

*Л. А. Рыбалкин<sup>1\*</sup>, И. М. Сердюк<sup>1</sup>, Р. А. Ефремов<sup>1</sup>*

## **Развитие методов и технических средств создания искусственных образцов для моделирования слоистого породного массива**

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск,  
Российская Федерация  
\*e-mail: Leonid.Rybalkin@gmail.com

**Аннотация.** Данная работа рассматривает проблему развития методов и технических средств для создания многослойных моделей породных массивов. В ходе исследования были разработаны технические средства, которые позволяют поэтапно формировать слоистые структуры внутри одной модели с контролем углов падения и простирания как одного, так и нескольких слоев. В работе отмечается, что использование простых моделей и упрощенных слоистых моделей приводит к снижению достоверности полученных лабораторных данных. В работе демонстрируется возможность формирования слоистых моделей с различными типами границ путем предварительной обработки поверхности нижележащего слоя. Это позволяет создавать модели с разнообразными геологическими характеристиками и улучшает точность моделирования породных массивов.

**Ключевые слова:** массив горных пород, физическое моделирование, слоисто-неоднородные среды, трещиноватые породы, механические и фильтрационные свойства

*L. A. Rybalkin<sup>1\*</sup>, I. M. Serdyuk<sup>1</sup>, R. A. Efremov<sup>1</sup>*

## **Development of methods and technical means of creating artificial samples for the modeling of a layered rock mass**

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

**Abstract.** The problem of developing methods and technical means, that are used for the creation of multilayer models of rock masses, is addressed in this article. Technical means have been developed for the implementation of the stage-by-stage formation of layered structures within one model with the possibility of controlling the dip and strike angles of both one and several layers. The article states, that the use of simple models and simplified layered models leads to a decrease in the reliability of the obtained laboratory data. The possibilities of the formation of layered models with different types of boundaries obtained due to preliminary processing of the surface of the underlying layer are demonstrated, thus, providing an opportunity to create models with a variety of geological characteristics and improve the accuracy of rock mass modeling.

**Keywords:** hydraulic fracturing, poroelastic medium, crack growth, cavity in medium, extended finite element method

### ***Введение***

Разработка месторождений полезных ископаемых и строительство подземных инженерных объектов требуют мониторинга геомеханического состояния окружающего породного массива. Это необходимо для корректировки разра-

ботки пластов, применения интенсификационных методик, снижения негативных явлений и обновления данных о состоянии стенок и сводов подземных объектов с целью обеспечения безопасности работ.

Наиболее приоритетным является получение данных о геомеханическом состоянии массива пород в натуральных условиях (*in situ*), однако из-за технических ограничений и требований безопасности, не всегда возможно своевременно и надежно получить необходимую информацию в процессе работы.

Применение модельных расчетов и апробация на искусственных физических образцах позволяют с достаточной точностью воссоздать участки породного массива для проведения исследований. Это помогает установить зависимости механических свойств при изменении условий нагружения, изучить влияние различных факторов на состояние массива, а также протестировать различные методы крепления и устойчивости подземных объектов. Полученные результаты могут быть использованы для корректировки горных работ, применения методов стимулирования процессов добычи и операций по креплению массива для обеспечения безопасности.

В данной работе рассматривается создание искусственных образцов для моделирования породного массива с возможностью синтеза слоистой структуры различного характера. Это позволит получать более достоверные оценки при проведении различных испытаний и воздействий в лабораторных условиях.

### *Применение искусственных моделей*

Создание искусственных образцов породного массива для моделирования в лабораторных условиях требует соблюдения определенных стандартов и условий, чтобы обеспечить максимальное сходство с естественными породными формациями для высокой достоверности результатов. Необходимо учитывать особенности конкретного месторождения и его геологических условий при выборе метода создания искусственных образцов. Примером применения подобных моделей может служить работы по исследованию неоднородности строения междукамерных целиков [1, 2] при камерной системе разработки, с естественным поддержанием очистного пространства при помощи поддерживающих междукамерных целиков.

