

ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ЯКОСТТА НА ОБЕМЕН НАТИСК НА СКАЛИТЕ, ЧРЕЗ ЕДНООСОВИ ИЗПИТВАНИЯ НА ОБРАЗЦИ

Венцислав Иванов

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, София 1700

РЕЗЮМЕ. Извършена е експериментална проверка на известен метод за определяне на обемната якост и обобщения критерий на Мор, чрез едноосови изпитвания на скални образци. За целите на изследването са извършени над 50 якостни теста на серия образци от пет вида скали. Въз основа комплексен анализ на хипотезата, методиката и получените резултати са показани предимствата и недостатъците, определена е приложимостта на съществуващото решение, и са разкрити възможности за развитие на метода, и неговото практическо приложение.

ASSESSMENT OF THE STRENGTH OF BULK ROCK PRESSURE BY UNI-AXIAL TESTING OF SAMPLES

Ventsislav Ivanov

University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia

ABSTRACT. An experimental check of the common method for assessing the bulk strength and the Moor criterion has been performed by uni-axial testing of rock samples. For the purposes of the study, more than 50 strength tests have been performed on a series of samples of five rock types. The advantages and disadvantages have been shown based on comprehensive analysis of the hypothesis, the methods and results obtained, the applicability of existing decision has been assessed and the opportunities for development of the method have been exposed as well as its practical use.

I. ВЪВЕДЕНИЕ

Основно следствие от теорията на Мор за взаимовръзката между тангенциалното и нормалните напрежения при разрушаване е определено на границата на зоната на якост (траекторията на обвиващата), чрез построяването на паспорта на якост на конкретния вид скала.

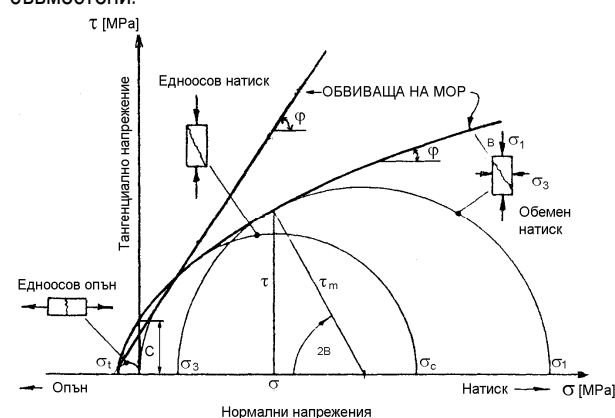
Традиционният подход, практически, се състои в построяването, в координати $\tau - \sigma$, на пределните Морови окръжности на чист опън (σ_t) и натиск (σ_{ucs}), прекарването на обща допирателна към тях, и определянето на местоположението ѝ, чрез кохезията c и ъгъла на вътрешно триене φ , в съответствие с уравнението на Кулон $\tau = c + \sigma_n + tg\varphi$.

Описаният анализ е широко използван и дискутиран [2,3,6,8]. Общовъзприето е мнението, че този паспорт на якост отразява с достатъчна точност пределните характеристики на скалата при разрушаване, в областта на ниските напрежение - $\sigma = (0,1 \div 0,2) \cdot \sigma_{ucs}$ [1,2]. Публикувани са аналитични изследвания, които разширяват, с приемлива точност, възможностите на паспорта до $\sigma = (0,3 \div 0,4) \cdot \sigma_{ucs}$ [3].

Известно е, обаче, че най-информативен е паспортът на Мор, отчитащ якостта на дадения вид скала в условията на обемно напрегнатото състояние [4,3]. Този паспорт е наричан в специализираната литература обобщен, тъй

като при построяването му, освен кръговете на Мор за едноосов опън и натиск, се използват още пределни Морови окръжности, получени чрез последователни изпитвания за различни стойности на девиатора на напрежения $\sigma_1 - \sigma_3$.

Изложеното е илюстрирано на фигура 1, където за потвърждаване на тази оценка двата вида паспорти са съвместени.



Фиг. 1. Паспорти на якост в едномерно и обемно напрегнато състояние

Сравнението ясно показва разликата между якостните паспорти в обема и качеството на получаваната информация за даден вид напрегнато състояние; разликите в получаваните параметри (c и φ), определящи траекторията на обвиващата линеаризирана, съгласно уравнението на Кулон. В крайна сметка, обобщеният

паспорт на якост съответства на напрегнатото състояние, в което се намира масива, в реални условия.

