

УДК 622.023.25  
DOI <https://doi.org/10.32838/TNU-2663-5941/2020.3-1/28>

**Сергієнко О.І.**

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

**Когтєва О.П.**

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

**Уваров М.О.**

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

## ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ В'ЯЗКО-ПРУЖНИХ ДЕФОРМАЦІЙ ОДНОРІДНОГО МАСИВУ НАВКОЛО ОДИНОЧНОЇ ВИРОБКИ

У статті розглянута можливість за допомогою чисельного моделювання досліджувати напружено-деформований стан однорідного масиву навколо одиночної виробки за зміни фізико-механічних властивостей порід з урахуванням в'язко-пружних деформацій.

Для визначення впливу вологи на фізико-механічні властивості порід були проведені лабораторні дослідження з використанням зразків пісковика шахти «Капітальна» Донецького вугільного басейну.

Водонасичення, на відміну від сухого стану, як показали лабораторні випробування, призводить до пластичних деформацій зі значним зниженням межі міцності під час стискання. Було встановлено, що в насиченому водою стані межа міцності та модуль пружності зменшувалися, а коефіцієнт поперечних деформацій збільшувався.

В результаті моделювання видно, що зона максимального опорного тиску для сухого масиву утворюється на контурі виробки, а для вологого масиву – має певну відстань від контуру виробки на 1,5–2,5 м, залежно від глибини залягання виробки.

Під дією тиску відбувається зменшення корисної висоти виробки. Для сухого масиву за лінійним законом, а для масиву у зволоженому стані процес описується у вигляді полінома 3-го ступеня. Під час навантаження моделі від 45 МПа висота виробки дорівнює 0 м, тобто виробка є «задавленою».

Зміна максимального напруження бічних порід (опорного тиску) сухого масиву відрізняється від максимального напруження бічних порід вологого масиву за рахунок впливу вологи на їх фізико-механічні властивості. Так, водопоширення у масиві змінює пружно-крихкі властивості порід на в'язко-пружні.

За зміни форми виробки у результаті дії пластичних деформацій також змінюється і коефіцієнт концентрації напруження. Пластичні деформації відбуваються поки є вільний простір для них, тому відбувається повне «здавлення» виробки.

Так, завдяки моделюванню з використанням в'язко-пружних деформацій можна отримати більш адекватні результати з визначення напружено-деформованого стану порід навколо гірничих виробок.

**Ключові слова:** фізико-механічні властивості, напружено-деформований стан, водонасиченість порід, чисельне моделювання, в'язко-пружні деформації.

**Постановка проблеми.** На стійкість гірничих виробок передусім впливає фізико-механічний стан порід, які оточують виробку. Перекріплення виробок, взяття підривання не вирішує повністю цієї проблеми. Погіршення стану гірничої виробки – це пряма загроза безпеки праці шахтарів. Тому визначення напружено-деформованого стану масиву порід навколо гірничої виробки за різних його фізико-механічних властивостях є актуальним завданням.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз сучасних досліджень впливу вологи на фізико-механічні властивості порід показав: наси-

чення рідиною значно впливає на пружність гірських порід. Було встановлено, що тривале вологонасичення значно зменшує опір стисненню. Також доведено, що за водонасичення порід вони мають більший розкид середніх значень коефіцієнтів варіації, ніж у сухому стані [1]. Автор роботи [2], спираючись на дослідні дані, вважає, що зміна пружних властивостей гірських порід, зумовлених ступенем вологості, має суттєво нелінійний характер. За низьких рівнів водонасичення пружні властивості показують достатньо швидку зміну – зменшення модуля Юнга та збільшення коефіцієнта Пуассона. В роботі [3] дослідження

стосуються впливу початкового пошкодження на міцність та інші механічні показники та їх зміни від характеру мікротріщин. Автори В. Vászrhelyi, М. Davagranah [4] дійшли висновку – деякі механічні параметри гірської породи залежать від ступеня насиченості водою, але також залежність зумовлена складом самої породи.

Отже, метою цих наукових досліджень є визначення впливу змінення їх фізико-механічних властивостей на напружено-деформований стан гірських порід навколо гірничих виробок.

У результаті лабораторних досліджень [5] з визначення впливу вологи на фізико-механічні властивості гірських порід отримані наступні результати: при навантаженні сухого зразка відбувається крихке руйнування, а для вологих проб спостерігається наявність пластичної деформації, коли за її збільшення напруження майже не змінюється, але зменшується приблизно у два рази в порівнянні з самою межею міцності. Механічні властивості за зволоження пісковика, вологоємність якого досягає діапазону 2–3%, мають такі середні значення: межа міцності на стиснення зменшується майже у 2 рази; модуль пружності зменшується – у 4 рази; – коефіцієнт поперечної деформації збільшується у 2,3 рази.

