

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

2024

№ 5

РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

УДК 539.421; 622.831

ПРОГНОЗ СДВИЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ОСНОВЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ГОРНЫХ ПОРОД

Э. В. Борисенко¹, Ф. М. Голубев², С. А. Попович¹

¹Институт физики горных процессов,

E-mail: ehd1207@yandex.ru, ул. Розы Люксембург, 72, 283050, г. Донецк, Россия

*²Республиканский академический научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт
горной геологии, геомеханики, геофизики и маркшейдерского дела,
E-mail: f_golubev@list.ru, ул. Челюскинцев, 291, 283001, г. Донецк, Россия*

Приведены результаты экспериментальных исследований по водонасыщению образцов горных пород основных литологических типов, свойственных для Донбасса. Обобщены изменения деформационных свойств, происходящие в горных породах, при их увлажнении. Приведена методика разработки модели, позволяющей учитывать влияние затопления различных горных пород на параметры сдвижения. На основании лабораторных данных построена конечно-элементная модель активизации геомеханических процессов, вызванных подработкой и затоплением массива горных пород. Установлено влияние литологического состава массива на параметры сдвижения при затоплении горных выработок закрывающихся угледобывающих предприятий. Полученные результаты могут лежать в основу совершенствования действующих нормативных документов, регламентирующих прогноз сдвигов земной поверхности при добыче угля и ликвидации угольных шахт за счет учета литологической структуры углепородного массива.

Водонасыщение, горная порода, напряжение, деформационные свойства, ликвидация, конечно-элементная модель, зона водопроводящих трещин, активизация сдвигов, затопление выработок

DOI: 10.15372/FTPPI20240507

EDN: DWBSVF

Затопление угледобывающих предприятий в различных масштабах осуществляется во всех угленосных районах Донбасса. Несмотря на десятилетнюю практику ликвидации шахт, отсутствуют эффективные механизмы прогноза деформаций земной поверхности, имеющие достаточное экспериментальное обоснование. Нормативный документ [1] включает общие описания методик прогноза, но недостаточно четко регламентирует граничные условия расчетов. Методология, описанная в [2], подразумевает формирование ряда моделей, среди которых особую позицию занимает геомеханическая модель. Заслуживают внимания подходы, представленные в [3], однако экспериментальный базис для формирования предлагаемых моделей крайне ограничен. Разработка моделей требует создания обширной базы лабораторных исследований свойств горных пород при их водонасыщении. Данные исследования могут быть положены в основу прогноза сдвигов и применяться для определения вероятности провалообразования [3 – 5].

Согласно [6], прогноз таких процессов входит в обязанности маркшейдерских служб, однако методики прогноза практически отсутствуют. Активизация сдвигений в результате затопления горного массива наблюдается как в условиях Донбасса, так и в других промышленных районах Российской Федерации, что делает актуальным вопрос качественного прогноза сдвигений земной поверхности при затоплении закрытых шахт, базисом для которых могут служить лабораторные исследования по водонасыщению горных пород.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для уточнения параметров сдвига земной поверхности при затоплении углепородного массива следует основываться на экспериментальном определении изменения прочностных характеристик и деформационных свойств образцов горных пород при их длительном водонасыщении.

В экспериментах устанавливались параметры водонасыщения 150 образцов горных пород цилиндрической формы, изготовленных из штуфов породных материалов, отобранных из угленосного массива. Для водонасыщения горных пород использовалась шахтная вода. Водонасыщение образцов горных пород осуществлялось путем их полного погружения. Максимальная продолжительность водонасыщения образцов составила около 60 сут [7, 8].

Для определения зависимости напряженно-деформационного состояния породных слоев угленосного массива от степени насыщения шахтной водой испытывались сухие и водонасыщенные образцы горных пород различного литотипа на одноосное сжатие с постоянной регистрацией нагрузки и деформации в процессе их нагружения до предельного состояния.

Для сухих образцов песчаника минимальное зафиксированное давление при разрушении составило 42 МПа для образца № 14, максимальное — 101 МПа для образца № 16 (рис. 1а). Минимальное значение относительной деформации на момент разрушения — 0.0043 % для образцов № 4 и № 19 (рис. 1а), максимальное — 0.014 % для образца № 17 (рис. 1а).

