

Рисунок 1 – Влияние изменения отношений модулей упругости E_r/E_0 внутреннего покрытия трубы на скорость волны C

Анализ результатов расчета влияния изменения отношений модулей упругости E_r/E_0 , представленных по различным методикам расчета скорости волны при гидроударе при течении жидкости в двухслойных трубах из композитов, показал хорошее совпадение (см. рисунок 1). Увеличение модуля упругости E_0 (усиление волокон армирования) ведет к увеличению скорости волны, соответственно, при уменьшении происходит гашение скорости волны. Следует также отметить, что в [2] предложен расчет скорости волны для ламинированных труб с использованием композиционной ленты одинаковой толщины в качестве покрытия.

Список литературы

- 1 **Можаровский, В. В.** Скорость волны при гидроударе и напряженно-деформированное состояние слоистых футерованных труб из ортотропных материалов / В. В. Можаровский, С. В. Киргинцева // Проблемы физики, математики и техники. – 2022. – № 2 (51). – С. 44–51.
- 2 **Rege, K.** Water Hammer Induced Vibration of Steel Pipelines Repaired with FRP Composites : MASTER’S THESIS / K. Rege. – University of Stavanger, 2016. – 82 p.
- 3 **İsmail Yasin Sülü.** Stress Analysis of Multi-Layered Hybrid Composite Pipes Subjected to Internal Pressure / İsmail Yasin Sülü // International Journal of Engineering & Applied Sciences (IJEAS). – 2016. – Vol. 8, is. 4. – P. 87–98.

539.3+51-74; 622.2

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОТРАБОТКИ ПОРОДНОГО МАССИВА ШИРОКИМ ОЧИСТНЫМ ЗАБОЕМ С ОБРУШЕНИЕМ КРОВЛИ

*Н. М. КЛИМКОВИЧ, М. А. НИКОЛАЙЧИК, М. А. ЖУРАВКОВ
Белорусский государственный университет, г. Минск*

Отработка массива горных пород широким очистным забоем (лавой) является наиболее эффективным с точки зрения экономических показателей добычи, но в то же время наиболее ответственным способом отработки породного массива, который применяется предприятиями горнодобывающего комплекса Республики Беларусь. Рассматриваемый способ ведения горных работ подразумевает отработку породного массива широким (несколько сотен метров) очистным забоем на большие расстояния (несколько километров). При этом мощность обрабатываемого столба полезного ископаемого составляет не более 2,5 м. Кроме того, при продвижении горных работ, в кровле отработанного пространства образуются системы трещин, что приводит к образованию блоков и их обрушению в отработанное пространство [1].

В настоящее время наиболее эффективными методами моделирования процесса отработки породного массива лавой являются численные методы из класса дискретных, например, метод дискретных элементов (далее – МДЭ) [2]. Для решения рассматриваемой задачи континуальные численные методы

(например, метод конечных элементов (далее – МКЭ)) используются реже. Кроме того, континуальные методы применяются в основном для моделирования не самого процесса, а конечного результата обработки породного массива, т. е. влияния полностью пройденного обработанного пространства на напряженно-деформированное состояние (далее – НДС) подработанной породной толщи без учета нарушения сплошности породных масс в окрестности обработанного пространства [3].

Для валидации рассматриваемой задачи обычно используют данные замеров за сдвигами и оседаниями земной поверхности над обработанным пространством. Таким образом, возникает необходимость моделирования НДС подработанного породного массива от участков ведения горных работ до земной поверхности. В этом случае при наличии достаточно большого количества дискретных элементов, применение МДЭ является более затратным (в плане вычислительных ресурсов) чем применение МКЭ [4].

Таким образом, в данной работе предлагается рассмотреть моделирование процесса обработки породного массива широким очистным забоем при помощи МКЭ. При этом для моделирования поведения породных масс в зонах нарушения сплошности массива предлагается использовать специальные блочные элементы в виде систем упругих связей постоянной жесткости.

В ходе исследования рассматривался породный массив, состоящий из трех обобщенных слоев: слоя осадочных пород (приповерхностный слой), слоя глинисто-мергелистой толщи и соленосной толщи. Горные работы велись на глубине 750 м. Длина конечного обработанного пространства (в направлении движения забоя) составляла 700 м, ширина – 200 м, мощность обрабатываемого пласта полезного ископаемого – 2,5 м, шаг обработки породного массива – 30 м.

Трехмерное численное моделирование рассматриваемой задачи выполнялось на базе метода конечных элементов. Каждый слой породного массива рассматривался как однородная изотропная упругая среда. Алгоритм компьютерного моделирования состоял из 25 расчетных шагов.

На *первом* этапе моделирования определялось начальное (естественное) напряженное состояние породного массива.

