

УДК 622.831.312 : 622.862.3

**Яланский А.А.**, д-р. техн. наук, ст. науч. сотр.  
**Сапунова И.А.**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.  
**Слащев А.И.**, магистр, аспирант  
**Новиков Л.А.**, магистр  
(ИГТМ НАН Украины)

## **ОБОСНОВАНИЕ ИСХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЗАДАЧАХ ОЦЕНКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПОДДЕРЖАНИЯ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК**

**Яланський А.О.**, д-р. техн. наук, ст. наук. співр.  
**Сапунова І.О.**, канд. техн. наук, ст. наук. співр.  
**Слащов А.І.**, магістр, аспірант  
**Новіков Л.А.**, магістр  
(ІГТМ НАН України)

## **ОБГРУНТУВАННЯ ВИХІДНИХ ПАРАМЕТРІВ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ГЕОМЕХАНІЧНИХ ПРОЦЕСІВ В ЗАДАЧАХ ОЦІНКИ БЕЗПЕКИ ПІДТРИМАННЯ ГІРНИЧИХ ВИРОБОК**

**Yalanskiy A.A.**, D.Sc. (Tech.), Senior Researcher  
**Sapunova I.O.**, Ph.D. (Tech.), Senior Researcher  
**Slashchov A.I.**, M.S (Tech.), Doctoral Student  
**Novikov L.A.**, M.S (Tech.)  
(IGTM NAS of Ukraine)

## **JUSTIFICATION OF THE INITIAL PARAMETERS FOR GEOMECHANICAL PROCESSES MODELING IN PROBLEMS OF SAFETY ASSESSMENT OF MINE WORKINGS MAINTENANCE**

**Аннотация.** Для решения задач обеспечения устойчивости и безопасности поддержания горных выработок рассмотрены особенности задания в геомеханических моделях физико-механических свойств обводненных и газонасыщенных горных пород.

На базе анализа и обобщения закономерностей изменения физико-механических свойств пород под воздействием нагружения, обводнения и газонасыщения как основных факторов их разрушения установлено, что водонасыщение образцов пород приводит к полной потере сопротивления сжатию у 4 % известняков, 13 % песчаников, 62 % алевролитов, 89 % аргиллитов, при этом средние пределы сопротивления сжатию снижаются для алевролитов и аргиллитов в 2,5-2,6 раз, для песчаников и известняков в 1,5 раза. Получены зависимости прочности горных пород на одноосное сжатие от глубины с учетом остаточной прочности разрушенных пород, при этом прочность водонасыщенных пород меньше, а коэффициент вариации больше, чем в естественном состоянии. Доказано, что при водонасыщении породы имеют больший разброс значений коэффициентов вариации, чем в сухом состоянии. Так для водонасыщенных песчаников и известняков этот показатель больше на 13,6-15,4 %, а для глинистых аргиллитов и алевролитов на 26,8-26,9 %, то есть прослеживается рост разброса прочности пород в результате водонасыщения на 44-58 %. Это позволило формализовать граничные условия для вычислительных экспериментов на уровне критических (минимально возможных) или усредненных параметров с учетом остаточной прочности пород.

© А.А. Яланский, И.А Сапунова, А.И. Слащев, Л.А. Новиков

**Ключевые слова:** моделирование, геомеханика, физико-механические свойства пород, водонасыщенность, газонасыщенность, напряженно-деформированное состояние.

Устойчивость породного массива и его несущая способность в значительной степени зависят от соотношений напряжений, действующих в массиве, к прочностным и деформационным свойствам пород. Анализ современных горно-геологических условий отработки угольных пластов показал, что их особенностью являются малая мощность (0,4-1,8 м), большая глубина ведения очистных работ (600-1400 м), высокая газонасыщенность (8-22 м<sup>3</sup>/т) и обводненность вмещающих пород. В таких условиях объективную оценку эффективности и безопасности поддержания горных выработок можно выполнить только путем моделирования геомеханических процессов. Вместе с тем, для итерационных компьютерных технологий, которые на сегодняшний день являются наиболее перспективными для анализа таких сложных геомеханических и фильтрационных процессов, недостаточно обоснованы исходные параметры по учету изменения физико-механических свойств влаго- и газонасыщенных горных пород. Поэтому такие исследования являются актуальными не только при работе угольных шахт, но, в особенности, при их консервации или закрытии.

Предварительный анализ и обобщение усредненных значений основных физико-механических свойств осадочных пород, которые подвержены влиянию факторов обводнения и газонасыщения, проведен по данным ИГТМ НАН Украины, ДонУГИ и др. организаций [1-8], табл. 1.

Известно, что физико-механические свойства горных пород зависят от их минералогического состава и строения. При этом можно выделить несколько важнейших групп породообразующих минералов, оказывающих существенное, и притом различное, влияние на механические свойства горных пород: кварцевые минералы – кварц, кремень, халцедон и др.; силикатные материалы – полевой шпат, амфибол, пироксен, слюда и др.; карбонатные и глинистые гидрофильные минералы – кальцит, доломит, каолинит и др.; легкорастворимые минералы – гипс, галит, сильвин и др. Наивысшей прочностью и упругостью обладают кварцевые породы с кремнистой цементацией (кремнистые песчаники и кварциты). Высокую прочность имеют силикатные породы. Однако с повышением содержания слюдистых минералов показатели прочности снижаются. При наличии в породе глинистых и легкорастворимых минералов ее прочность и упругость резко уменьшаются [2, 5].

Предел прочности горных пород на одноосное сжатие изменяется в широком диапазоне, например, по данным ПО «Артемгеология» прочность песчаников 18-212 МПа, песчаных сланцев 15-182 МПа и глинистых сланцев 8-98 МПа, а по данным ПО «Луганскгеология» соответственно 34-110, 28-62 и 18-40 МПа. Иные авторы приводят в своих работах еще более широкий диапазон изменения свойств пород [2, 9].