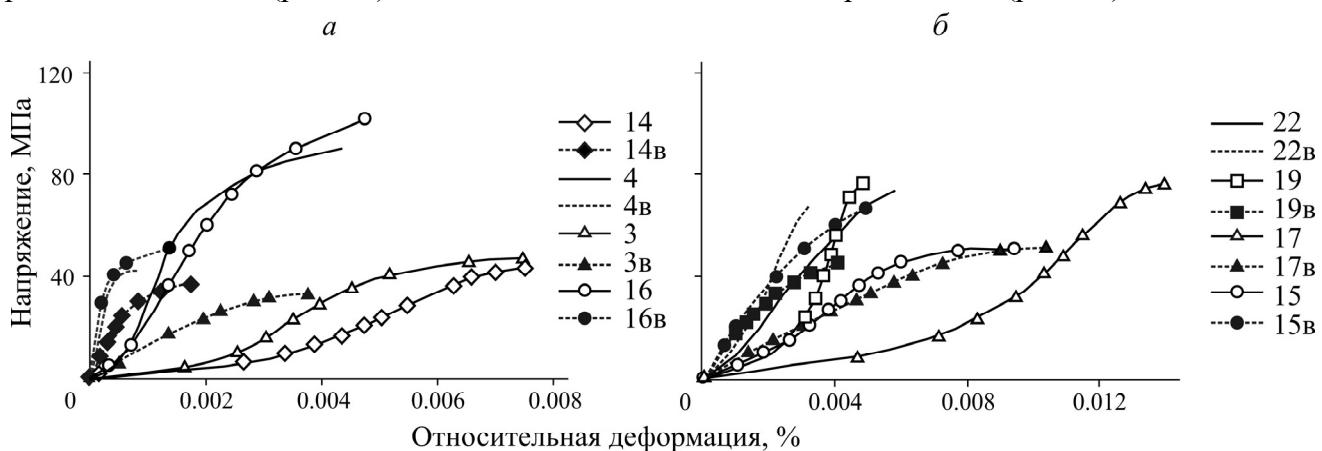


Рис. 1. Усредненные зависимости “напряжение – деформация” образцов песчаника: а — № 16 ($\rho=2.67 \text{ г}/\text{cm}^3$), № 14 ($\rho=2.3 \text{ г}/\text{cm}^3$), № 4 ($\rho=2.7 \text{ г}/\text{cm}^3$), № 3 ($\rho=2.3 \text{ г}/\text{cm}^3$); б — № 22 ($\rho=2.55 \text{ г}/\text{cm}^3$), № 19 ($\rho=2.67 \text{ г}/\text{cm}^3$), № 17 ($\rho=2.66 \text{ г}/\text{cm}^3$), № 15 ($\rho=2.54 \text{ г}/\text{cm}^3$). Для водонасыщенных образцов — литерра “в”

Для водонасыщенных образцов песчаника минимальное давление при их разрушении составило 32 МПа для образца № 3в (рис. 1а), максимальное — 69 МПа для образцов № 15в и 22в (рис. 1б). Минимальное значение относительной деформации на момент разрушения составило 0.0008 % для образца № 4в (рис. 1а), максимальное — 0.0102 % для образца № 17в (рис. 1б).

Установлено, что деформационное поведение сухих и водонасыщенных образцов песчаника различается на всех стадиях их нагружения. В начальной стадии сжатия деформация ε_c сухих образцов песчаника оказалась выше, чем деформация ε_b водонасыщенных образцов при одной и той же нагрузке.

При дальнейшем нагружении происходит существенное повышение скорости деформирования водонасыщенных образцов песчаника. Деформации водонасыщенных образцов песчаника ε_b на заключительной стадии нагружения (вплоть до момента их разрушения) становятся выше ($\varepsilon_b > \varepsilon_c$), чем деформации соответствующих сухих образцов песчаника ε_c .

Как показали исследования напряженно-деформированного состояния сухих и водонасыщенных образцов песчаника, при снижении плотности ρ песчаника с 2.7 до 2.3 г/см³ большинство зависимостей нагрузки от деформации становятся пологими, но при этом более удлиненными. С ростом плотности сухих и водонасыщенных образцов песчаника прослеживается тенденция к росту пределов прочности на сжатие.