У роботі [6] описано альтернативний метод випробувань швидкості деформації під час проведення досліджень на трьохвісне стискання на зразках чотирьох типів гірських порід, включаючи пісковик. Випробування проводились за різних умов тиску та вологості. Було визначено, що максимальна міцність і зміни після дії навантаження суттєво залежать від швидкості навантаження. Також авторами визначено, що залежність швидкості навантаження в ділянці післяруйнування пов'язано зі станом вологості і в ділянці піку міцності вплив води буде більший, ніж вплив тиску.

Автори [7] у своїх дослідженнях зразків сухого та насиченого водою зразків пісковика на трьохвісне навантаження дійшли таких висновків та результатів: у насичених водою зразках коєзія кут внутрішнього тертя та модуль Юнга зменшуються, а коефіцієнт Пуассона збільшується. Також визначили, що характеристики руйнування зразків пісковика пов'язані з початковим тиском, і що руйнування пісковика під час випробування на розвантаження є більш серйозним, ніж під час випробування на навантаження, особливо для сухих зразків. Пісковик більш схильний до утворення внутрішніх тріщин під дією води, а поглинена енергія під час розвантаження здебільшого сприяє пошкодженню породи, що своєю чергою

вказує на те, що вірогідність вибуху в гірській породі в насичених водою зразках породи нижче, ніж у зразків у сухому стані.

**Постановка завдання.** Для визначення напружено-деформованого стану масиву порід навколо виробки, треба задатися геометричними параметрами, граничними умовами та навантаженням моделі (рис. 1).

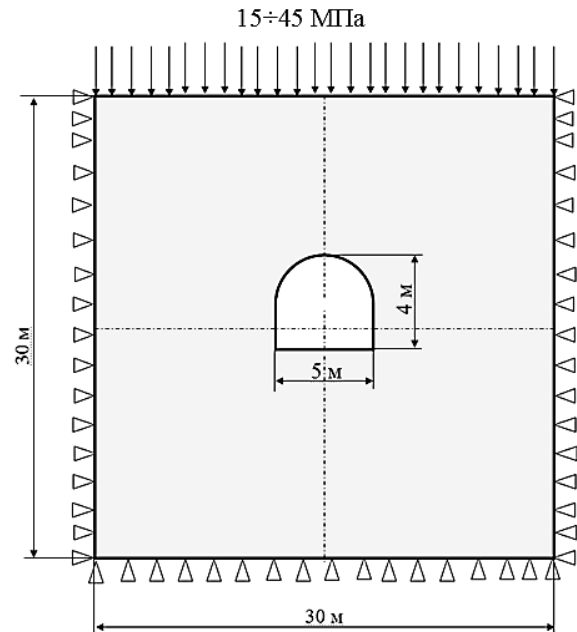


Рис. 1. Розрахункова схема та граничні умови для чисельного моделювання

Геометричні параметри: візьмемо найбільш стандартні розміри виробки: висота – 4 м, ширина – 5 м. Розміри моделі – 30×30 м, щоб виключити граничний вплив моделі на напружений стан порід навколо виробки.

Навантаження моделі: бічний тиск буде формуватися шляхом поперечних деформацій. Визначати напружений стан будемо за різного тиску навантаження від 15 МПа до 45 МПа, з кроком 10 МПа, що відповідає тиску на глибині від 600 м до 1800 м.

Властивості моделі: припустимо, це буде однорідний масив, який складається з пісковика за різних умов впливу зовнішніх факторів, наприклад, вологи. Таким чином, використовуємо властивості сухого та вологого пісковика. За результатами лабораторних досліджень, навантаження пісковика  $L_1S_1$ , ВП «Шахти «Капітальна» ДП «Мирноградвугілля» Донецького вугільного басейну, отримані діаграми навантаження зразків сухого та волого пісковика (рис. 2, 3), межа міцності на стиснення яких дорівнює 57,8 МПа, та 13,92 МПа відповідно.