Осадочные горные породы обладают слоистостью и анизотропией прочностных свойств. Общей закономерностью всех свойств является зависимость их от степени катагенеза, поэтому свойства изменяются с глубиной, наиболее заметные изменения наблюдаются на ранних стадиях катагенеза. С ростом глу-

бины залегания пород от 200 до 1200 м их прочность может увеличиваться в 1,5 раза для газовой стадии метаморфизма и на 5-8 % для антрацитов [9]. Отмечается большее упрочнение с глубиной песчаника по сравнению с глинистыми породами [5, 9].

Таблица 1 – Усредненные значения упругих и прочностных свойств пород

Порода	Модуль упругости $E \times 10^{-4}$ , МПа	Коэффициент Пуассона, $\mu$	Объемный вес $\gamma$ , т/м <sup>3</sup>	Сцепление $\tau_0$ , МПа	Угол внутреннего трения $\varphi$ , град.	Предел прочн. на сжатие $\sigma_{сж}$ , МПа	Предел прочн. на растяжение $\sigma_p$ , МПа
Песчаники <sup>(1)</sup>	3,0-8,0	0,13-0,5	2,53-2,8		22	80-310	10-40
Песчаники <sup>(2)</sup>	3,52					147	2,7
Песчаники <sup>(3)</sup>	2,0-4,0	0,1-0,3	1,9	15,0	38	72-100	
Песчаники <sup>(4)</sup>	4,47	0,28	2,55	27,0	45	74	9
Песчаники креп. трещ. <sup>(5)</sup>	1,8-2,2	0,24-0,25	2,4-2,6	20	30-32		
Алевролиты <sup>(1)</sup>	1,5-8,2	0,16-0,34	2,58-2,89			25-212	5-18
Алевролиты <sup>(3)</sup>	1,0-3,0	0,2-0,3	2,6		30	40-100	
Алевролиты <sup>(4)</sup>	4,42	0,3	2,0	18,7	33	52	7,9
Алевролиты кр. трещ. <sup>(5)</sup>	0,5	0,15		20	25		
Песчаные сланцы <sup>(2)</sup>	2,61	0,15-0,4				80	2,1
Песчаные сланцы <sup>(3)</sup>	1,0-3,0					35-83	
Аргиллиты <sup>(1)</sup>	0,6-1,4	0,2-0,25	2,45-2,83			7-70	1-7
Аргиллиты <sup>(3)</sup>	1,0-4,5	0,17-0,25			30	38-110	
Аргиллиты <sup>(4)</sup>	3,5	0,29	2,7	13,6	41	26	6,6
Аргиллиты креп. трещ. <sup>(5)</sup>	1,3	0,33	2,4	4	20		
Глинистые сланцы <sup>(1)</sup>	1,6-4,5	0,15-0,27	2,58-2,82			56-150	1-17
Глинистые сланцы <sup>(3)</sup>	1,0-4,0	0,22				14-58	
Известняки <sup>(3)</sup>	4,0-8,0	0,27			27	12-25	
Известняки <sup>(4)</sup>	5,0	0,2	2,71			84	10
Известняки трещ. <sup>(5)</sup>	1,0	0,2	2,1	3	25		

Примечание. По данным: 1 – И.А. Турчанинова; 2 – Б.М. Усаченко; 3 – И.В. Баклашова; 4 – С.С. Гребенкина; 5 – Г.Т. Кирничанского

Анализ проведенных в ИГТМ НАН Украины лабораторных исследований более 3000 образцов показал, что водонасыщение пород в течение 20 суток приводит к размоканию и полной потере сопротивления сжатию у 3,6 % образцов известняков, 12,8 % образцов песчаников, 62,0 % образцов алевролитов, 89,6 % образцов аргиллитов. Испытания аргиллитов при воздушно-сухом и во-

донасыщенном состоянии показали, что увеличение влажности образца одной и той же пробы на 2,5% снижает сопротивление сжатию в два раза, а при влажности 5 % многие образцы за 20 суток практически полностью теряют способность сопротивляться сжатию. За то же время больше половины алевролитов и известняков размокают и полностью теряют способность сопротивляться сжатию. Песчаники в большинстве случаев размокают слабо, а скорость их размокания, чаще всего, превышает 20 суток.

Похожий результат показывают данные по определению скорости и формы разрушения пород в воде. Полностью разрушаются и превращаются в бесформенную массу 98 % всех испытанных проб аргиллитов, 88 % алевролитов, и 26 % образцов песчаников, относящихся к углям марки Д. Вместе с тем, породы, приуроченные к углям марки Г, более устойчивы к размоканию и разрушались в 69 % образцов алевролитов и 87 % аргиллитов. Песчаники, в большинстве случаев, в воде разрушаются слабо [4, 6].

Интенсивность деформаций глинистых пород зависит от их минералогического состава. Для глин монтмориллонитовой группы число пластичности свыше 20-30, а набухаемость более 20-40 %. Каолинитовые глины менее пластичны (пластичность 5-15 %), но с увеличением глубины склонны к интенсивному пучению.

Поскольку глинистые породы в 60-90 % лабораторных экспериментов размокают полностью, то в геомеханических расчетах их прочностные свойства можно корректно учитывать только в том случае, если принять в модели для области сжатия (замкнутого объема породного массива) прочность полностью разрушенных водонасыщенных глинистых пород равной их остаточной прочности при объемном сжатии. Обобщенные таким образом корреляционные зависимости показаны на рис. 1.

При недостатке исходных данных рационально использовать усредненные показатели физико-механических свойств пород. Средние значения прочности исследуемых аргиллитов и алевролитов находятся в пределах 15-46 МПа, песчаников – 47-70 МПа, известняков – 55-82 МПа. Средние пределы сопротивления сжатию при водонасыщении снижаются: для аргиллитов в 2,6 раза, для алевролитов в 2,5 раза, для песчаников и известняков в 1,5 раза.