Усредненные зависимости испытания сухих и водонасыщенных образцов сланца песчаного приведены на рис. 2. Для сухих образцов сланца песчаного минимальное давление при разрушении составило 55 МПа для образца № 21 (рис. 2 σ), максимальное — 140 МПа для образца № 28 (рис. 2 a). Минимальное значение относительной деформации на момент разрушения — 0.0042 % для образца № 21 (рис. 2 σ), максимальное — 0.011 % для образца № 13 (рис. 2 b).

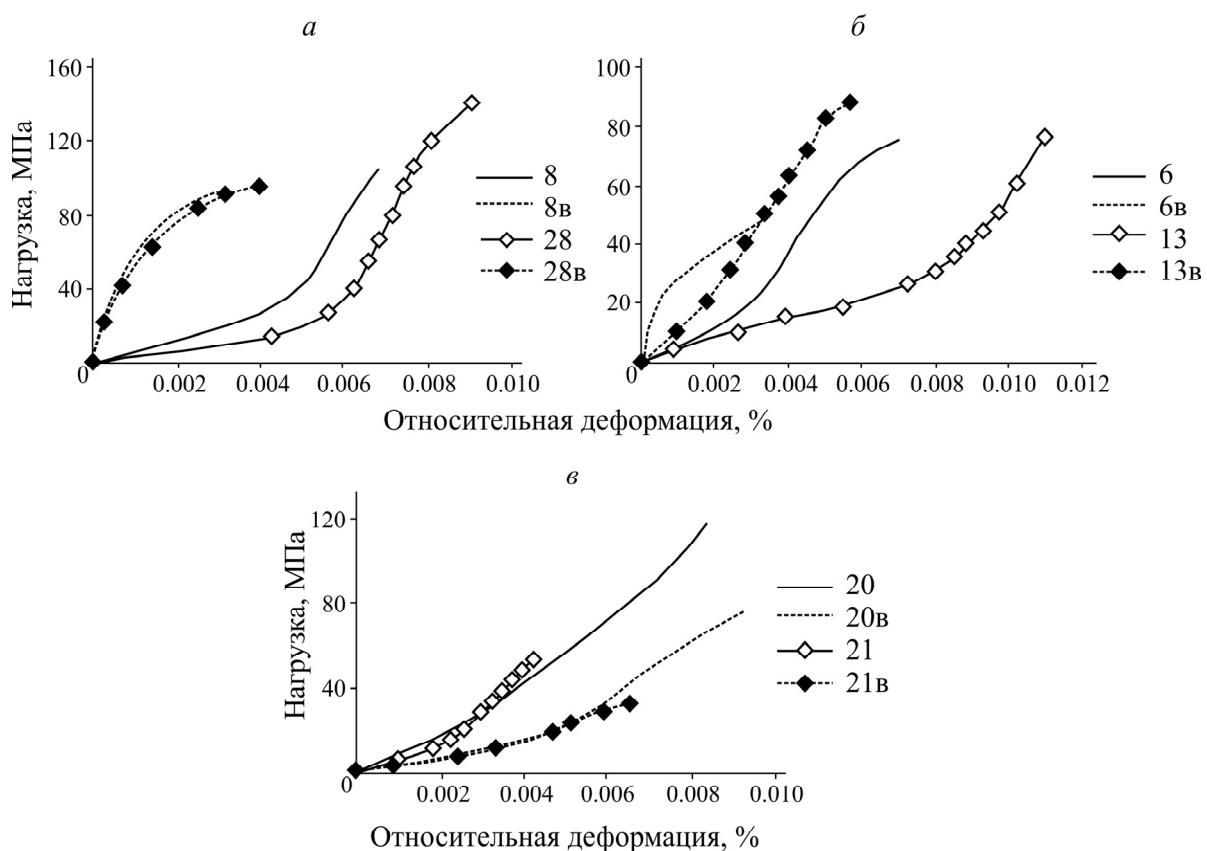


Рис. 2. Усредненные зависимости “напряжение – деформация” образцов сланца песчаного:
 a — № 8 ($\rho = 2.70$ г/см³), № 28 ($\rho = 2.69$ г/см³); b — № 6 ($\rho = 2.72$ г/см³), № 13 ($\rho = 2.65$ г/см³);
 c — № 20 ($\rho = 2.69$ г/см³), № 21 ($\rho = 2.67$ г/см³). Для водонасыщенных образцов — литерра “ B ”