Якостните характеристики на скалите при обемен натиск се определят или в стационарни изпитателни машини, наричани стабилметри [4], или чрез клетката на Хоек [7]. Създаваният всеотраден натиск в тях е от вида $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ [4,9]. Максималното натисково напрежение σ_1 обикновено се предава на образеца чрез кораво бутало, а страничното налягане (confine pressure) $\sigma_2 = \sigma_3$ се създава от хидравлична система [5,7].

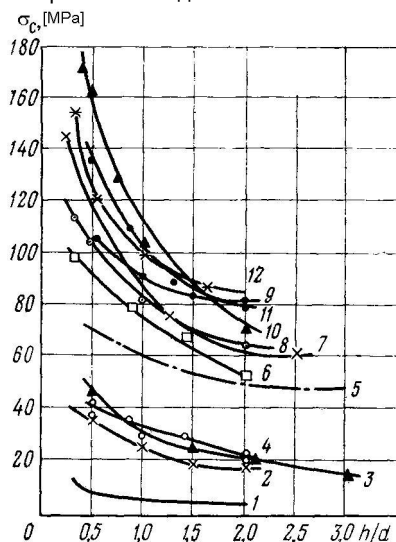
Триаксиалните изпитвания, за сега, все още се правят в малки обеми, в добре снабдени и оборудвани лаборатории. В същото време, специфичното многообразие в свойствата на скалите, дължащо се на техния строеж, нееднородност и нарушеност, обуславя нуждата от масиви опитни данни от такива изследвания.

В смисълът на изложеното, търсенето на алтернативни начини за преодоляване на описаните ограничения и определянето на обемните якостни свойства ще е актуално и в обозримото бъдеще.

Това са мотивите на описаните в разработката изследвания.

II. ХАРАКТЕРИСТИКА НА ПРОБЛЕМА

Многобройните лабораторни изследвания доказват, че при изпитване на чист натиск, с намаляване на размерите на образеца* якостта му нараства [1,5,10,11]. Тази зависимост с експериментални данни е показана на фигура 2.



Фиг. 2. Зависимост между размерите и якостта на образеца [12]

Обяснението на феномена е, чрез триенето между челните повърхности на образеца и плочите на пресата

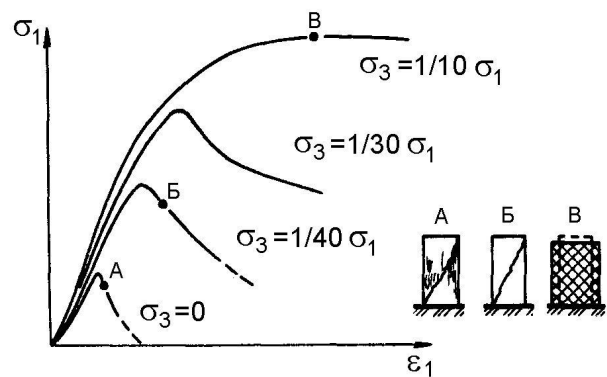
* Всички резултати, анализи и оценки правени в изследването са съгласно препоръчваните от ISRM методики за изпитване на цилиндрични образци [15]

[3,10,11]. В контактните зони, където радиалните деформации се ограничават (от силите на триене), възниква обемен натиск, който с намаляване на отношението h/d обхваща целия образец.

При триаксиалните изпитвания на скални образци, с увеличаване на страничното налягане (confine stress $\sigma_2 = \sigma_3$) якостта на образците и съпротивителността им към деформиране също нарастват съществено [14,5,4], както това е показано на фигура 3.

Съпоставянето на многобройните публикувани данни, за двата описани типа механични изпитвания, очертава една устойчива аналогия в якостното поведение на образците. При тестовите на едноосов натиск якостта расте с намаляването на h/d ; при изследванията в обемна постановка, якостта им расте с увеличаването на страничния натиск. Важното и за двата случая е, че причината за увеличение на якостта е обемното напрегнато състояние, в което се оказва материала на образеца.