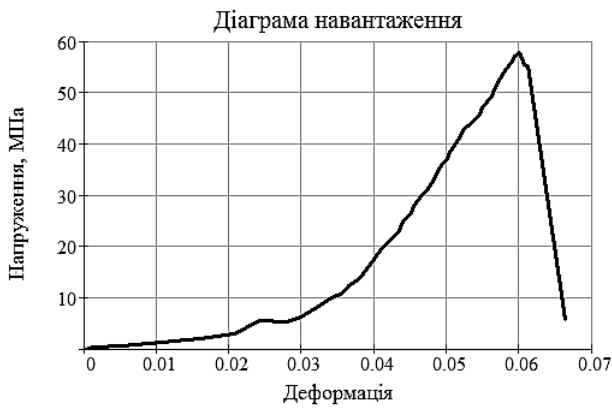


Рис. 2. Графік залежності нормальних напружень від деформації сухого зразка

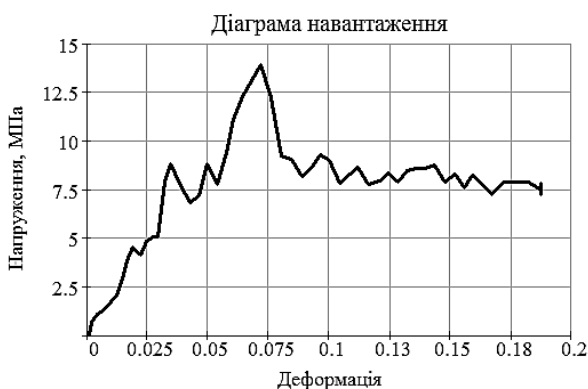


Рис. 3. Графік залежності нормальних напружень від деформації волого зразка

Під час навантаження сухого зразка відбувається крихке руйнування, а для вологих проб спостерігається наявність пластичної деформації, коли за її збільшення напруження майже не змінюється, але зменшується приблизно у два рази в порівнянні з самою межею міцності. Повна деформація волого зразка майже у 3 рази більше деформації сухого.

До розрахунку прийняті моделі двох типів: перша – це модель з механічними властивостями сухого масиву; друга – з механічними властивостями вологого масиву.

Матеріал вважається в'язко-пружним, якщо має як пружну (оборотну) частину, так і в'язку (необоротну) частину деформацій. Під час навантаження пружна зміна форми відбувається миттєво, тоді як в'язка частина деформації розвивається протягом деякого часу [8; 9].

Введення в'язко-пружної моделі передбачає використання квазістатичних крайових величин для вирішення завдання про механічне деформування лінійних в'язко-пружних твердих тіл.

Модель Максвелла можна представити у вигляді чисто в'язкого поршня і чисто пружної пружини, сполучених послідовно.

Модель описується таким рівнянням:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\sigma}{\eta} + \frac{1}{E} \cdot \frac{d\sigma}{dt}$$

За цією моделлю, якщо матеріал знаходиться під постійним навантаженням, напруга поступово слабшає. Якщо матеріал знаходиться в постійному напруженні, у навантаження два складники:

- 1) пружний компонент, який виявляє себе миттєво, представляючи собою пружину, і розслаблюється негайно у разі зняття напруження;
- 2) в'язкий компонент, який росте з часом, поки є напруження.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Чисельне моделювання напружено-деформованого стану відбувалося за допомогою програми ANSYS, з використанням в'язко-пружних деформацій з різною межею плинності.

В результаті розрахунку отримані дані напружень та деформацій окремо для сухого та вологого масиву (рис. 4).

Максимальні напруження з зростанням навантаження моделі мають збільшуватися не за лінійним законом, так як у розрахунку задається поріг плинності, після якого відбуваються пластичні деформації (рис. 5).

Отже, у першому разі, де моделюється сухий масив, деформації навколо виробки не впливають на її стан (рис. 4), а зростання максимального напруження у масиві відбувається за законом полінома другого або третього ступеня (рис. 5).

У другому разі, де моделюється вологий масив, спостерігаємо значні деформації під час напружень, менших, ніж за сухого масиву на 12–15 МПа (рис. 4, 5). Такі деформації можуть впливати на робочий стан виробки. Отже, за 35–45 МПа навантаження моделі відбувається повна втрата робочого стану виробки (рис. 4). За 45 МПа навантаження максимальні напруження навколо виробки різко збільшуються – це зумовлено тим, що виробка втратила свою первісну форму, при цьому утворилися ділянки с гострими кутами, які є концентраторами напруження.

Зміна коефіцієнта концентрації напруження (рис. 6): для моделі з сухим масивом спостерігається тенденція нелінійного росту за навантаження 25 МПа, а потім зменшення концентрації напруження; для моделі з вологим масивом спостерігаються перепади концентрації напруження.