Для водонасыщенных образцов сланца песчаного минимальное давление при разрушении составило 32 МПа для образца № 21в (рис. 2в), максимальное — 98 МПа для образца № 28в (рис. 2а). Минимальное значение относительной деформации на момент разрушения составило 0.003 % для образца № 8в (рис. 2а), максимальное — 0.092 % для образца № 20в (рис. 2в).

Установлено, что деформационное поведение сухих и водонасыщенных образцов сланца песчаного различается на всех стадиях нагружения. При этом деформационное поведение образцов сланцев песчаных СП-П, близких по своему строению и содержанию глинистого вещества к образцам песчаников, отличается от деформационного поведения образцов сланцев песчаных СП-СГ, близких по строению и количеству глинистого вещества к образцам сланца глинистого. В начальной стадии сжатия деформации ε_c сухих образцов СП-П оказались выше, чем деформации водонасыщенных образцов ε_v при одной и той же нагрузке.

При дальнейшем нагружении происходит существенное повышение скорости деформирования водонасыщенных образцов СП-П. Иными словами, деформации ε_v водонасыщенных образцов СП-П на заключительной стадии нагружения (вплоть до момента их разрушения) становятся выше ($\varepsilon_v > \varepsilon_c$), чем деформации ε_c соответствующих сухих образцов СП-П.

Для образцов СП-СГ такого деформационного поведения, как у образцов СП-П, в начальной и последующих стадиях не наблюдается. Зафиксировано разупрочнение водонасыщенных образцов СП-СГ по сравнению с соответствующими сухими образцами. Следует также отметить, что деформационное поведение водонасыщенных образцов СП-П аналогично деформационному поведению водонасыщенных образцов песчаника.

Усредненные зависимости испытания сухих и водонасыщенных образцов сланца глинистого приведены на рис. 3.