Посочените обстоятелства са заложили в две известни методики [6,12], в които чрез изпитване на цилиндрични образци на едноосов натиск, с намаляващо отношение на h/d от 2 – 1,5 – 1 – 0,5, се предлага възможност за оценка на възникващото обемно напрегнато състояние. Най-кратко изложено, в двете методики за якост на едноосов натиск се приема стойността, при $h/d = 2$, след което, чрез последователни изпитвания на „ниски“ образци се определя, на всеки етап, разрушаващото натисково напрежение σ'_c , при съответния условен страничен натиск σ'_x , както следва:



Фиг. 3. Якост на образци при различен обемен натиск [14]

1. По първия подход, σ_x се определя чрез зависимостта:

$$\sigma_x = \frac{\pi}{8\epsilon_y} (\epsilon'_0 \sigma_{ucs} - \epsilon_0 \sigma'_c), [6] \quad (1)$$

където: σ_{ucs} - якост на едноосов натиск при $h/d = 2$; σ'_c - якост на образеца при други стойности на h/d ; ε_0 - средна относителна деформация в централната част на образеца, съответстваща на „чист“ натиск; ε'_0 - средна относителна надлъжна деформация на целия образец; ε_y - средна относителна деформация по цялото сечение на образеца.

2. По втората методика σ_x се определя чрез зависимостта

$$\sigma_x = k \sqrt{\frac{\sigma'_c}{\sigma_{ucs}} \ln \frac{\sigma'_c}{\sigma_{ucs}} \ln \frac{2d}{h}}, [12] \quad (2)$$

където: σ_{ucs} - якост на едноосов натиск при $h/d = 2$; σ'_c - якост на натиск при други стойности на отношението h/d ($0,5 \div 1,5$); k - коефициент, отчитащ контактните условия.

Един обобщен сравнителен анализ на двата подхода позволява следните заключения.

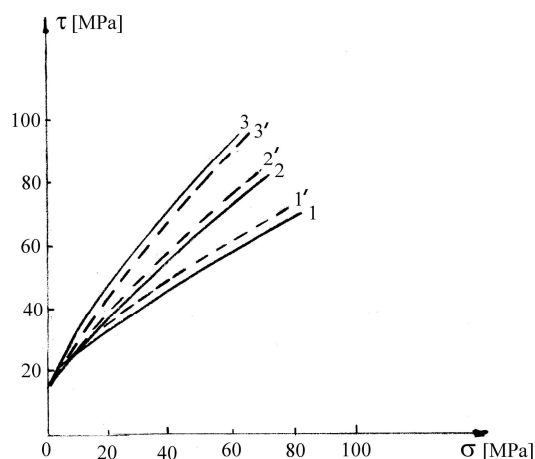
Известни са опити за аналитично решение на задачата за напрегнатото състояние на образец. Основен проблем при тях е невъзможността за описание на контактните условия и триенето между коравите плочи на челните повърхности на образеца, както и излизането извън границите на еластичност [3,6,1] на материала при разрушаването. Това ги прави неприложими за целите на анализа.

Първият метод е базиран на концепцията за т.н. „действителна якост“, което изисква определяне на три различни деформации: две надлъжни – пълната, тази на „чист натиск“ в централната част на образеца и една напречна – по сечението му. Прилагането му поражда два проблема – метрологичен и методичен. Първо – измерването на деформациите в момента на разрушаване технически е много трудно осъществимо. И второ – зоната на „чист натиск“ се обособява в централната част на образци, с височина $h = (1,5 \div 2).d$ [6]. Известно е, обаче, че най-големите изменения на якостта са в обхвата $h = (0,5 \div 1,5).d$ [3,4,10,11], където зона на „чист натиск“ няма. Всичко изложено прави експеримента трудопоглъщащ, скъп и сложен за надеждна реализация на измерванията при оценка на напрегнатото състояние на образеца.

Вторият метод е на емпирична основа. Методиката на изследване е съставена на база съпоставяне, след паралелни изпитвания на еднотипни серии образци, при различно натоварване. Образците от първата серия са с намаляващи размери и са изпитвани на едноосов натиск при отношение h/d от 2 до 0,5. Втората серия образци са с еднакви размери ($h/d = 2$), а якостните изпитвания

са в стабилометър, при стъпалообразно увеличаване на страничния натиск [13].

Получаваните якостни характеристики на натиск на т.н. „ниски“ образци с $h/d < 2$ и тези на „високите“ ($h/d = 2$), чрез триаксиалните тестове са твърде подобни (вж. фиг. 4). Анализът и съвместната обработка на резултатите показва, че те удовлетворяват емпиричната зависимост 2, заложена в предлаганата методика. Изследването е понятно, оборудването – достъпно, а определянето на якостните характеристики е рутинна практика. Всичко изложено прави тази методика предпочитана за приложение [16].