Установленные общие закономерности влияния длительного влагонасыщения на прочностные и деформационные свойства углевмещающих осадочных пород (глинистых аргиллитов и алевролитов, песчаников и известняков) позволили обосновать степень их устойчивости к фактору обводнения, и нашли применение при решении ряда задач прикладного и научного характера. Вместе с тем, точность аппроксимации прочностных свойств пород зависит от степени разброса данных. Чем ближе данные к аппроксимирующей функции, тем более точной является используемая модель. При расчете параметров устойчивости горных выработок предложено использовать усредненные показатели физико-механических свойств горных пород с учетом не только глубины, условий залегания, стадии катагенеза и др., но и коэффициентов вариации [10].

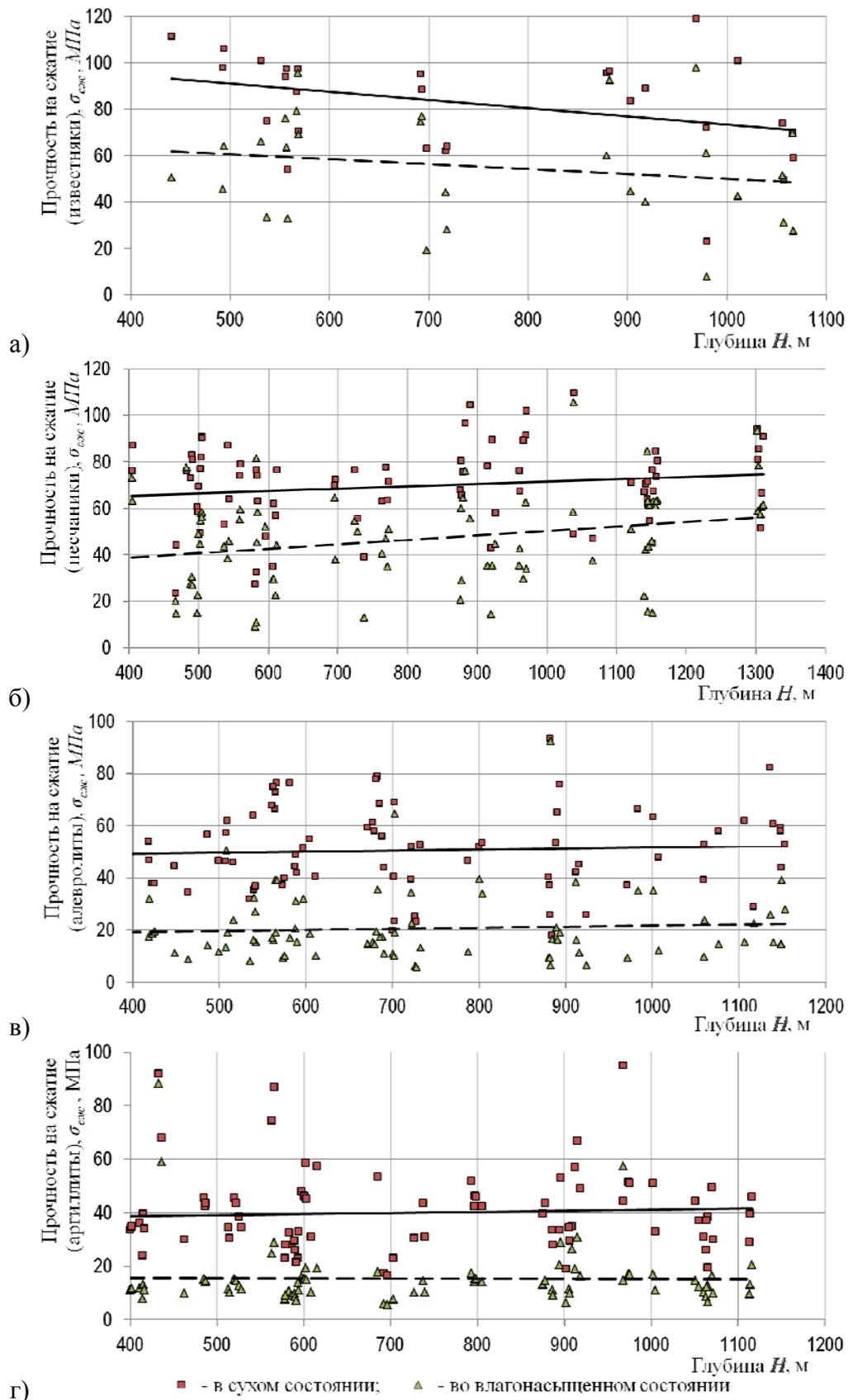


Рисунок 1 – Зависимости прочности на сжатие горных пород от влагонасыщения с учетом остаточной прочности разрушенных пород : а – известняков ( $\sigma_{сж} = -0,036H + 108,8$ ;  $\sigma_{сж}^W = -0,021H + 70,9$ ); б – песчаников ( $\sigma_{сж} = 0,01H + 61,2$ ;  $\sigma_{сж}^W = 0,019H + 31,2$ ); в – алевролитов ( $\sigma_{сж} = 0,004H + 47,8$ ;  $\sigma_{сж}^W = 0,004H + 17,6$ ); г – аргиллитов ( $\sigma_{сж} = 0,004H + 37,0$ ;  $\sigma_{сж}^W = H + 15,9$ )

Такой подход достаточно обоснован, так как по коэффициентам вариации, характеризующим усредненный разброс прочностных свойств, можно судить об однородности совокупности, устойчивости значений признака, типичности среднего значения. Коэффициенты вариации прочности определялись из соотношения

$$V = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\sigma_{сж_i} - \overline{\sigma_{сж_i}})^2}}{\overline{\sigma_{сж_i}}} \quad (2)$$

Для определения коэффициентов  $a$  и  $b$  аппроксимирующих линейных моделей  $\sigma_{сж} = aH + b$  изменения значений данных для выборки, содержащей  $n$  элементов, использовано известное выражение метода наименьших квадратов:

$$a = \frac{n \sum_{i=1}^n H_i \sigma_{сж_i} \sum_{i=1}^n H_i - \left( \sum_{i=1}^n H_i \right) \left( \sum_{i=1}^n \sigma_{сж_i} \right)}{n \sum_{i=1}^n H_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n H_i \right)^2}; \quad b = \overline{\sigma_{сж_i}} - a \overline{H}; \quad (1)$$

где  $H_i$ ,  $\sigma_{сж_i}$  и  $\overline{H}$ ,  $\overline{\sigma_{сж_i}}$  – текущие и средние значения выборок соответственно.