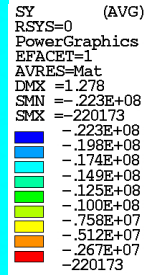
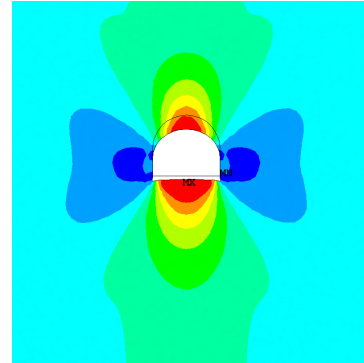
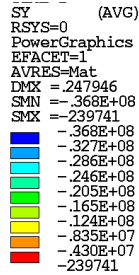
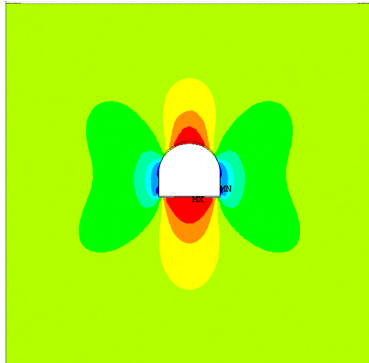
Ізолінії вертикальних напружень навколо виробки для різних умов навантаження та механічних властивостей порід.

P, МПа

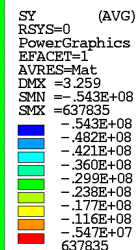
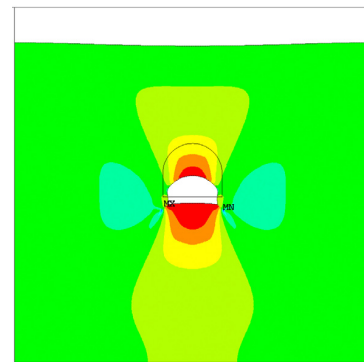
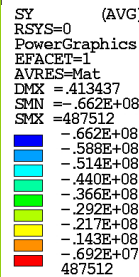
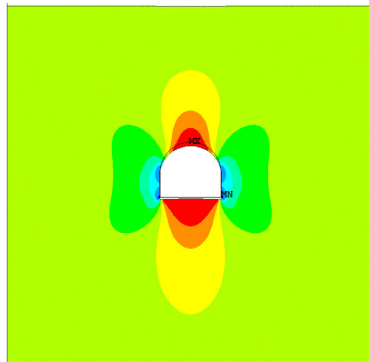
Сухий масив

Вологий масив

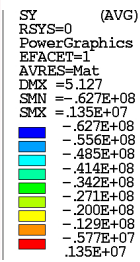
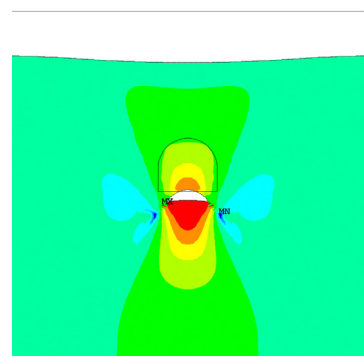
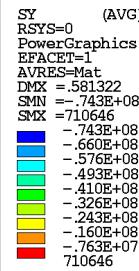
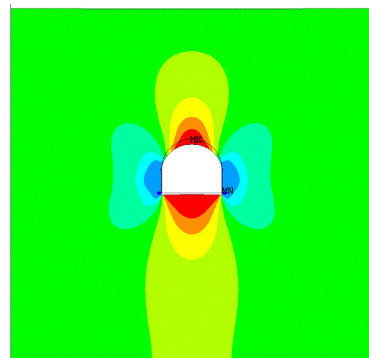
15 МПа



25 МПа



35 МПа



45 МПа

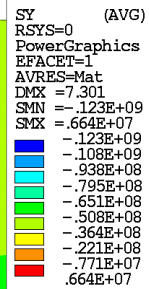
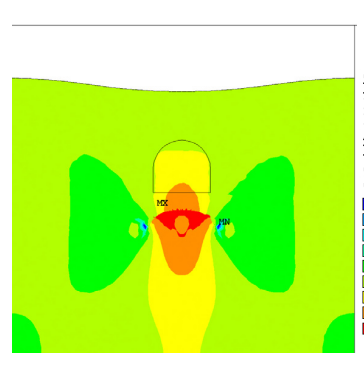
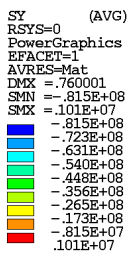
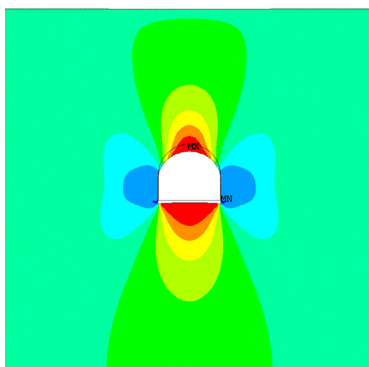