Основным является выбор подходящих материалов, таких как цементные и пескобетонные смеси, полимеры, гипсы, смолы или непосредственно куски горных пород. Определение физико-механических свойств полученных образцов осуществляют в соответствии с действующими ГОСТами [3, 4]

Наиболее распространенными материалами для создания моделей являются цементные и пескобетонные смеси. Применение такого рода составов помогают создавать не только тестовые образцы стандартных размеров, но объемные модели с возможностью размещения различных гидравлических узлов и набор приемной аппаратуры [5]. Данные модели зачастую используются для моделирования поведения трещины гидроразрыва в задачах разупрочнения кровли горной породы [6, 7], дегазации угольных пластов [8], решения задачи по определению напряженного состояния среды [9] и т.д.

Применение отдельных кусков горных пород в единичном экземпляре [10] или в виде набора слоев в одной модели позволяет получить более приближенную к натурным условиям модель, однако недостатком данного подхода является проблема сплошного скрепления слоев между собой. Поэтому большинство исследований проводятся на стандартном керновом материале, или на объемных образцах горных пород, заливаемых в специальной форме цементным раствором для предотвращения рассыпания и растрескивания в ходе исследований. [11]

### *Синтез многослойных моделей*

Создание слоистых моделей сопряжено с рядом особенностей, и использование метода заливки может сочетаться с другими подходами для изменения структуры и геометрических особенностей модели. Один из возможных способов включает фрезеровку с помощью подвижных пилящих элементов, ориентированных в разных плоскостях, с последующим заполнением твердеющими составами. Однако такой подход требует больших трудозатрат и не применим при наличии множества тонких и слабо скрепленных слоев.

Отсутствие различия в углах падения и простираения слоев значительно упрощает процесс создания модели среды [12]. Однако, когда в породном массиве имеется один или несколько наклонных слоев малой мощности, возникает необходимость упрощения модели, заменой группы наклонных слоев одним горизонтальным. Это может существенно исказить соотношение реальных значений геомеханических показателей массива с результатами испытаний.

Применение твердеющих составов на основе бетона или пескоцементных смесей позволяет формировать связанные между собой слои нужной формы и размеров путем заполнения после начала схватывания нижележащего слоя. Полная прочность таких составов достигается через несколько недель, и формирование слоев с явной границей между ними может быть выполнено после некоторого времени (например, часа) после заливки состава [13].

Нанесение составов, предотвращающих контакт между уже отвержденным слоем и готовой смесью, способствует образованию границы в виде микротрещины [14]. Такой подход необходим для имитации слоистого и трещиноватого массива с повышенной анизотропией фильтрационных и механических свойств.

Создание моделей слоистых сред с возможностью изменения углов падения и простираения слоев позволит более качественно проводить лабораторные исследования без вынужденного упрощения моделей и, следовательно, повысит достоверность получаемых результатов.

### *Технические средства создания слоистых моделей*

В отличие от заливки сплошных моделей, где нет необходимости изменять положение формы в пространстве, формирование разнонаправленных слоев требует контроля наклона формы заливки в нескольких плоскостях и ее долговременной фиксации. Еще одной особенностью является необходимость доступа к области заливки при наклонной форме.

На рисунке 1 показана подвижная платформа для создания слоистых моделей в кубической форме. В собранном состоянии платформа жестко закрепляется нижним листом на устойчивом основании, далее на нее устанавливается разборная кубическая форма.