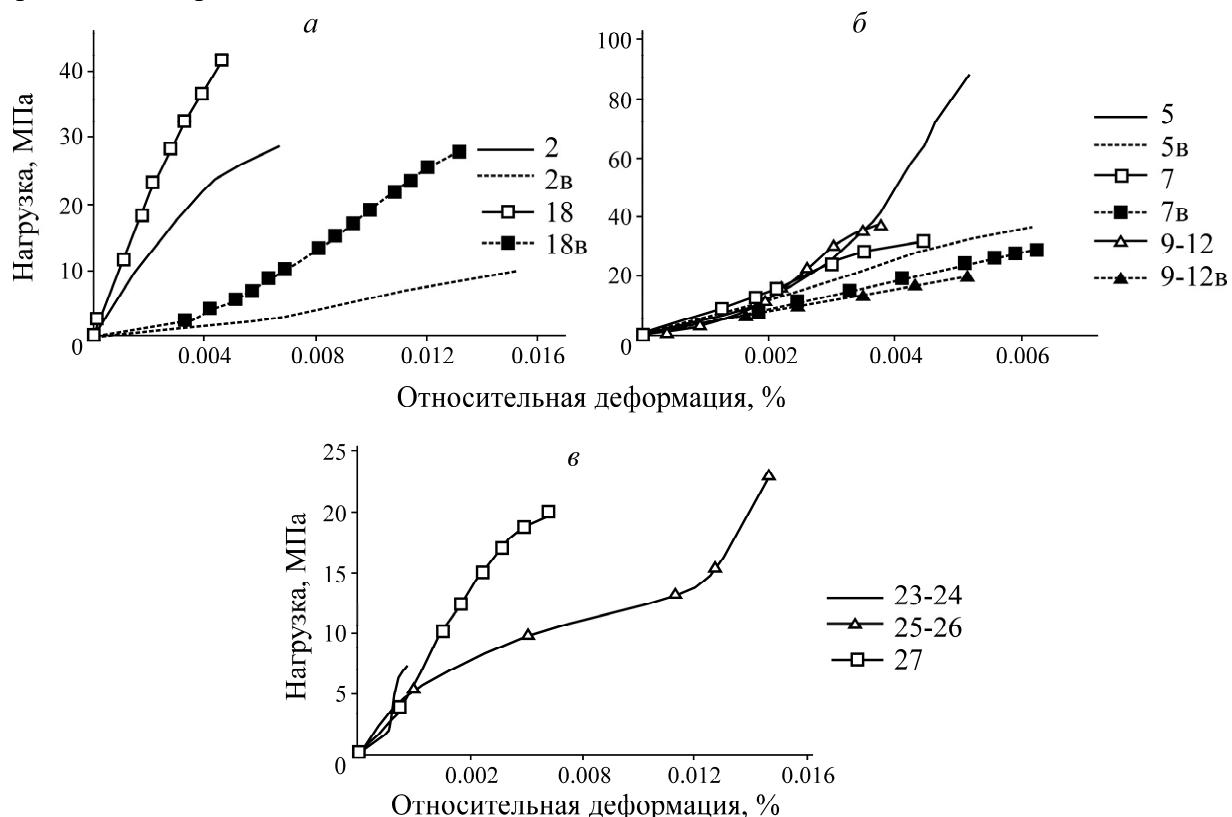


Рис. 3. Усредненные зависимости “напряжение – деформация” образцов сланца глинистого: а — № 2 ($\rho=2.63 \text{ г}/\text{см}^3$), № 18 ($\rho=2.66 \text{ г}/\text{см}^3$); б — № 5 ($\rho=2.68 \text{ г}/\text{см}^3$), № 7 ($\rho=2.82 \text{ г}/\text{см}^3$), № 9-12 ($\rho=2.67 \text{ г}/\text{см}^3$); в — № 23-24 ($\rho=2.83 \text{ г}/\text{см}^3$), № 25-26 ($\rho=2.68 \text{ г}/\text{см}^3$), № 27 ($\rho=2.58 \text{ г}/\text{см}^3$). Для водонасыщенных образцов — литер “в”

Для сухих образцов сланца глинистого минимальное давление при разрушении составило 7 МПа для образца № 27 (рис. 3в), максимальное — 89 МПа для образца № 5 (рис. 3б). Минимальное значение относительной деформации на момент разрушения — 0.0019 % для образца № 27 (рис. 3в), максимальное — 0.0148 % для образцов № 25 и 26 (рис. 3в).

Для водонасыщенных образцов сланца глинистого минимальное давление при разрушении составило 10 МПа для образца № 2в (рис. 3а), максимальное — 37 МПа для образца № 5в (рис. 3б). Минимальное значение относительной деформации на момент разрушения — 0.0052 % для образцов № 9-12в (рис. 3б), максимальное — 0.0151 % для образца № 2в (рис. 3а).

Установлено, что деформационное поведение сухих и водонасыщенных образцов сланцев глинистых (СГ-СП), близких по своему строению и содержанию глинистого вещества к образцам сланцев песчаных (СП-СГ), отличается от деформационного поведения сухих и водонасыщенных образцов типичных сланцев глинистых (СГ).

В начальной стадии сжатия деформации ε_c сухих образцов СГ-СП оказались близкими к деформациям водонасыщенных образцов ε_b при одной и той же нагрузке. При дальнейшем нагружении происходит повышение скорости деформирования водонасыщенных образцов СГ-СП, по сравнению со скоростью деформирования соответствующих сухих образцов ($\varepsilon_b > \varepsilon_c$). Зависимости напряжений водонасыщенных образцов СГ-СП от деформации имеют преимущественно линейный характер.

Деформационное поведение под нарастающей нагрузкой сухих и водонасыщенных образцов типичного сланца глинистого (СГ) характеризуется как обычное поведение горной породы, длительное водонасыщение которой приводит к значительному снижению ее прочности.

Обобщая результаты проведенных исследований, следует отметить, что для песчаников и песчаных сланцев зафиксировано как снижение прочностных характеристик при их увлажнении, так и увеличение прочности на начальном этапе нагружения.