Исследованиями установлено, что коэффициенты вариации прочности пород зависят от их влагонасыщенности, рис. 2. При влагонасыщении породы имеют больший разброс средних значений коэффициентов вариации, чем в сухом состоянии. Для глинистых аргиллитов и алевролитов этот показатель составил ~ 48-58 %, для песчаников и известняков ~ 44-52 %. То есть при водонасыщении прослеживается закономерность увеличения на ~ 44-58 % разброса прочности пород от разброса прочности пород в сухом состоянии.



Рисунок 2 – Изменения вариации прочности пород на сжатие в зависимости от их влагонасыщенности с учетом остаточной прочности полностью разрушенных пород

Коэффициенты вариации необходимы для учета неблагоприятных горно-

геологических условий залегания пород и учитываются предложенной методикой, которая предусматривает расчет нагруженности модели при критических (минимально возможных) и усредненных параметрах прочности. При необходимости, для большей достоверности результатов расчетов можно произвести привязку к конкретным горно-геологическим условиям на основе испытаний минимального количества проб либо ограниченного объема геофизических измерений, не надеясь при этом на высокую представительность отобранных проб.

Для предотвращения пучения пород в подготовительных выработках необходимо учитывать влияние набухания глинистых пород в водной среде. Ярко выраженным набуханием обладают глинистые осадочные горные породы слоистой структуры, причем оно происходит по направлению, перпендикулярному слоистости. Это сложный физико-химический процесс, приводящий к деформации и разрушению горной породы. Набухание в одних случаях приводит к распаду дисперсной структуры пород вокруг выработок, обвалам с образованием каверн, в других – к быстрому снижению сечения выработки вследствие пластической деформации. При определенном сочетании влияющих факторов, доля пучения почвы в общей вертикальной конвергенции может достигать 80 %, которая зависит, в том числе и от времени полного набухания глинистых пород.

Изучение влияния длительного взаимодействия глинистых пород с водой на изменение их состава и свойств выполнялось сотрудниками ИГТМ НАНУ на образцах аргиллитов и известняков с различными показателями степени дисперсности, минерального состава, состояния и типа структурных связей. Вследствие обводнения произошло изменение их механических свойств, что нашло свое отражение в их деформационном поведении и, в частности, в уменьшении прочности. Закономерность полного набухания образцов аргиллита, представленная линейной моделью, в зависимости от содержания влаги показана на рис. 3.

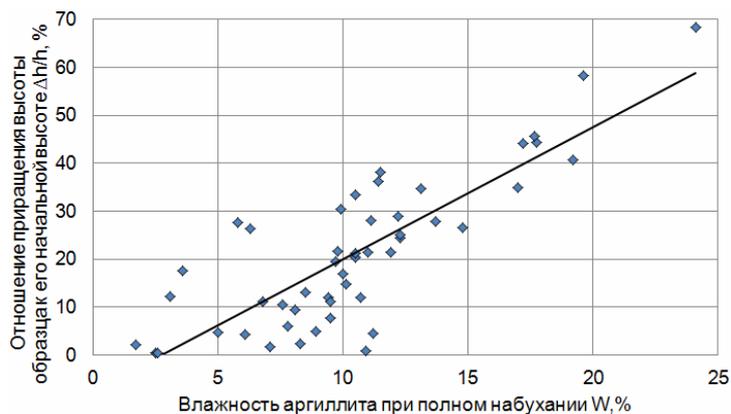


Рисунок 3 – Линейная модель набухания аргиллита в зависимости от влажности ( $\Delta h/h = 2,76W - 7,68$ )

Угольные пласты на больших глубинах чаще всего газонасыщены. Начало разрушения газонасыщенных углей происходит при напряжениях на 11-23 МПа

меньших, чем дегазированных [11]. При переходе угля в предельное состояние модуль упругости углей уменьшается независимо от газонасыщения. При этом модуль упругости газонасыщенных образцов на 45-60 % ниже, чем дегазированных. У образцов с низкой степенью газонасыщенности (меньше  $6 \text{ м}^3/\text{т}$ ) механизм разрушения обусловлен развитием деформаций сдвига. При критическом содержании физически связанной влаги в угле модуль сдвига в 2,5-3,0 раза меньше, чем у сухого угля, а его разрушение происходит только за счет деформаций сдвига. Снижение прочности с ростом влажности породы объясняется образованием слоев связанной воды. Предел прочности угля на сжатие с повышением его влажности значительно уменьшается, например, при увеличении влажности до 3 % предел прочности на сжатие уменьшается до 40 %.

Расчеты напряженно-деформированного состояния массива пород проведены вычислительным комплексом «GEO-RS» (разработка ИГТМ НАН Украины) на базе методологии оценки упругопластического деформирования с применением принципов, изложенных в работах [12-14]. Физические свойства элементов геомеханической расчетной схемы установлены по результатам лабораторных исследований (табл. 2) и задавались автоматически для каждого элемента расчетной схемы, для которых в результате расчетов были получены численные значения смещений узлов, напряжений и деформаций. Значения коэффициента Пуассона и объемного веса угля для однотипных вычислительных экспериментов были приняты постоянными ( $\mu=0,29$  и  $\gamma=0,02 \text{ МН}/\text{м}^3$ , соответственно).