Фиг. 4. Сравнение на обвиващите на Мор, получени в стабилометър и по метода [16]

III. ПЛАН НА ИЗСЛЕДВАНЕТО И ОПИТНИ РЕЗУЛТАТИ

Целта на настоящото изследване е експериментална проверка на втория описан метод за оценка на обемна якост. Тя е извършена върху скали от клас R4 [ISRM], с якост на натиск (в диапазона на 50 – 100 MPa), неизследван от създателите на метода. Направени са над 50 едноосови якостни теста на скали от пет литоложки разновидности – варовик, пясъчник, андезит, брекча и туфобрекча [17,18].

Главният проблем при едноосовите механични изпитвания е осигуряването на едномерното напрегнато състояние на образеца [6,1,3]. Основните обуславящи фактори могат да се разделят на две групи:

- Външни - характеристики на изпитвателната машина, начина на предаване на товара от нея към образеца, схемата и режима на натоварване; геометрия, форма, размери и качество на изработване на образците;
- Вътрешни – структурно-механични особености и дефекти, вследствие ендо- и екзогенни процеси и/или последващи промени в геоложкия материал при образуването му.

Очевидно е, че при планирането на експериментите, за осигуряване на качеството им на провеждане, може да се въздейства само върху външните фактори. С оглед осигуряване на максимално възможната чистота на опита и минимизиране и/или елиминирание на негативното влияние на управляемите фактори са предприети следните мерки, както следва, по отделните елементи:

А) Оборудване: натоварващата машина е хидравлична преса EDZ с корова рама и капацитет 20 t. Пресата е с автоматично подаване на товара, при постоянен градиент на нарастване $0,5 \text{ MPa/min}$. Пресата е с вградено устройство за фиксиране на натоварването, при което настъпва разрушаването. За осигуряване на оптимални условия на натоварване, с минимална чувствителност към евентуални недостатъци на контакта между плочите на пресата и челните повърхности на образците, горната натоварваща плоча е снабдена със сферичен шарнир, с радиус 25 % от диаметъра на



Фиг. 5. Серия образци за един тест [18]

В) Описание на експеримента

Изследването в методологичен и съдържателен аспект е проведено съгласно оригинална методика, но е изпълнявано в съответствие с изискванията на ISRM за определяне на якостта на осов натиск на цилиндрични образци [15].

Отделният експеримент се отнася за серия образци и е извършван в следната последователност от определяния на:

- Якостта на едноосов натиск на базовия образец ($h/d = 2$);
- Якостта на натиск на всеки следващ образец от серията за всяко $h/d < 2$;
- Оценка на качеството на проведения тест.

Г) Обработка и представяне на резултатите от изследването

Всички якостни тестове са извършени по схема NN (недренирани и неконсолидирани). Избраната скорост и градиент на нарастване на товара осигуряват разрушаване, в интервала 5 – 10 min от началния момент на натоварването [15].

образца. Между впрочем, тази схема на натоварване осигурява най-малък ексцентрицитет на оста на подаването на товара, което само по себе си, е условие за оптимизация на схемата на натоварване при експеримента [3,4].

Б) Скални образци

Всички изследвани образци са изработени по изискванията на ISRM. Базовите образци са прави цилиндри (NX core size) с диаметър 54 mm и височина 110 mm. За всяко отделно изпитване са подготвяни минимум по две серии образци с размери $h = (2; 1,5; 1,0; 0,5)d$ с контрол на допустима перпендикулярност и гладкост на челните повърхности.

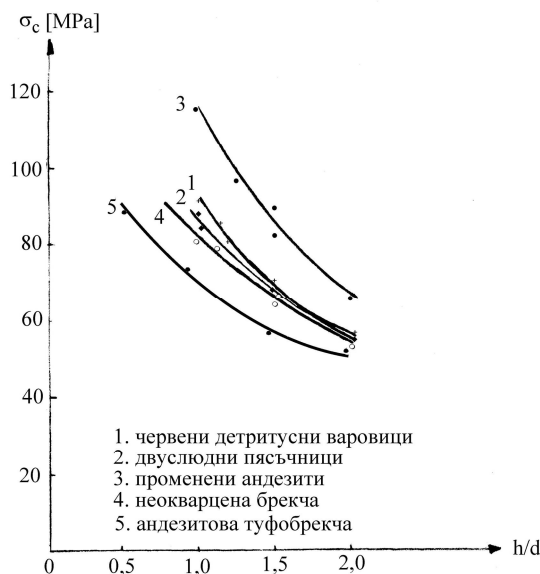
Една готова серия образци е показана на фигура 5.