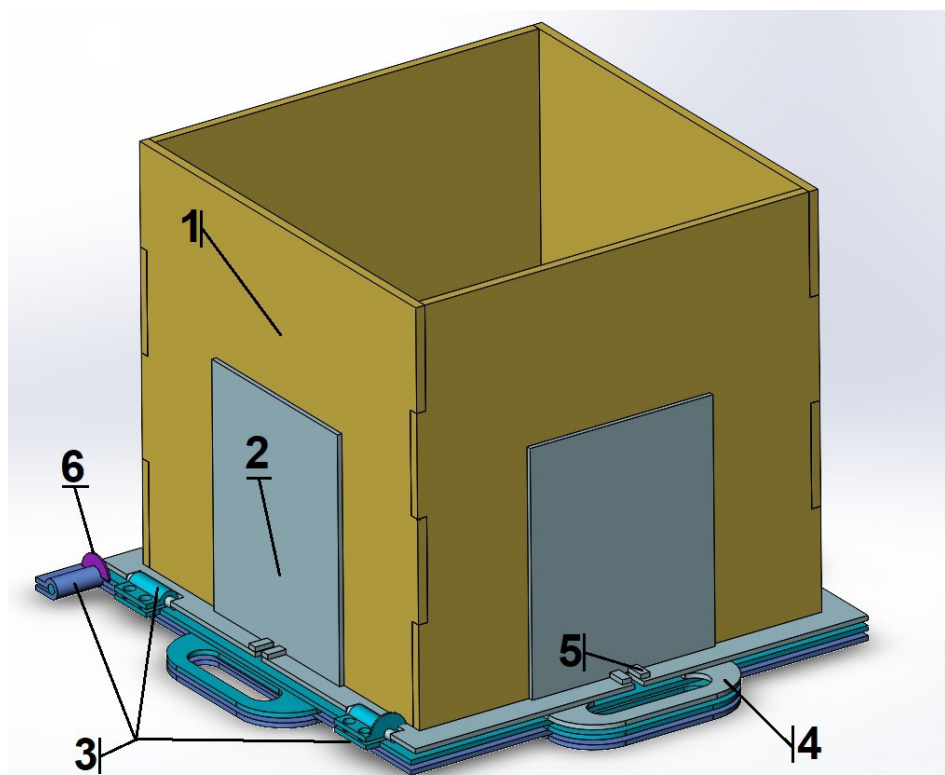


Рис. 1. Платформа для создания слоистых моделей: 1 – разборная форма; 2 – подпорные пластины; 3 – механизмы фиксации угла наклона; 4 – ручки; 5 – регулировка смещения подпорной пластины; 6 – лимб угла наклона

Последовательность и геометрические параметры слоев, скорость их формирования и необходимость обработки границ определяются на основе полученных полевых данных о структуре массива или компьютерной модели исследуемого объекта. При необходимости изменения угла падения или простираения слоев определенный лист платформы наклоняется на требуемый угол, контролируемый по лимбу, и фиксируется болтами.

При заливке моделей со сложным геометрическим расположением слоев внутри формы устанавливаются специальные перегородки, чтобы предотвратить перетекание смеси за пределы слоев (рис. 3).

Если имеется несколько групп слоев одинаковой геометрической формы, но разделенных внутри модели, следует проводить пошаговую заливку каждой группы отдельно, чтобы избежать отслоения слоев от стенок формы при изменении ее положения.

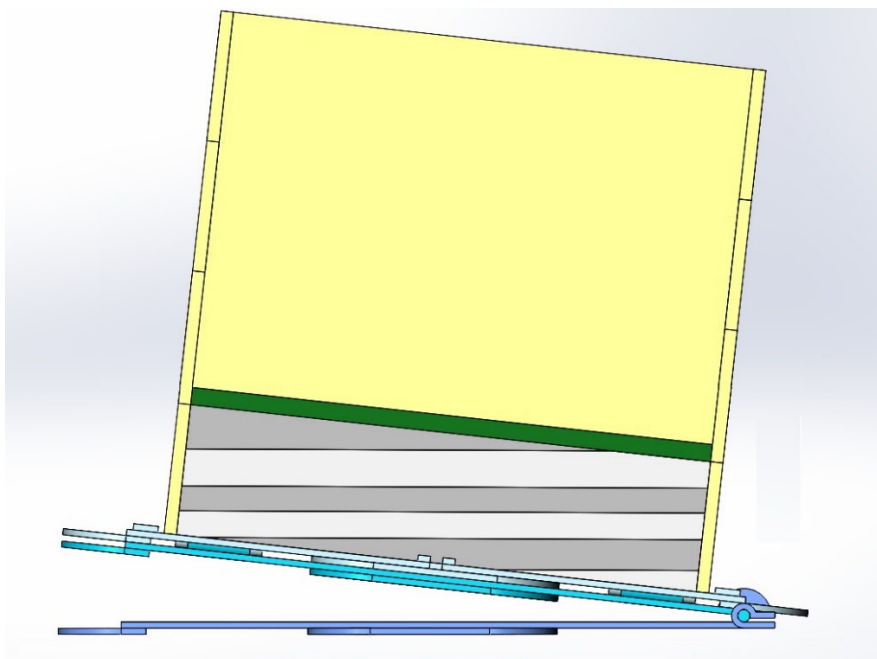


Рис. 2. Использование специальной перегородки при создании нескольких параллельных слоев

### ***Выводы***

Создание и использование искусственных образцов для моделирования породного массива позволяет проводить различные испытания и исследования в лабораторных условиях, получать достоверные данные о механических свойствах породы, ее 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. Развитие методов создания слоистых моделей породного массива позволит повысить достоверность проводимых исследований и увеличить качество получаемых результатов.