Таблица 2 – Упругие и прочностные свойства аргиллитов

Влагонасыщенность	Свойства пород
Естественная влажность (0,3-2,0%), минимальные значения, $W_{\min}$	$E=14 \times 10^3 \text{ МПа}$ ; $\tau_0=11,7 \text{ МПа}$ ; $\varphi=41 \text{ град}$ ; $[\sigma]=53 \text{ МПа}$ ; $\mu=0,25$ ; $\gamma=0,025 \text{ МН}/\text{м}^3$
Естественная влажность (2-3%), средние значения, $W_{\text{mean}}$	$E=11 \times 10^3 \text{ МПа}$ ; $\tau_0=9,6 \text{ МПа}$ ; $\varphi=35 \text{ град}$ ; $[\sigma]=37 \text{ МПа}$ ; $\mu=0,25$ ; $\gamma=0,025 \text{ МН}/\text{м}^3$
Естественная влажность (3-4%), максимальные значения, $W_{\max}$	$E=8 \times 10^3 \text{ МПа}$ ; $\tau_0=4,7 \text{ МПа}$ ; $\varphi=27 \text{ град}$ ; $[\sigma]=15 \text{ МПа}$ ; $\mu=0,25$ ; $\gamma=0,025 \text{ МН}/\text{м}^3$
Слабообводненные, (~50% объема пор), $W$	$E=4,7 \times 10^3 \text{ МПа}$ ; $\tau_0=3,8 \text{ МПа}$ ; $\varphi=25 \text{ град}$ ; $[\sigma]=12 \text{ МПа}$ ; $\mu=0,25$ ; $\gamma=0,025 \text{ МН}/\text{м}^3$
Сильнообводненные (~80% объема пор), $W$	$E=2,8 \times 10^3 \text{ МПа}$ ; $\tau_0=3,0 \text{ МПа}$ ; $\varphi=22 \text{ град}$ ; $[\sigma]=9 \text{ МПа}$ ; $\mu=0,25$ ; $\gamma=0,025 \text{ МН}/\text{м}^3$

Результаты расчета максимальных главных напряжений исследованы по горизонтальным и вертикальным сечениям в призабойной зоне угольного пласта, рассмотрены условия сухого дегазированного и обводненного газонасыщенного пласта угля. Наибольшие напряжения в призабойной зоне испытывает угольный пласт, пиковые значения которых на 15-25 % выше, чем в аргиллитах кровли и почвы (расчеты выполнены для глубины разработки 1000 м). В зоне

опорного давления повышенные значения напряжений (коэффициент концентрации напряжений от 1,3 до 3,5-4,5) прослеживаются на расстоянии от забоя до 6 м, пиковые нагрузки (коэффициент концентрации напряжений выше 2,0) – на расстоянии до 1,5-2 м.

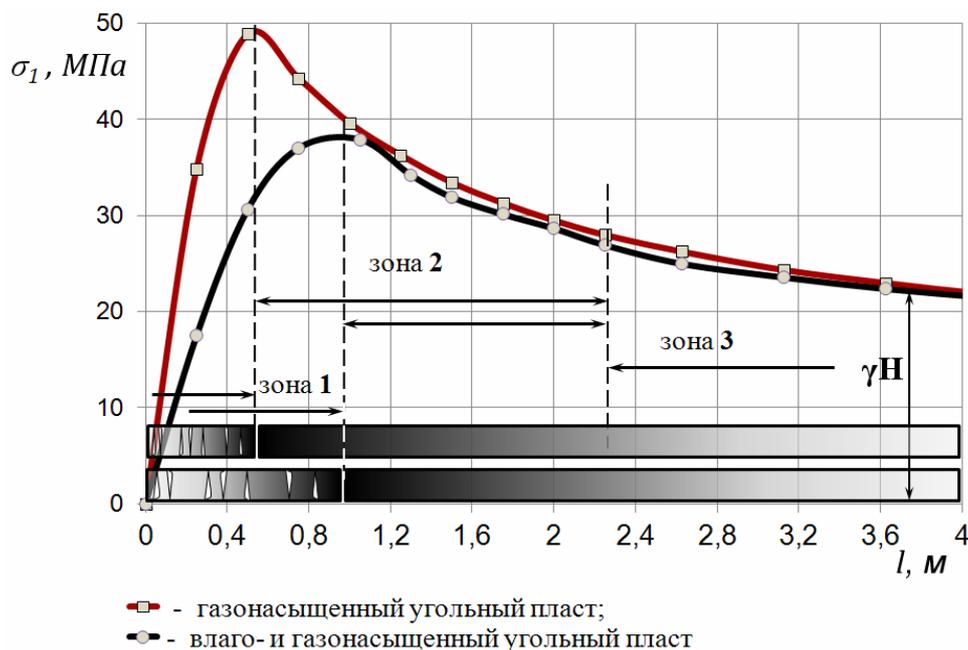


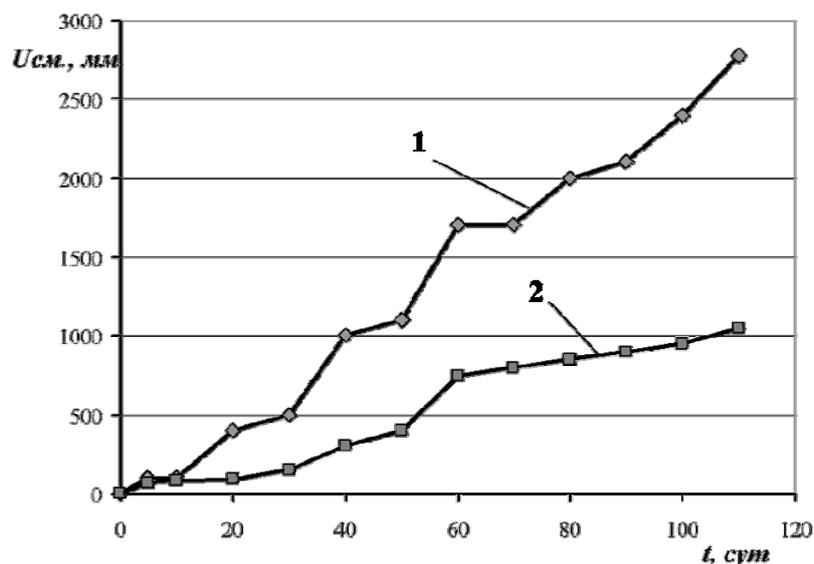
Рисунок 4 – Закономерность изменения характера опорного давления в газонасыщенном угольном пласте при его влагонасыщении

