

Материал оболочки – углепластик с плотностью $\rho = 1750 \text{ кг/м}^3$ и упругими постоянными, в ГПа, $c_{11} = 95,5$, $c_{12} = 28,9$, $c_{16} = 44,7$, $c_{22} = 25,9$, $c_{26} = 15,6$, $c_{44} = 4,4$, $c_{45} = -1,78$, $c_{55} = 6,45$, $c_{66} = 32,7$.

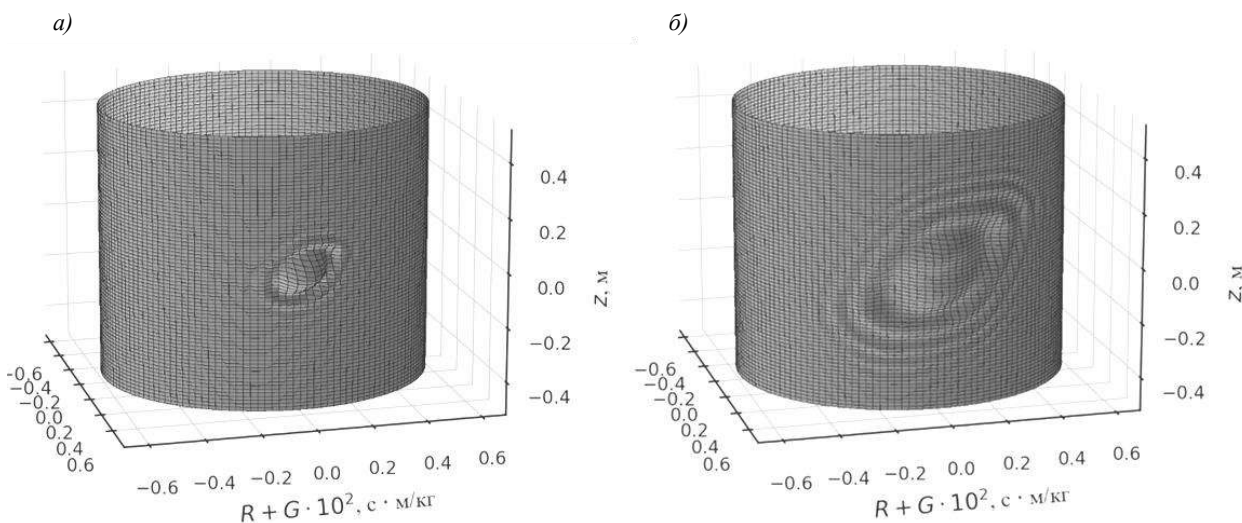


Рисунок 2 – Фундаментальные решения для нормального перемещения:
а – 0,1 мс; б – 0,3 мс

Представленные на рисунке 2 результаты иллюстрируют асимметричный характер распространения изгибных возмущений в материале анизотропной оболочки, что согласуется с рассмотренной моделью симметрии упругой среды.

Список литературы

- 1 **Бахвалов, Н. С.** Численные методы / Н. С. Бахвалов, Н. П. Жидков, Г. М. Кобельков. – 7-е изд. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. – 636 с.
- 2 **Бейтмен, Г.** Таблица интегральных преобразований. Т. 1. Преобразования Фурье, Лапласа, Меллина / Г. Бейтмен, А. Эрдейи. – М. : Наука, 1969. – 656 с.
- 3 Волны в сплошных средах : учеб. пособие для вузов / А. Г. Горшков, А. Д. Медведский, Л. Н. Рабинский, Д. В. Тарлаковский. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 472 с.
- 4 **Михайлова, Е. Ю.** Общая теория упругих оболочек : учеб. пособие / Е. Ю. Михайлова, Д. В. Тарлаковский, Г. В. Федотенков. – М. : МАИ, 2018. – 112 с.
- 5 **Chow, T. S.** On the Propagation of Flexural Waves in an Orthotropic Laminated Plate and Its Response to an Impulsive Load / T. S. Chow // Journal of Composite Materials. – 1971. – 5:306. – DOI : 10.1177/002199837100500302.
- 6 **Timoshenko, S.** On the correction for shear of the differential equation for transverse vibrations of prismatic bars / S. Timoshenko. Phil. Mag., ser. 6. – 1921. – Vol. 41. – P. 744.