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ

Горные породы в угленосных свитах Донбасса распределены крайне неравномерно, песчаные сланцы могут занимать от 8 до 55 % углепородного массива. Аналогичный перепад можно наблюдать и для песчаников, и для глинистых сланцев. Согласно данным рис. 1–3, прочностные характеристики глинистых сланцев могут снижаться в 2–10 раз, песчаных сланцев — в 2–3 раза, песчаников — в 1.2 раза.

С учетом лабораторных данных о снижении прочностных характеристик горных пород в процессе водонасыщения разработана конечно-элементная модель массива горных пород [9, 10]. В качестве исходных данных для модели задавались следующие физико-механические показатели: модуль Юнга; коэффициент Пуассона; модуль сдвига; удельное сцепление; угол внутреннего трения; плотность.

Для оптимизации вычислительной мощности компьютера и возможности решения задачи по построению объемной геомеханической модели конечно-элементная сетка формировалась неравномерно, со сгущениями в областях, расположенных над лавой и на верхнем слое модели, отображающем поверхность. Глубина отработки 500 м, параметры моделируемой лавы 1000 × 200 м.

Над лавой моделировалось три зоны деформирования пород: беспорядочных обрушений; упорядоченных обрушений; прогибов с разрывом сплошности. В пределах указанных зон, с учетом исследований [11], моделировалась зона водопроводящих трещин, форма которой определялась по углам полных сдвигов. В результате расчета получены схемы оседаний и горизонтальных сдвигов по простирианию и вкрест простириания пласта.

Размеры зон влияния лавы на поверхность, параметры граничных углов и абсолютные значения оседаний свидетельствуют об адекватной работе модели. Подобный характер влияния подработки на деформации земной поверхности неоднократно фиксировался на грунтовых наблюдательных станциях и при помощи спутниковых снимков [12]. Это позволяет использовать модель в качестве прогнозной для определения характера деформаций земной поверхности при затоплении.

Для моделирования затопления изменялись свойства горного массива в зоне водопроводящих трещин согласно закономерностям, приведенным на рис. 1 – 3а, б. В результате получены кривые оседаний земной поверхности, представленные на рис. 4.

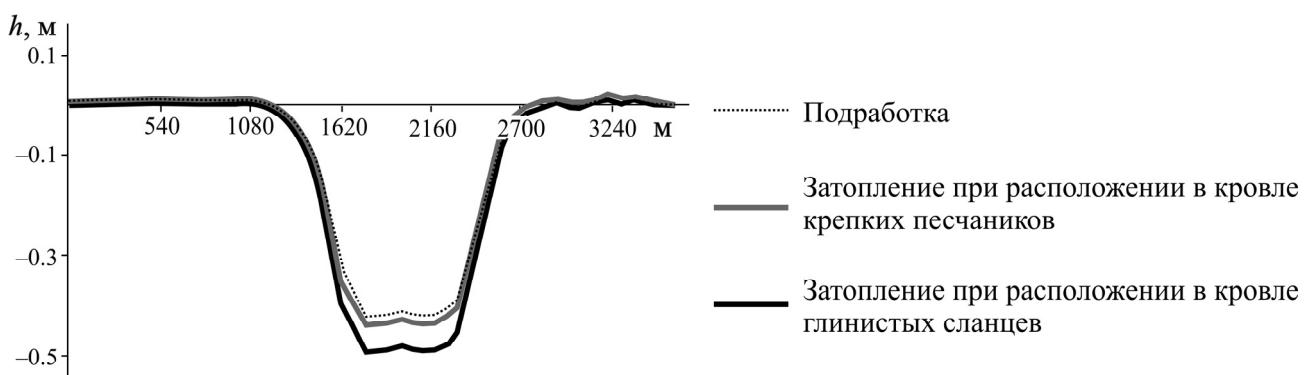


Рис. 4. Оседания земной поверхности в разрезе по простиранию лавы при подработке и затоплении горных выработок с различным литотипом в кровле отработанного пласта

ВЫВОДЫ

Установлено, что в начальной стадии одноосного сжатия деформации образцов песчаника с естественной влажностью выше, чем деформации водонасыщенных образцов при одной и той же нагрузке. При повышении нагрузки происходит существенное повышение интенсивности деформирования водонасыщенных образцов песчаника.