Механизм деформирования краевой части угольного пласта основан на том, что в угольном пласте, так как он является упругопластическим телом, под нагрузкой зонально развиваются как упругие, так и пластические деформации. В зоне 1 (зона отжима пласта, рис. 4) за счет отжима угля в сторону забоя, происходит образование трещин, и вследствие этого, снижение максимальных главных напряжений в призабойной части угольного пласта. Зоны 2 и 3 – области упругого деформирования пласта. Зона опорного давления (зона 2) характеризуется тем, что угольный массив, исчерпав начальные пластические деформации за счет закрытия естественной трещиноватости, под воздействием приложенной нагрузки приближается по свойствам к упругому телу. При этом происходит снижение уровня напряжений. Из рисунка видно, что водонасыщение массива приводит к смещению вглубь массива зон 1 и 2. В зоне стабилизации напряжений (зона 3) максимальные главные напряжения плавно снижаются до уровня исходных напряжений. Зона опорного давления в увлажненном массиве расположена на 0,5-0,8 м и более от обнажения вглубь от забоя лавы, что обусловлено увеличением пластических свойств угольного пласта и расширением зоны неупругих деформаций в призабойной части массива.

В зоне неупругих деформаций, которая соответствует зоне отжима, на расстоянии 0,15 м от груди забоя водонасыщение газонасыщенного угольного пласта приводит к уменьшению сжимающих напряжений до 55 %. Однако, разница между напряжениями, возникающими в водонасыщенном газонасыщенном уг-

ле и газонасыщенном угле, с отдалением от обнажения уменьшается. В зоне упругих деформаций максимальные главные напряжения при водонасыщении газонасыщенного угля практически не меняются. Доминантным фактором в этом процессе является то, что увеличение трещиноватости больше повлияло на изменение напряжений в водонасыщенном угле по причине его низкой прочности. Вместе с тем, повышенная прочность сухого дегазированного угля приводит к еще большему перепаду напряжений (около 60 МПа) ввиду большего отпора в кровле и почве пласта разрушающим нагрузкам.

Мониторинг почвы полевой выработки пласта  $m_3$  горизонта 1280 м шахты им. А.Ф. Засядько (рис. 5) показал, что интенсивность пучения значительно возрастает вследствие локального обводнения выработок. Учитывая тот факт, что без учета водонасыщения смещения почвы в выработку обусловлены только ее напряженно-деформированным состоянием, очевиден вывод, что разница между двумя графиками смещений связана с обводнением выработки.



1 – при водонасыщении, 2 – без водонасыщения

Рисунок 5 – Влияние водонасыщения пород на пучение почвы

Сопоставление полученных данных при обводнении и без обводнения показали, что разница смещений почвы вначале увеличивается во времени по линейной зависимости и имеет тесную корреляционную связь. Отношение величины пучения при попадании воды на почву выработки к смещениям сухой выработки за 20 суток увеличивается в 1,5-4,5 раза (рис. 6, изменения пучения без обводнения было принято за 100 %), затем наблюдается снижение пучения и после 60 суток – его стабилизация.

Таким образом, для решения задач обеспечения устойчивости и безопасности поддержания горных выработок путем моделирования геомеханических процессов обоснованы исходные параметры, полученные на базе закономерностей изменения физико-механических свойств пород под воздействием нагружения, обводнения и газонасыщения как основных факторов их разрушения.

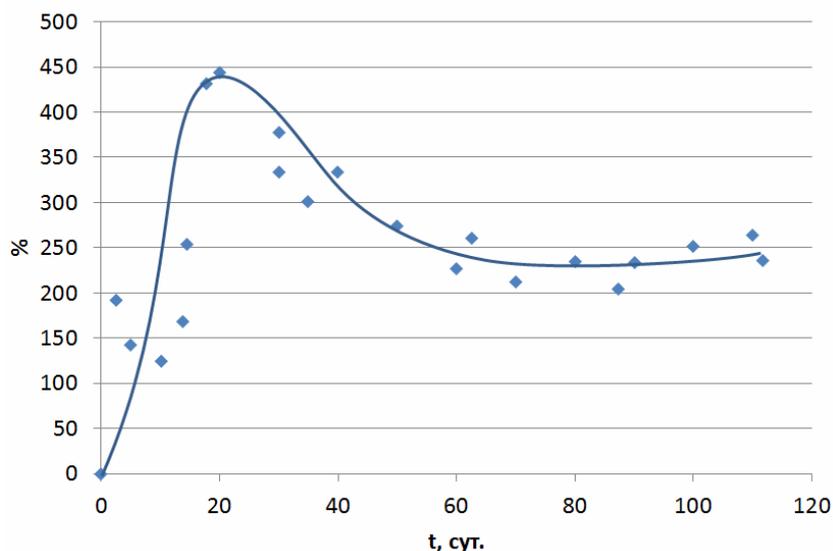


Рисунок 6 – Залежність інтенсивності росту пучення при обводненні ґрунту виробничої ділянки з часом

Установлено, що водонасичення образців порід в течение 20 суток приводить к размоканию и полной потере сопротивления сжатию у 4 % известняков, 13 % песчаников, 62 % алевролитов, 89 % аргиллитов, при этом средние пределы сопротивления сжатию при водонасичении снижаются для алевролитов и аргиллитов в 2,5-2,6 раз, для песчаников и известняков в 1,5 раза.

Залежності прочности горних порід на одноосне сжатие от глубины во влагонасиченом и сухом состоянии с учетом остаточной прочности разрушенных порід имеют линейный характер, при этом прочность водонасиченных порід меньше, а коэффициент вариации больше, чем в естественном состоянии.

Полное набухание практически всех образцов аргиллитов происходит до 20 суток, при этом время набухания 84 % образцов составляет от 10 до 20 суток при влажности от 3 % до 24 %, средняя величина полного набухания составляет 15-20 %, максимальная – 60 %.

