

*И. М. Сердюк<sup>1</sup>✉, С. В. Сердюков<sup>1</sup>*

## **Автоколебания сжатия при деформировании рыхлых пород**

<sup>1</sup>Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,  
г. Новосибирск, Российская Федерация  
e-mail: ken04588@gmail.com

**Аннотация.** Данная работа посвящена выявлению динамических признаков критического состояния породного массива перед разрушением для разработки методов оперативного прогноза горных ударов. В работе представлены результаты экспериментальных работ. Показаны динамические признаки, которые проявляются при моделировании породного контура. Также показана связь акустической эмиссии с возникающими колебаниями напряжений на стадии предразрушения

**Ключевые слова:** физическое моделирование, акустическая эмиссия, разрушение горных пород, мониторинг напряженно-деформируемого состояния

*I. M. Serdyuk<sup>1</sup>✉, S. V. Serdyukov<sup>1</sup>*

## **Self-oscillation of compression during deformation of loose rocks**

<sup>1</sup>Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,  
Novosibirsk, Russian Federation  
e-mail: ken04588@gmail.com

**Abstract.** This work is devoted to the identification of dynamic signs of the critical condition of a rock mass before destruction in order to develop methods for the operational prediction of rock impacts. The paper presents the results of experimental work. The dynamic features that appear during the modeling of the rock contour are shown. The relationship of acoustic emission with the resulting voltage fluctuations at the stage of pre-destruction is also shown..

**Keywords:** physical modeling, acoustic emission, rock destruction, stress-strain state monitoring

### ***Введение***

Подземная разработка месторождений полезных ископаемых остаётся одним из ключевых способов добычи ресурсов, особенно в условиях глубоких залеганий, сложных геологических условий или высокой ценности минерального сырья. Однако данный метод сопряжён с рядом технических, технологических, экологических и организационно-экономических проблем, которые существенно влияют на эффективность и безопасность горных работ. Одной из главных проблем при подземной добыче являются геомеханические факторы, связанные с нестабильностью породного массива. С увеличением глубины разработки возрастает горное давление, что приводит к деформации выработок, обрушениям кровли и стенок, а также повышенному энерговыделению в виде тектонических напряжений. Особенно сложными считаются участки с наличием разломов, складчатых зон, тектонических нарушений и ослабленных пород. На се-

годняшний день основными подходами к оценке состояния горных выработок являются измерение деформаций породного массива, построение упрощённых моделей геосреды с учётом связи между напряжениями и деформациями, а также определение упругих и прочностных характеристик горных пород на основе лабораторных испытаний керна и инструментальных замеров напряжений разрушающимися методами. Вместе с тем, существующие методики обладают рядом существенных ограничений. Таким образом, современные подходы к контролю состояния горных выработок требуют дальнейшего совершенствования с целью повышения адекватности и информативности геомеханических моделей, а также разработки более эффективных методов оперативного и долгосрочного мониторинга напряжённо-деформированного состояния массива [Zhang, 2017; Wang, 2021; LI, 2017 ].

### ***Методы и материалы***

Для проведения экспериментальных работ по физическому моделированию разрушения породного массива в качестве испытуемого образца была выбрана рыхлая горная порода – супесь. Подготовленные образцы имели различные фракции песчаных частиц: <0,3 мм, 0,3 – 0,6 мм, 0,6 – 0,9 мм. Выбор данного материала для проведения экспериментальных работ обусловлен тем, что в реальных условиях разрабатываемый массив горных пород имеет не однородную структуру, а блоковую (Ракишев, 2018). Испытуемый образец представляет собой цилиндр с диаметром 50 мм и высотой 100 мм. Эксперименты проводились с различными боковыми обжимами 0, 100, 500, 1000 и 1500 кПа, такие обжимы позволяли моделировать состояние массива в близи породного контура и на удалении от него. Моделирование разрушения проходило с постоянной скоростью деформации – 1 мм/мин. На рисунке 1 показаны основные направления нагружения, а также расположение измерительных датчиков.

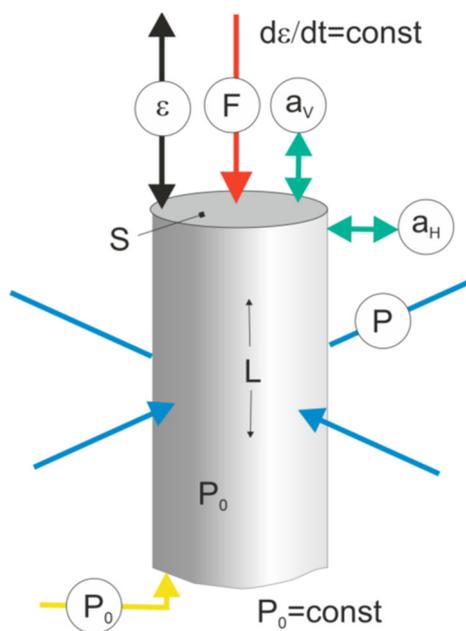


Рис. 1 Направления нагружения и расположение датчиков в эксперименте

## Экспериментальные результаты

Моделирование породного массива позволяет проводить различные испытания и исследования в лабораторных условиях, получать достоверные данные о механических свойствах пород, их поведении при воздействии различных факторов. Это помогает оптимизировать процессы разработки месторождений полезных ископаемых и строительства инженерных объектов подземным способом, снижать риски и обеспечивать безопасность ведения работ.