По результатам моделирования сдвигений земной поверхности от затопления лавы с песчаником и глинистым сланцем в кровле получены кривые оседаний, свидетельствующие о существенном влиянии стратиграфии горного массива на характер сдвига при затоплении горных выработок. При моделировании использовались деформационные параметры образцов, полученные в лабораторных условиях, прочностные характеристики которых снижались в результате увлажнения.

Учитывая изменчивость распределения горных пород в основных угольных свитах Донбасса, при расчете активизации сдвигений земной поверхности следует ввести поправочные коэффициенты, зависящие от литологического состава подработанного массива горных пород. При расчетах сдвигений земной поверхности также необходимо учитывать влияние литологического типа горной породы, залегающей в основной кровле. Этот фактор может оказывать влияние на процесс сдвига как при подработке, так и при затоплении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ликвидация угольных шахт. Защита земной поверхности от затопления горных выработок. Рекомендации: КД 12.12.004- 98: Утв. Министерством угольной промышленности Украины 20.12.98. — Донецк, 1998. — 46 с.

2. Кутепов Ю. И., Кутепова Н. А. Методология инженерно-геологического изучения гидрогеомеханических процессов в техногенно нарушенных массивах при разработке МПИ // ГИАБ. — 2014. — № 8. — С. 123–131.
3. Еременко А. А., Дарбинян Т. П., Шапошник Ю. Н., Усольцева О. М., Цой П. А. Оценка физико-механических свойств руд и горных пород, подвергшихся затоплению // ФТПРПИ. — 2023. — № 5. — С. 24–31.
4. Голубев Ф. М. Геомеханический прогноз развития сдвижений при ликвидации угледобывающих предприятий // Тр. РАНИМИ : сб. науч. тр. — Донецк, 2018. — № 6 (21). — С. 367–378.
5. Grischenkova E. N. and Mustafin M. G. Earth surface monitoring on undermined territories / Innovation-Based Development of the Mineral Resources Sector: Challenges and Prospects — 11th Russian-German Raw Materials, 2019. — P. 95–102.
6. Тюленева Т. А. Совершенствование технологии ликвидации провалов над горными выработками // J. Min. and Geotechnical Eng. — 2021. — No. 1(12):4. — С. 4–26.
7. Приказ Ростехнадзора от 19.05.2023 N 186 “Об утверждении Правил осуществления маркшейдерской деятельности” (зарегистрировано в Минюсте России 31.05.2023 N 73638)
8. Борисенко Э. В., Гузеев О. А., Корвякова Н. П., Подрухин А. А. Эмпирические характеристики длительного водонасыщения образцов горных пород угленосного массива Донбасса // Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр. — М.: ИПКОН РАН, 2022. — С. 63–68.
9. Борисенко Э. В. Изменение прочностных характеристик образцов горных пород угленосных массивов Донбасса в процессе длительного водонасыщения // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2023. — Т. 10. — № 3. — 25–29.
10. Verbilo P. E. and Karasev M. A. Experimental and numerical research of jointed rock mass anisotropy in a three-dimensional stress field, The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin, 2022, Vol. 2, No. 37. — С 109–122
11. Protosenya A. G. and Verbilo P. E. Analysis of the jointed rock mass mechanical characteristics anisotropy under conditions of apatite-nepheline mineral deposits, Topical Issues of Rational Use Natural Resources Proc. Int. Forum-Contest of Young Researchers, 2019, No. 1. — P. 187–197.
12. Gusev V. N., Maliukhna E. M. , Volohov E. M., Tulenev M. A., and Gubin M. Y. Assessment of development of water conducting fractures zone in the massif over crown of arch of tunneling (construction), Int. J. Civil Eng. and Technol, 2019, Vol. 10, No. 2. — P. 635–643.
13. Пономаренко М. Р., Кутепов Ю. И. Космические методы в составе комплексного деформационного мониторинга земной поверхности горного предприятия // ГИАБ. — 2020. — № 12. — С. 103–113.

Поступила в редакцию 05/VII 2024

После доработки 15/VIII 2024

Принята к публикации 24/IX 2024