При увлажнении газонасыщенного угля зона опорного давления сдвигается от обнажения вглубь массива на 40 % от начального расстояния, что обусловлено увеличением пластических свойств угольного пласта и расширением зоны неупругих деформаций в призабойной части массива, при этом пиковая величина опорного давления снижается на 25%.

Коэффициенты вариации прочности дренированных порід составляют для известняков и песчаников 18-20 %, для аргиллитов и алевролитов 29-29 %. Доказано, что при водонасичении породы имеют больший разброс средних значений коэффициентов вариации, чем в сухом состоянии. Так для водонасиченных песчаников и известняков этот показатель больше на 13,6-15,4 %, а для глинистых аргиллитов и алевролитов на 26,8-26,9 %, то есть прослеживается рост разброса прочности порід в результате водонасичения на 44-58 %. Это дает возможность формализовать граничные условия в вычислительных экспериментах на уровне критических (минимально возможных) или усредненных

параметрах с учетом остаточной прочности полностью разрушенных пород.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Глушко, В.Т. Геофизический контроль в шахтах и тоннелях / В.Т. Глушко, В.С. Ямщиков, А.А. Яланский. – М.: Недра, 1987.
- 2 Турчанинов, И.А. Основы механики горных пород / И. А. Турчанинов, М. А. Иосиф, Э. В. Каспарьян. – Л. : Недра, 1989. – 488 с.
- 3 Баклашов, И. В. Механика подземных сооружений и конструкций крепей. / И. В. Баклашов, Б. А Картозия. – М. : Недра, 1984. – 415 с.
- 4 Усаченко, Б.М. Охрана подготовительных выработок глубоких горизонтов шахт Западного Донбасса / Б. М. Усаченко, В. Я. Кириченко, А. В. Шмиголь. – М. : ЦНИЭИуголь, 1992. – 168 с.
- 5 Кирничанский, Г.Т. Исследование и разработка методов определения свойств горных пород и математического моделирования как основа прогнозирования устойчивости выработок : дис... канд. техн. наук : 01.02.07 / Кирничанский Георгий Тимофеевич. – Днепропетровск, 1979. – 204 с.
- 6 Усаченко, Б.М. Свойства пород и устойчивость горных выработок / Б. М. Усаченко. – Киев : Наук. думка, 1979. – 136 с.
- 7 Свойства горных пород и методы их определения / Е. И. Ильницкая, Р. И. Тедер, Е. С. Ватолин [и др.]. – М. : Недра, 1969. – 392 с.
- 8 Овчаренко, Б.П. Механизм трещинообразования в кровле угольных пластов / Б.П. Овчаренко. – Л.: Изд-во Ленинградского ун-та, 1983. – 172 с.
- 9 Глушко, В.Т. Ультразвук в разведочном бурении / В.Т. Глушко, П.К. Кучеба, А.М. Куц и др. – Донецк: Донбасс, 1974. – 70 с.
10. Слащева, Е.А. Разработка методики экспресс-оценки напряженно-деформированного состояния породного массива вокруг геотехнических объектов: дис... канд. техн. наук: 05.15.11 / Е.А. Слащева. – Днепропетровск: ИГТМ НАНУ, 2007. – 204 с.
- 11 Алексеев, А.Д. Физика угля и горных процессов / А.Д. Алексеев. – К.: Наукова думка, 2010. 424 с.
12. Zienkiewicz, O.C. (1971) *The Finite Element Method in Engineering Science*, McGraw-Hill, New York.
13. Слащев, И.Н. Применение информационных технологий для повышения эффективности и безопасности горных работ / И.Н. Слащев // Уголь Украины. – 2013. – № 2. – С. 40-43.
14. Слащев, И.Н. Оптимизация информационной системы оперативного прогноза геомеханических процессов для поддержки принятия решений по безопасности шахт / И.Н. Слащев, В.Г. Шевченко, А.И. Слащев // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2013. – Вып. 112. – С. 129-144.

#### REFERENCES

1. Glushko, V.T., Yamshchikov, V.S. and Yalanskiy, A.A. (1987), *Geofizicheskiy kontrol v shakhtakh i tonnellyakh* [Geophysical control in mines and tunnels], Nedra, Moscow, RU.
2. Turchaninov, I.A., Iosif, M.A. and Kasparyan, E.V. (1989), *Osnovy mekhaniki gornykh porod* [Fundamentals of Rock Mechanics], Nedra, Leningrad, RU.
3. Baklashov, I. V. and B.A. Kartoziya (1984), *Mekhanika podzemnykh sooruzheniy i konstruktsey krepey* [Mechanics of underground constructions and structures of supports], Nedra, Moscow, RU.
4. Usachenko, B.M., Kirichenko, V.YA. and Shmigol, A.V. (1992), *Okhrana podgotovitelnykh vyrabotok glubokikh gorizontov shakht Zapadnogo Donbassa* [Protection of development workings deep horizons of mines of Western Donbass], TSNIIEugol, Moscow, RU.
5. Kirnichanskiy, G.T. (1979), *Issledovaniye i razrabotka metodov opredeleniya svoystv gornykh porod i matematicheskogo modelirovaniya kak osnov prognozirovaniya ustoychivosti vyrabotok* [Research and development of methods for determining the properties of rocks and mathematical modeling as foundations for predicting of workings stability], Ph.D. dissertation, Mechanics of Granular Bodies Grounds and Rocks, Institute of Geotechnical Mechanics under the NAS of Ukraine, Dnepropetrovsk, UA.
6. Usachenko, B.M.(1979), *Svoystva porod i ustoychivost gornykh vyrabotok* [Rock properties and stability of mine workings], Nauk. dumka, Kiev, UA.
7. Ilnitskaya, Ye.I., Teder, R.I., Vatolin, Ye.S, et al. (1969), *Svoystva gornykh porod i metody ikh opredeleniya* [Rock properties and methods of their determination], Nedra, Moscow, RU.
8. Ovcharenko, B.P. (1983), *Mekhanizm treshchinoobrazovaniya v krovle ugolnykh plastov* [The me-

chanism of crack in the roof coal seams], Publishing House of Leningrad University, Leningrad, RU.