УДК 539.3+51-74; 622.2

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ОТРАБОТКЕ ВЫРАБОТКАМИ БОЛЬШОЙ ПРОТЯЖЕННОСТИ С УЧЕТОМ ДАННЫХ СКВАЖИН ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОЙ РАЗВЕДКИ

Д. А. ПЕТРАЧКОВ, М. А. НИКОЛАЙЧИК, М. А. ЖУРАВКОВ
Белорусский государственный университет. г. Минск

Очистные горные работы выработками большой протяженности (лавами) вызывают перераспределение напряжений в вышележащих слоях глинисто-мергелевой толщи (ГМТ) и могут вызывать появление микротрещиноватости и водопроницаемости породной толщи [1]. Задача определения напряженно-деформированного состояния (НДС) в массиве горных пород при масштабном освоении подземного пространства является ключевой при решении широкого ряда задач геомеханики, включая задачи устойчивости породного массива, нахождения высоты зоны распространения трещин и связанные с ними задачи обеспечения безопасности подземных и наземных сооружений при разработке месторождений полезных ископаемых. В то же время широкое многообразие факто-

ров, которые оказывают воздействие на НДС породного массива, является препятствием для точного моделирования происходящих в массивах горных пород процессов [2]. Основной проблемой, кроме того, является то, что получение информации о фактическом характере НДС на больших глубинах сильно затруднено, что порождает ряд проблем, связанных с валидацией предложенных методов моделирования.

Одним из источников, из которого возможно получение информации о процессах, происходящих в глубине породной толщи на уровне ГМТ при воздействии очистных работ, являются гидрогеологические скважины. Уровень воды в гидрогеологических скважинах потенциально может использоваться для определения деформационного поведения породного массива на апробируемой скважиной глубине и, следовательно, для получения более цельной картины НДС в массиве горных пород, вызываемой проходкой лав.

В данном исследовании использовались данные абсолютных отметок пьезометрического уровня подземных вод в гидрогеологических наблюдательных скважинах, действующих в условиях Старобинского месторождения калийных солей. Целью данного исследования является выявление закономерностей поведения уровня подземных вод в зависимости от расположения близлежащих участков ведения очистных горных работ, характера их ведения. Также в рамках исследования строится решение обратной задачи об определении НДС в глубине породного массива по данным изменений уровня воды в скважине. Способом решения данной задачи является анализ данных натурных наблюдений за изменением уровня воды в скважинах гидрогеологической разведки и компьютерное численное моделирование НДС массива, позволяющее определять соответствующее изменение уровня воды в скважине.

Изменение высоты столба жидкости в скважине происходит за счет притока (оттока) подземных вод на небольшом участке, где стенки скважины нецементируемы, называемом открытым участком скважины. Водоносная толща (подтолща), на которой расположен открытый участок скважины, именуется апробируемым участком ГМТ.

Анализ изменения абсолютных отметок пьезометрического уровня подземных вод в гидрогеологических наблюдательных скважинах под влиянием близлежащих очистных горных работ проводился путем сопоставления графиков абсолютных отметок уровня подземных вод и планов горных работ с отмеченными на них периодами отработки лав, выделялись лавы, которые оказывают существенное и выраженное влияние на изменение уровня. По результатам этого был выбран ряд скважин, где изменение уровня воды явно вызвано проведением близлежащих очистных горных работ и где отсутствуют необъяснимые (с точки зрения влияния близлежащих очистных горных работ) или нежелательные (например, вследствие ремонтно-восстановительных работ скважин) колебания уровня воды.

Для таких лав изучалась зависимость уровня воды в скважине от расстояния до забоя (рисунок 1). Следует отметить, что изучению подлежит только зависимость уровня воды от расстояния до забоя. Зависимости скорости продвижения забоя и скорости возрастания уровня воды не изучались.

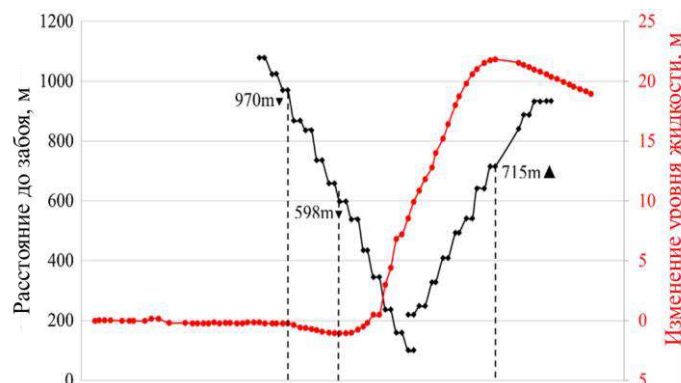


Рисунок 1 – Изменение уровня воды в скважинах в зависимости от расстояния до забоя