При обработката на данните от якостния тест, на всяка серия е спазвана следната последователност от процедури и оценки:

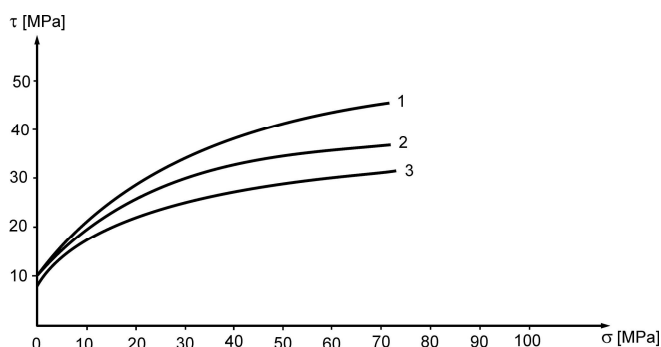
1. Литолошко описание;
2. За всяка серия от дадена литология, резултатът от изпитването на базовия образец е приеман за якост на едноосов натиск σ_{ucs} ;
3. За всеки следващ образец от серията са дадени по два параметъра: якост на натиск σ'_c и по формула 2 е изчисляван еквивалентния страничен натиск σ_x ;
4. Оценявана е общата надеждност на определяне, в зависимост от броя успешни теста и вида на разрушаването [3,4,16,17];
5. Всяка двойка напрежения, съгласно т. 3 са приемани за разрушаващи (σ_1, σ_3) и са построявани пределните морови окръжности;
6. По данните от т.т. 2, 3 и 5 са построявани обобщените паспорти на якост при обемно напрегнато състояние за серията, и чрез усредняването на резултатите на сериите – обобщения паспорт на якост за дадения литоложки тип скала.

7. На фигури №№ 6, 7 и 8 са показани обобщените резултати от изследването в графичен вид, както следва:

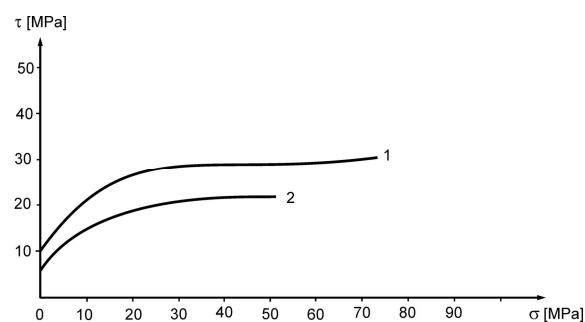
Обобщените якостни паспорти по критерия на Мор-Кулон за обемно напрегнато състояние са показани на фигури 7 и 8. на първата фигура са дадени паспортите на здравите, а на фигура 8 – на слабите скали.



Фиг. 6. Влияние на размерите на образца върху якостта на изследваните видове скали



Фиг. 7. Обобщени паспорти на якост
1. Варовик; 2. Андезити; 3. Пясъчници



Фиг. 8. Обобщени паспорти на якост
1. Туфобрекча андезитова; 2. Брекча

IV. АНАЛИЗ И ОЦЕНКА НА РЕЗУЛТАТИТЕ ОТ ИЗСЛЕДВАНЕТО

- Общи положения

Обработката, обобщението и анализът на получените резултати са извършени при следните постановки:

1. Възникващото обемно напрегнато състояние, в подложени на осов натиск серия подобни образци (един диаметър, една подборка, една литология), се обуславя единствено от сухото контактно триене между плочите на пресата и работните повърхности на образца, ограничаваното му (от триенето) напречно деформиране и намаляващата височина, а структурните дефекти се приемат за статистически равномерно разпределени в материала на образца.

2. Явлението мащабен ефект се изключва от анализа поради обстоятелството, че до момента няма общоприети количествени зависимости за отчитането на т. н. мащабен фактор при оценката на якостно-

деформационните изпитвания на образци с различни размери.

3. Задачата за напрегнатото състояние на цилиндричен образец, подложен на натиск чрез корави плочи и сухо триене, все още няма аналитично решение, което би било полезно за анализа. Проблемите, както вече бе маркирано, са в описанието на контактните условия, триенето между натоварващите устройства и челата на образца, както и излизането на материала извън зоната на еластичност в процеса на натоварване [4,1,3,6].

4. Въпреки известните, широко дискутирани абстрактност и условности спрямо коректността на определяне на механичните характеристики [3,4,5,16,6] е прието, че ползваните в изследването методика (ISRM), оборудване, както и предприетите допълнителни мерки осигуряват представително определяне на якостта на натиск на изпитваните образци.