Рис. 4. Ізолінії вертикальних напружень навколо виробки для різних умов навантаження та механічних властивостей порід

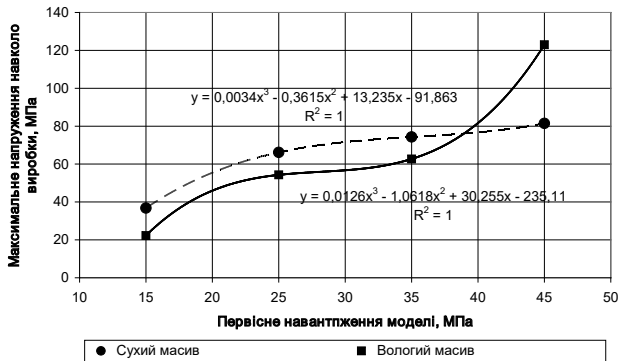


Рис. 5. Максимальне напруження навколо виробки для сухого і вологого масиву

Зона максимального опорного тиску для сухого масиву утворюється на контурі виробки, а для вологого масиву – вона має відстань від 1,5 м до 2,5 м до контуру виробки.

Зменшення корисної висоти виробки (рис. 7) для сухого масиву відбувається за лінійним законом, а для вологого – у вигляді поліному 3-го ступеня, де за навантаження 45 МПа вона дорівнює 0 м, тобто виробка «задавлена» (рис. 5).

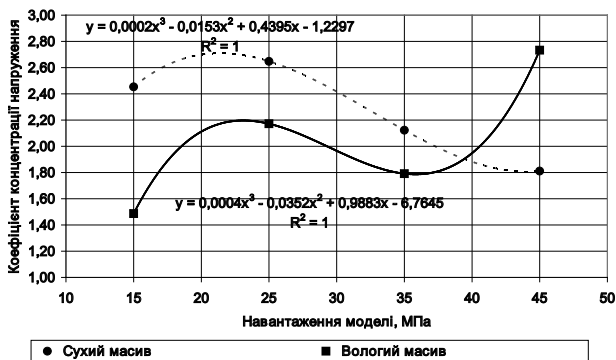


Рис. 6. Коефіцієнт концентрації вертикального напруження навколо виробки для сухого і вологого масиву

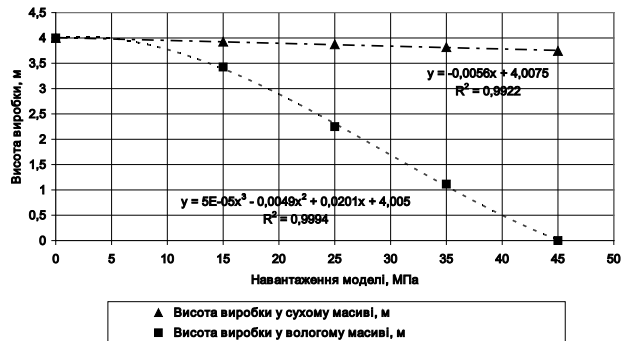


Рис. 7. Висота виробки для сухого і вологого масиву з урахуванням зсуву покрівлі та підшви

Отже, чисельне моделювання показало, яким чином на стан виробки впливають фізико-механічні властивості оточуючого масиву: де відбувається збільшення водопритоку у гірничі виробки, там змінюються механічні властивості порід, а саме це веде до втрати їх робочого стану.

**Висновки.** Таким чином, використання в'язко-пружних деформацій під час чисельного моделювання дає більш адекватні результати з визначення напружено-деформованого стану порід навколо гірничих виробок.

Зміна максимального напруження бічних порід (опорного тиску) сухого масиву відрізняється від максимального напруження бічних порід вологого масиву через вплив вологи на їх фізико-механічні властивості. Так, водопоширення у масиві змінює пружно-крихкі властивості порід на в'язко-пружні.