В ходе анализа данных абсолютных отметок пьезометрического уровня подземных вод в гидрогеологических наблюдательных скважинах на Старобинском месторождении калийных солей был выявлен ряд закономерностей изменения уровня подземных вод при проведении в окрестности

скважины очистных горных работ. Было замечено, что во многих скважинах имеет место повышение уровня воды после момента, когда скважина оказывается в зоне влияния ведения очистных горных работ, и уровень увеличивается по мере уменьшения расстояния от скважины до забоя.

В рамках решения задачи было проведено численное моделирование процессов изменения НДС вышележащих слоев ГМТ, включающее моделирование изменения давления в системе пор. Апробируемые скважинами подтолщи ГМТ относятся к слабоводоносным [3] и рассматриваются как пористая среда. Изменение порового давления вычисляется согласно модели Био [4]:

$$\sigma_{ij} = E_{ij}\varepsilon_{ij} - \alpha_b p_f \delta_{ij}, \quad (1)$$

где σ_{ij} – компоненты тензора напряжений; E_{ij} E_{ij} – компоненты тензора упругости скелета; ε_{ij} – компоненты тензора деформаций; α_b – коэффициент Био; p_f – давление жидкости в порах. Течение жидкости определяется согласно закону Дарси.

Численное моделирование состоит из следующих этапов: 1) определение поля перемещений и напряжений, снимаемое на границах апробируемой водоносной подтолщи (ГМТ) и водоупорных толщ (ГМТ и ГПП); 2) определение изменения порового давления жидкости в водоносной толще, вызванного изменением ее НДС; 3) расчет прироста уровня воды в скважине на основании полученных значений порового давления в водоносной толще.

В результате проведенного исследования была установлена выраженная зависимость уровня воды в скважинах гидрогеологической разведки при ведении очистных горных работ в их окрестности. Проведенное исследование позволило составить модель геомеханического состояния водонасыщенных подрабатываемых породных массивов, учитывающую гидродинамическую компоненту при расчете напряженного состояния породного скелета, которая подтверждается данными натурных наблюдений изменения уровня подземных вод в гидрогеологических наблюдательных скважинах.

Список литературы

- 1 Геотермический мониторинг в районе краснослободского разлома припятского прогиба / В. И. Зуй, В. П. Ильин, М. А. Дубаневич, Е. А. Василёнок // Современные проблемы геохимии, геологии и поисков месторождений полезных ископаемых. – 2017. – С. 23–26.
- 2 Певзнер, М. Е. Геомеханика / М. Е. Певзнер, М. А. Иофис, В. Н. Попов. – М. : Изд-во МГГУ, 2008. – 437 с.
- 3 Поливко, Л. А. Палеогидрогеология надсолевой глинисто-мергелистой толщи Старобинского месторождения калийных солей / Л. А. Поливко // Літасфера. – 2019. – № 2. – С. 90–106.
- 4 Многомасштабное геомеханическое моделирование с учетом эволюции микроструктуры геосреды / А. В. Вершинин, К. М. Зингерман, В. А. Левин [и др.] // Геофизические технологии. – 2024. – № 1. – С. 105–117.

УДК 625.8

РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА «SOFT-MOST»

А. А. ПОДДУБНЫЙ

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Е. Н. КИЛЬЧЕНКО

ООО «ИнноТех Солюшнс», г. Минск, Республика Беларусь

Разрабатываемый программный комплекс «SoftIT-Most» предназначен для автоматизации оперативного и технического контроля технологических процессов транспортной инфраструктуры в реальном времени, включая нормальные, переходные и аварийные режимы, и успешно решает задачи непрерывного мониторинга мостов.

В Республике Беларусь насчитывается более пяти тысяч мостовых сооружений, общая протяженность которых свыше 185 тысяч метров.

Износ конструкций любого мостового сооружения происходит в зависимости от условий его эксплуатации. Грузоподъемность мостов и путепроводов, их безопасная эксплуатация постепенно снижаются за счет повреждений из-за интенсивности движения и увеличения тяжеловесности транспорта, а также влияния погодных-климатических факторов.