Организация представленного в работе лабораторного стенда позволяет проводить серии экспериментальных исследований распространения микросейсмических волн на поверхности протяженного интервала цилиндрической полости, но также позволяет оперативно размещать и корректировать состав генерирующей и регистрирующей аппаратуры.

В ходе обработки полученных экспериментальных данных были построены графики «нагружения-деформации» для каждой серии эксперимента. На рисунке 2 приведен график «нагружения-деформации» в условиях отсутствия бокового обжима образца с размером фракции  $<0.3$  мм.

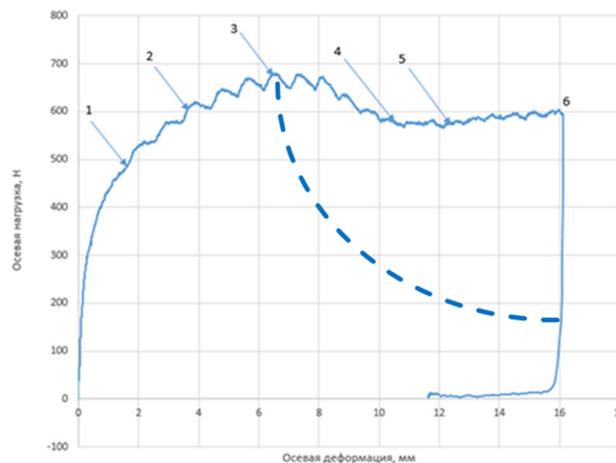


Рис. 2 График «нагружение-деформация» при боковом обжатии образца 0 кПа

На восходящей ветви графика отчетливо видны стадии деформирования, а именно упругий и вязкоупругий участок, пластический участок с проскальзыванием при стабильной нагрузке и, наконец, участок колебаний нагрузки перед разрушением. При нагружении боковой границы модели давлениями от 100 до 500 кПа колебания нагрузки перед разрушением сохраняются, но ослабевают с ростом величины бокового обжима. В условиях большого бокового обжима, который составляет 1500 кПа для графиков «нагружение-деформация» характерно полное отсутствие колебаний вне зависимости от фракции, которая участвовала в эксперименте.

По мимо регистрации нагружения и деформации измерительная система регистрирует акустическое излучение посредством пьезокерамических преобразователей. Участки критического состояния среды характеризуется непрерывным

интенсивным излучением с низкочастотными вариациями мощности. Наблюдается рост амплитуды вариаций с приближением к разрушению. В моменты перехода одной стадии деформирования в другую фиксируются спады акустической эмиссии.

Схожая картина наблюдается при образовании трещин в ледяных покровах Арктики [Богородский, 1980; Смирнов, 1987]. Также при исследовании подготовки землетрясений в Байкальской зоне было установлено, что на этапе форшоков характерны нарастающие колебания деформаций и рост низкочастотных вариаций сейсмического сигнала [Борняков, 2021, 2024; Добрынина, 2023]

### ***Выводы***

Перед разрушением модели породного массива, деформируемого с постоянной скоростью, возможно возникновение квазигармонических колебаний сжатия среды. Условием их генерирования является наличие породного контура (граница между массивом горных пород и внутренней полостью горной выработки). Интенсивность колебаний уменьшается с увеличением нагружения породного контура. Квазигармонические колебания напряженного состояния породного массива в окрестности горных выработок, камер – это оперативный индикатор критического состояния среды, близости к разрушению. Непрерывная генерация интенсивного акустического излучения с нарастанием во времени амплитуды низкочастотных вариаций мощности – это оперативный индикатор критического состояния среды, близости к разрушению.

### ***Благодарности***

Исследование выполнено в рамках Госзадания, номер государственной регистрации 121052500138-4 (FWNZ-2021-0001).

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Борняков С. А. и др. Быстринское землетрясение в Южном Прибайкалье (21.09. 2020 г.,  $M W= 5.4$ ): общая характеристика, основные параметры и деформационные признаки перехода очага в мета-нестабильное состояние // Доклады российской академии наук. Науки о Земле. – 2021. – Т. 498. – №. 1. – С. 86-90.
2. Борняков С. А., Каримова А. А., Салко Д. В. и др. // Геосистемы переходных зон. – 2024. – Т. 8, № 4. – С. 313-327.10.
3. Добрынина А. А. и др. АНОМАЛИИ МИКРОСЕЙСМИЧЕСКИХ ШУМОВ КАК ПРЕДВЕСТНИК ОПАСНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ // ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ. – 2023. – С. 384.
4. LI N., WANG E., GE M. Microseismic monitoring technique and its applications at coal mines: Present status and future prospects // Journal of china coal society. – 2017. – Т. 42. – №. S1. – С. 83-96.
5. Wang X. et al. Failure mechanism of fractured rock and associated acoustic behaviors under different loading rates // Engineering Fracture Mechanics. – 2021. – Т. 247. – С. 107674.
6. Zhang Y. et al. Acoustic emission characteristics and failure mechanism of fractured rock under different loading rates // Shock and Vibration. – 2017. – Т. 2017. – №. 1. – С. 5387459.

© И. М. Сердюк, С. В. Сердюков, 2025