9. Glushko, V.T., Kucheba, P.K., Kushch, A.M., et al. (1974), *Ultrazvuk v razvedochnom burenii* [The use of ultrasound in exploration drilling], : Donbass, Donetsk, UA.

10. Slashcheva, Ye.A. (2007), The elaboration of the methodic for the express-estimation the stress-strained state of rock mass around the geotechnical installation, Ph.D. dissertation, Physical processes of mining, M.S. Poljakov Institute of Geotechnical Mechanics under the NAS of Ukraine, Dnepropetrovsk, UA.

11. Alekseyev, A.D. (2010), *Fizika uglya i gornykh protsessov* [Physics of coal and mining processes], Nauk. dumka, Kiev, UA.

12. Zienkiewicz, O.C. (1971), *The Finite Element Method in Engineering Science*, McGraw-Hill, New York.

13. Slashev, I.N. (2013), "The use of information technology to increase the efficiency and safety of mining operations", *Coal of Ukraine*, vol. 2, pp. 40-43, UA.

14. Slashev, I.N., Shevchenko, V.G. and Slashchov, A.I. (2013), "Optimized information system for on-line predicting of geomechanical process behavior and ensuring proper decision-making on the mine safety", *Geotekhnicheskaya Mekhanika* [Geo-Technical Mechanics], no. 112, pp. 129-144, UA.

### Об авторах

**Яланский Анатолий Александрович**, доктор технических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник в отделе Механики горных пород, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепропетровск, Украина, [YalanskiyA@rambler.ru](mailto:YalanskiyA@rambler.ru)

**Сапунова Ирина Александровна**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник в отделе Проблем разработки месторождений на больших глубинах, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепропетровск, Украина, [gtm.igtm@gmail.com](mailto:gtm.igtm@gmail.com)

**Слащев Антон Игоревич**, магистр, аспирант, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепропетровск, Украина, [SlashovAnton@ya.ru](mailto:SlashovAnton@ya.ru)

**Новиков Леонид Андреевич**, инженер, младший научный сотрудник в отделе проблем разработки месторождений на больших глубинах, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепропетровск, Украина, [lnov71@yandex.ru](mailto:lnov71@yandex.ru)

### About the authors

**Yalanskiy Anatoliy Aleksandrovich**, Doctor of Technical Sciences (D.Sc.), Senior Researcher, Principal Researcher in Rock Mechanics Department, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, [YalanskiyA@rambler.ru](mailto:YalanskiyA@rambler.ru)

**Sapunova Irina Aleksandrovna**, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Senior Researcher, Senior Researcher in Department of Mineral Mining at Great Depths, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, [gtm.igtm@yandex.ru](mailto:gtm.igtm@yandex.ru)

**Slashchov Anton Igorevich**, Master of Science, Doctoral Student, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, [SlashovAnton@ya.ru](mailto:SlashovAnton@ya.ru)

**Novikov Leonid Andreevich**, engineer, Junior Researcher in Department of Mineral Mining at Great Depths, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM NAS of Ukraine), Dnepropetrovsk, Ukraine, [lnov71@yandex.ru](mailto:lnov71@yandex.ru)

**Анотація.** Для вирішення задач забезпечення стійкості і безпеки підтримання гірничих виробок розглянуті особливості завдання в геомеханічних моделях фізико-механічних властивостей обводнених і газонасичених гірських порід.

На базі аналізу та узагальнення закономірностей зміни фізико-механічних властивостей порід під впливом навантаження, обводнення і газонасичення як основних чинників їх руйнування встановлено, що водонасичення зразків порід призводить до повної втрати опору стисненню у 4 % вапняків, 13 % пісковиків, 62 % алевролітів, 89 % аргілітів, при цьому сере-

дні межі опору стисненню знижуються для алевролітів і аргілітів в 2,5-2,6 разів, для пісковиків і вапняків у 1,5 рази. Отримано залежності міцності гірських порід на одноосьовий стиск від глибини з урахуванням залишкової міцності зруйнованих порід, при цьому міцність водонасичених порід менше, а коефіцієнт варіації більше, ніж у природному стані. Доведено, що при водонасиченні породи мають більший розкид значень коефіцієнтів варіації, ніж в сухому стані. Так для водонасичених пісковиків і вапняків цей показник більше на 13,6-15,4%, а для глинистих аргілітів і алевролітів на 26,8-26,9%, тобто простежується зростання розкиду міцності порід в результаті водонасичення на 44-58%. Це дозволило формалізувати граничні умови для обчислювальних експериментів на рівні критичних (мінімально можливих) або усереднених параметрів з урахуванням залишкової міцності порід.

**Ключові слова:** моделювання, геомеханіка, фізико-механічні властивості порід, водонасиченість, газонасиченість, напружено-деформований стан

**Abstract.** To meet the challenges of sustainability and safety of mine workings maintain describes the features the definition of a geomechanical models of physical and mechanical properties flooded and gas saturated rocks.

On the basis of analysis and generalization of regularities of change in the physical and mechanical properties of rocks under the influence of loading, water saturation and gas saturation as a major factors of their destruction found that the water saturation of rock samples leads to a complete loss of compression resistance in 4 % of limestones, in 13 % of sandstones, in 62 % of siltstones, in 89 % of mudstones, while the average compressive strength limits are reduced in siltstones and mudstones in 2.5-2.6 times, sandstones and limestones in 1.5 times. The dependence of uniaxial compression rock strength from of depth with regard of the residual strength of destroyed rocks with water saturated rock strength is less and the coefficient of variation is greater than in the natural state. So much for the water saturated sandstones and limestones this indicator more on 13,6-15,4 % and clayey mudstones and siltstones more on 26,8-26,9 %, ie there is an increase of rock strength dispersion due to water saturation at 44-58 %. This made it possible to formalize the boundary conditions for computational experiments on critical level (the lowest possible) or averaged parameters taking into account of rocks residual strength.

**Keywords:** modeling, geomechanics, physical and mechanical properties of rocks, water saturation, gas saturation, the stress-strain state