На *последующих* 24 этапах моделирования определялось НДС породного массива при ведении очистных работ. На данных этапах моделирования длина обработанного пространства (в направлении движения забоя) рассчитывалась как $30(i - 1)$, где $i \in [1, 25]$ – номер текущего этапа моделирования. Кроме того, на каждом этапе моделирования массив горных пород исследовался по комплексной системе критериев предельного состояния горных пород (1) для определения областей нарушения сплошности среды в окрестности обработанного пространства.

$$\left[\begin{array}{ll} [\sigma_1 \geq \sigma_{\text{ext}}, \varepsilon_1 \geq \varepsilon_{\text{ext}}] & \text{if } \mu \in [-1, -0,5) \\ \left[\begin{array}{l} (\sigma_1 - \sigma_3)^2 \geq -8 \cdot \sigma_{\text{ext}} \cdot (\sigma_1 + \sigma_3) \\ \sigma_1 \geq \sigma_{\text{ext}} \end{array} \right] \text{ if } \sigma_3 + 3 \cdot \sigma_1 < 0 & \text{if } \mu \in [-0,5; 0,5], \\ [|\sigma_3| \geq \sigma_{\text{comp}}, |\varepsilon_3| \geq \varepsilon_{\text{comp}}] & \text{if } \mu \in (0,5, 1] \end{array} \right. \quad (1)$$

где μ – коэффициент Надаи – Лоде; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения; σ_{ext} – предел на растяжение; σ_{comp} – предел на сжатие; ε_{ext} – предельная деформация при растяжении; $\varepsilon_{\text{comp}}$ – предельная деформация при сжатии.

В свою очередь, в качестве модели поведения породных масс в областях нарушения сплошности среды использовались специальные блочные элементы в виде систем упругих связей постоянной жесткости, расчет которой приведен на рисунке 1.

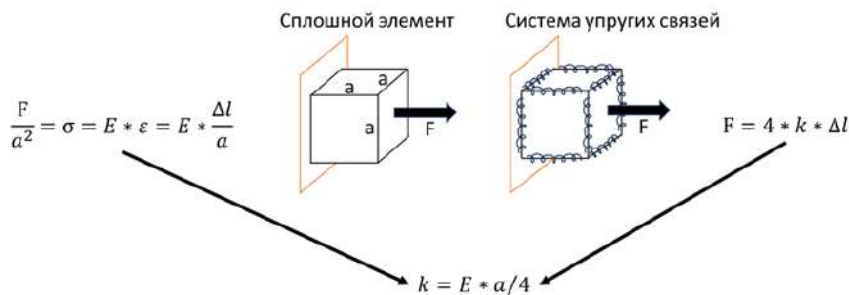


Рисунок 1 – Расчет жесткости упругих связей специальных блочных элементов

Таким образом, по результатам выполненного исследования, в таблице 1 приводятся значения расстояний от левой границы мульды оседаний на дневной поверхности до левой границы отработанного пространства (от которой велись горные работы) (далее – исследуемое расстояние) и значения максимальных оседаний на дневной поверхности, полученные как в ходе моделирования, так и рассчитанные в соответствии с инженерной методикой для различных значений длины лавы (в направлении движения забоя).

Таблица 1 – Значения исследуемого расстояния и максимальные значения оседаний на дневной поверхности

Длина (в направлении движения забоя) лавы, м	Исследуемое расстояние, м		Максимальное значение оседаний на дневной поверхности, мм	
	Результаты моделирования	Инженерная методика	Результаты моделирования	Инженерная методика
150	312	493	49	55
300	447	493	201	221
450	486	493	353	362
600	476	493	405	422
700	483	493	440	449

Согласно данным таблицы 1 максимальное значение оседаний на дневной поверхности, полученное в ходе моделирования, достаточно близко к тем, что рассчитывались согласно инженерной методике. Также стоит отметить, что, согласно инженерной методике, исследуемое расстояние является константным и зависит только от величины граничных углов. В свою очередь в ходе моделирования было получено, что исследуемое расстояние в начале отработки породного массива стремится от нуля к рассчитанному согласно инженерной методике значению, пока длина отработанного пространства (в направлении движения забоя) не достигнет ~350–400 м. Затем исследуемое расстояние также становится постоянным.

Список литературы

- 1 **Филимонов, К. А.** Технология подземных горных работ : учеб. пособие / К. А. Филимонов, В. А. Карасёв. – КузГТУ, 2017. – 187 с.
- 2 **Smolnik, G.** DEM numerical modeling of longwall extraction of coal in "Mysłowice" colliery / G. Smolnik // Minefill 2020-2021. – 2021. – P. 261–271.
- 3 **Islam, M. R.** Finite element modeling of stress distributions and problems for multi-slice longwall mining in Bangladesh, with special reference to the Barapukuria coal mine / M. R. Islam, D. Hayashi, A. B. M. Kamruzzaman // International Journal of Coal Geology. – 2009. – № 2 (78). – P. 91–109.
- 4 **Журавков, М. А.** Современные численные методы в механике: курс лекций / М. А. Журавков. – Минск : БГУ, 2022. – 132 с.

УДК 629.4.018

ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕВА БУКСОВОГО УЗЛА ГРУЗОВОГО ВАГОНА

И. В. КОВРИГИНА

Забайкальский институт железнодорожного транспорта – филиал Иркутского государственного университета путей сообщения, г. Чита, Российская Федерация

Р. С. БОЛЬШАКОВ

Иркутский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация

Колебательные процессы, возникающие при эксплуатации технических устройств железнодорожного транспорта, оказывают негативное влияние на долговечность составляющих узлов и агрегатов используемых средств, в том числе подвижного состава [1–3]. В этом направлении существует большое количество разнообразных подходов и конструктивных решений [4–6], направленных, в том числе, на развитие научных основ оценки динамического состояния грузовых вагонов [7–9].

В предлагаемом докладе рассматриваются особенности оценки температуры нагрева буксового узла грузового вагона. Стенд для испытания подшипников букс колесных пар состоит из рамы, упорных стоек с упорной плитой, оси с буксами и испытуемыми подшипниками, устройства для