеме тестирования горных пород на абразивность // ФТПРПИ. — 2014. — № 6. — С. 87–95.
8. Жабин А. Б., Поляков А. В., Аверин Е. А. О необходимости введения государственного стандарта для определения абразивности горных пород // Уголь. — 2018. — № 11. — С. 86–91.
9. Болобов В. И., Бочков В. С. К влиянию крепости породы на ее абразивные свойства // Горн. оборудование и электромеханика. — 2014. — № 9. — С. 40–43.
10. Болобов В. И., Бочков В. С. Зависимость абразивных свойств горных пород от их крепости // Горн. журн. — 2017. — № 5. — С. 14–16.
11. Мазеин С. В., Вознесенский А. С., Прищепов В. В. Прогноз абразивности грунтов при первичном износе режущего инструмента для строительства тоннелей большого сечения // Сб. тр.: Проектирование, строительство и эксплуатация подземных сооружений транспортного назначения. — 2021. — С. 177–183.
12. Мазеин С. В., Вознесенский А. С., Прищепов В. В. Методы определения абразивности твердых горных пород при механизированной проходке протяженных тоннелей // Геотехника. — 2022. — Т. 14. — № 3. — С. 44–55.
13. Аверин А. Е. Абразивность горных пород как необходимый параметр в оценке рисков применения горнопроходческих машин // ГИАБ. — 2019. — № 3. — С. 184–191.
14. Zhang G., Thuro K., Konietzky H., Menschik F. M., Kaesling H., and Bayerl M. In-situ investigation of drilling performance and bit wear on an electrical drill hammer, Tunnel. Underground Space Technol., 2022, Vol. 122. — 104348.
15. Абу Бакар М. З., Мажид Я. Зависимость параметров буримости от физико-механических свойств горных пород Пакистана // ФТПРПИ. — 2024. — № 1. — С. 96–110.
16. Barzegari G., Uromeihy A., and Zhao J. Parametric study of soil abrasivity for predicting wear issue in TBM tunneling projects, Tunnel. Underground Space Technol., 2015, Vol. 48. — P. 43–57.

17. **Jakobsen P. D., Bruland A., and Dahl F.** Review and assessment of the NTNU / SINTEF Soil Abrasion Test (SATTM) for determination of abrasiveness of soil and soft ground, Tunnel. Underground Space Technol., 2013, Vol. 37. — P. 107–114.
18. **AFNOR.** Détermination du pouvoir abrasif d'une roche. Partie 1: Essai de rayure avec une pointe (NF P 94-430-1), Paris, 2000.
19. **ASTM.** Standard test method for laboratory determination of abrasiveness of rock using the CERCHAR method, Designation, D7625-10, 2010.
20. **P18-579.** Granulats — Détermination des coefficients d'abrasivité et de broyabilité, Février, 2013.
21. **Standard NF P18-579:2013-02-09.** Aggregate — Abrasiveness and grindability tests (German title Gesteinskörnungen — Bestimmung der Koeffizienten der Abrasivität und Mahlbarkeit), Publication date 2013-02-09, Original language French. — 12 p.
22. **Käsling H. and Thuro K.** Determining rock abrasivity in the laboratory, Rock Mech. Civ. Env. Eng., Proc. of the European Rock Mech. Symp., EUROCK 2010, 2010. — P. 425–428.
23. **Abu Bakar M. Z., Majeed Y., Rashid A., and Ahmed F.** Wear mechanisms of LCPC rock abrasivity test impellers of materials equivalent to TBM cutter head face tools, Tunnel. Underground Space Technol., 2021, Vol. 116. — 104122.
24. **Alber M., Yarali O., Dahl F., Bruland A., Kaesling H., Michalakopoulos T., Cardu M., Hagan P., Aydin H., and Ozarslan A.** ISRM suggested method for determining the abrasivity of rock by the CERCHAR abrasivity test, Rock Mech. Rock Eng., 2014, Vol. 47. — P. 261–266.
25. **ГОСТ Р 55045-2012.** Техническая диагностика. Акустико-эмиссионная диагностика. Термины, определения и обозначения. — М.: Стандартинформ, 2013. — 12 с.
26. **ГОСТ Р 52727-2007.** Техническая диагностика. Акустико-эмиссионная диагностика. Общие требования. — М.: Стандартинформ, 2007. — 12 с.
27. **Esfahani M. K., Bagherpour R., Sadeghisorkhani H., and Jalalian M. H.** A new look at hard rock abrasivity evaluation using acoustic emission technique (AET), Rock Mech. Rock Eng., 2022, Vol. 55, No. 4. — P. 2425–2443.
28. **Tripathi R., Srivastava M., Hloch S., Adamčík P., Chattopadhyaya S., and Das A. K.** Monitoring of acoustic emission during the disintegration of rock, Procedia Eng., 2016, Vol. 149. — P. 481–488.
29. **Пат. RU 2 257 564 С2 РФ, МПК G01N 3/56.** Способ определения абразивности горных пород / А. Г. Архипов, И. М. Гинзбург, Н. И. Корнилов, В. К. Ивашев // Оpubл. в БИ. — 2005. — № 21. — 8 с.
30. **Архипов А. Г.** Определение прочности и абразивности горных пород по спектру акустического шума разрушения при бурении и резании // Зап. Горн. ин-та. — 2001. — Т. 148. — № 2. — С. 123–127.
31. **ГОСТ 8736-2014.** Песок для строительных работ. Технические условия. — М.: Стандартинформ, 2019. — 11 с.

Поступила в редакцию 19/IV 2024

После доработки 02/V 2024

Принята к публикации 17/V 2024