### ***Благодарности***

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

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Tziallas GP, Saroglou H, Tsiambaos G. Determination of mechanical properties of flysch using laboratory methods // *Engineering Geology* 2013. 166: p.81–89.
2. Liang W. [and others] Experimental investigation of mechanical properties of bedded salt rock // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 2007. 44(3). p. 400-411.
3. ГОСТ 21153.2-84 Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии. М.: Изд-во стандартов, 2001. 10 с.
4. ГОСТ 28985-91 Породы горные. Методы определения деформационных характеристик при одноосном сжатии. М.: Изд-во стандартов, 2004. 19 с.
5. Serdyukov S.V., Azarov A.V., Rybalkin L.A., Patutin A.V. Shapes of hydraulic fractures in the neighborhood of cylindrical cavity, 2021, no. 6, pp. 72 –84 [Сердюков С.В., Азаров А.В., Ры-

балкин Л.А., Патутин А.В. О форме трещин гидроразрыва породного массива в окрестности цилиндрической полости // ФТРПИ. — 2021. — № 6. — С. 72 – 84].

6. Леконцев Ю. М., Сажин П. В. Технология направленного гидроразрыва пород для управления трудно обрушающимися кровлями в очистных забоях и дегазации угольных пластов // ФТПРПИ. – 2014. – № 5. – С. 137–143.

7. Yang, J., Liu, B., Bian, W., Chen, K., Wang, H., Cao, C. Application Cumulative Tensile Explosions for Roof Cutting in Chinese Underground Coal Mines // Archives of Mining Sciences. – 2021. – Vol. 66. – №. 3. – P. 421–435.

8. Леконцев Ю. М., Сажин П. В., Темиряева О. А. Дегазация угольного пласта методом поинтервального гидроразрыва и оборудование для его реализации // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2018. – Т. 5. – № 2. – С. 89–92.

9. Сердюков С. В., Курленя М. В., Патутин А. В. К вопросу об измерении напряжений в породном массиве методом гидроразрыва // ФТПРПИ. – 2016. – №. 6. – С. 6–14.

10. Zhongwei Huang, Shikun Zhang, Ruiyue Yang, Xiaoguang Wu, Ran Li, Hongyuan Zhang, Pengpeng Hung A review of liquid nitrogen fracturing technology // Fuel. – Vol. 266. – 2020. – 117040. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117040>.

11. Cai C, Gao F, Yang Y. The effect of liquid nitrogen cooling on coal cracking and mechanical properties // Energy Exploration & Exploitation. – 2018. – 36(6). – P. 1609-1628. doi:10.1177/0144598718766630.

12. Ударцев, А. А. Экспериментальные исследования влияния толщины ослабленного слоя на прочность слоистых образцов // Горное эхо. – 2021. – № 3(84). – С. 34-38. DOI 10.7242/echo.2021.3.7.

13. Сердюков С. В., Рыбалкин Л.А., Шилова Т.В. Синтез материалов с выраженной анизотропией механических и фильтрационных свойств для физического моделирования в геомеханике // Физическая мезо механика. Материалы с многоуровневой иерархически организованной структурой и интеллектуальные производственные технологии: Тезисы международной конференции, Томск, 06–10 сентября 2021 года. – Томск: Национальный исследовательский Томский государственный университет, 2021. – С. 286-287. DOI 10.17223/978-5-907442-03-0-2021-179.

14. Сердюков С. В., Рыбалкин Л. А., Дробчик А. Н. [и др.] Лабораторный стенд для моделирования гидравлического разрыва массива трещиноватых пород // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2020. – № 6. – С. 193-201. – DOI 10.15372/FTPRPI20200618.

© Л. А. Рыбалкин, И. М. Сердюк, Р. А. Ефремов, 2023