Отже, за зміни форми виробки у результаті дії пластичних деформацій також змінюється і коефіцієнт концентрації напруження. Пластичні деформації відбуваються поки є вільний простір для них, тому відбувається повне «здавлення» виробки.

**Список літератури:**

1. Яланський А.О., Сапунова І.О., Слашов А.І., Новіков Л.А. Обґрунтування вихідних параметрів для моделювання геомеханічних процесів в задачах оцінки безпеки підтримання гірничих виробок. ISSN 1607-4556 (Print), ISSN 2309-6004 (Online) *Геотехнічна механіка*. 2014. № 119, с. 282–295.
2. Сукнів С.В. Определение статического модуля упругости и коэффициента Пуассона горных пород при изменении влажности // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – № 7. – С. 108-116.
3. Jun Peng, Louis Ngai Yuen Wong, Guang Liu, Cee Ing Teh. Influence of initial micro-crack damage on strength and micro-cracking behavior of an intrusive crystalline rock/Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2018. URL: <https://doi.org/10.1007/s10064-018-1317-3>.
4. Balázs Vásárhelyi, Morteza Davarpanah. Influence of Water Content on the Mechanical Parameters of the Intact Rock and Rock Mass/Periodica Polytechnica Civil Engineering, p. 1–6. URL: <https://doi.org/10.3311/PPci.12173>.
5. Ya.O. Liashok, O.I. Serhienko, V.M. Kutserubov, O.P. Kohtieva, L.V. Serhienko. The influence of the moisture on the physical and mechanical properties of the sandstone (Separate Unit “Kapitalna” coal mine”, Donbas)/ISSN 2071-2227, E-ISSN 2223-2362, *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2020 № 2, p. 11–17.

6. Zhang, Wang, Wang, Zhang, 2019. Experimental Study on Mechanics and Permeability Properties of Water-Bearing Raw Coal Samples Under In-Situ Stress. Applied Sciences. URL: doi:10.3390/app9122549.
7. Li, D., Sun, Z., Zhu, Q., Peng, K., 2019. Triaxial Loading and Unloading Tests on Dry and Saturated Sandstone Specimens. Applied Sciences. URL: doi:10.3390/app9081689.
8. Meyers and Chawla (1999): “Mechanical Behavior of Materials”, 98–103.
9. McCrum, Buckley, and Bucknell (2003): “Principles of Polymer Engineering” p. 117–176.

**Serhienko O.I., Kohtieva O.P., Uvarov M.O. NUMERICAL MODELING OF VISCO-ELASTIC DEFORMATION OF A HOMOGENEOUS MASSIF AROUND OF A SINGLE WORKING SPACE**

*The article is considering the possibility to use of numerical simulations to investigate the stress-strain state of a homogeneous solid mass around a single working space with changes of the physical and mechanical properties of rocks, considering a visco-elastic deformation.*

*To determine the effect of moisture on the physical and mechanical properties of rocks, laboratory studies were performed with using sandstone samples from the mine “Capitalna” of the Donetsk coal basin.*

*Water saturation, in contrast to the dry state, as laboratory tests shown, leads to plastic deformation with a significant reduction in compressive strength. It was found that in the water-saturated state, the tensile strength and modulus of elasticity are decreased, and the coefficient of transverse deformations increased.*

*As a result of simulation shows that the zone of the maximum reference pressure for the dry massif is formed on the production contour and for the wet massif – it has a certain distance from the production contour by 1.5–2.5 m, it's depend on the stratification depth.*

*Under the action of pressure, a decrease in the useful height of production there is, for a dry massif according in linear fashion, and for a massif in the wet state the process is described as a polynomial of the degree 3. Stress on the model from 45 MP as is height of working space is equal to 0 m, that is the working space is “crushed”.*

*The change in the maximum stress of the lateral rocks (reference pressure) of the dry massif differs from the maximum stress of the lateral rocks of the wet massif due to the influence of moisture on their physical and mechanical properties. Consequently, the water distribution in the massif changes the properties of elastic-brittle rocks to visco-elastic ones.*

*When the shape of the working space is change as a result of the action of plastic deformations, the stress concentration coefficient is also change. Plastic deformations are occurring while a free space for them there is, so a complete “squeezing” of the work-piece there is.*

*Therefore, by modeling with using visco-elastic deformations, more adequate results can be obtained to determine the stress-strain state of rocks around the working space.*

**Key words:** *physical-mechanical properties, stress-strain state, water-saturation of rocks, numerical simulation, viscous-plastic deformation.*