5. Надеждността на съответствие на търсената характеристика P [3] е оценявана за всеки сериен

експеримент, като от анализа са изключвани резултати с надеждност, по-малка от 0,77.

6. За целите на този анализ, в описаното изследване (което е част от програма за комплексно изучаване на физико-механически характеристики на вместващия масив в находище Челопеч), са използвани и резултати от други механични изпитвания на същите скали.

IV.1. Влияние на размерите на образца върху осовата якост на натиск

В първия етап на разработката е изучавано якостното поведение на образци, в зависимост от размерите им за видовете скали, обхванати от изследването. В голямата си част, експерименталните резултати са аналогични на тези, дадени от авторите на анализираната методика, както и с такива, от други [1,10,11,5] публикации по темата. Получените (фиг. 6), показаните (фиг. 2), както и в цитираните зависимости между размерите и моментните якости на образците са с хиперболично разпределение. Тук трябва да се отбележат две обстоятелства, установени при експериментите. Макар и в по-малко случаи, в отделни изпитвания са установени отклонения от горната зависимост. На второ място, с намаляване размерите на образца нарастват разсейванията в якостните определяния, особено при нехомогенните, съдържащите включения и по-слаби скали (в случая андезити, брекчи). Всичките известни апроксимации на резултатите са уравнения на равнобедрена хипербола [3,6,1], но според нас, тази зависимост ще е различна при отчитане на структурно-механичните особености на съдържащи ги разновидности.

IV.2. Обобщени якостни паспорти

Анализът на обобщените паспорти на якост, построени съгласно проверяваната хипотеза, показва следното:

С намаляването на размерите на образците, в якостното поведение на скалите от изпитваната серия, настъпват качествени промени. Разрушаващото напрежение σ'_c , сравнявано с якостта на едноосов натиск σ_c , нараства съществено. За паспортите от фиг. 7, това увеличение при варовиците е ~ 25 %, за андезитите е над 30 %, а за пясъчника и брекчите, от фиг. 8, е над 40 %. Обвиващата на Мор, сравнявана с паспортите от чист опън и натиск [16,17], става полегата, скалите от крехко, преминават в пластично състояние. При варовиците, например, този преход е при осов товар 24 МПа, като при това не се регистрират микроразрушения, докато в едномерните изпитвания първите разрушения се проявяват още при товар 15 – 17 МПа (установени чрез измененията на коефициента на Поасон и еластичния модул), чрез деформационни тестове [16,17]. С намаляването на височината на образците (и развитието на обемното напрегнато състояние в тях), намалява и ъгъла на вътрешно триене, като за брекчите, например от $\varphi = 52^\circ$ (при чист опън и натиск), в условията на действие на „условния страничен натиск σ_x “, ъгълът на вътрешно триене става 21° . В потвърждение на

проверяваната хипотеза е и обобщеният якостен паспорт на най-слабите изследвани скали – брекчите. Те са с нехомогенен строеж и при деформационните изпитвания демонстрират пластично поведение [16,17]. След изпитванията, в построения паспорт на якост и обемно напрегнато състояние, както е видно от фиг. 8, пределните тангенциални напрежения, на практика, не зависят от нормалните и обвиващата е почти хоризонтална, което е в съгласие с теорията на Мор [1,14,8].

Получените резултати за повишаване на якостта, преходът от крехкост към пластичност, наклонът и траекторията на обвиващата, както и по-големия ефект на въздействие на σ_x върху по-слабите, отколкото при по-здравите скали се вписват в съвременната концепция за якост и якостните свойства на скалите в обемно напрегнато състояние, при действие на страничен (confine stress) товар σ_3 [2,5,14]

IV.3. Обща оценка

Комплексната оценка на всеки експериментален метод за механични изпитвания се прави по три критерия:

- Методологична грешка;
- Метрологична грешка;
- Качество на апроксимационна зависимост.

Целта на метода е да отчита степента на изменение на якостта на натиск на образци в обемно напрегнато състояние - $\sigma_1 - f(\sigma_3)$ (в случая $\sigma_2 \equiv \sigma'_c$ и $\sigma_3 \equiv \sigma_x$), спрямо якостта на едноосов натиск σ_c . За разлика от триаксиалното изпитване [9], в което горната функция е детерминирана, тук експериментът е неуправляем. Обемното напрегнато състояние възниква и се развива с намаляването на височината h ($d = const$) на образца, то не може да бъде контролирано, а само се регистрира ефекта $\sigma_1 \equiv \sigma'_c$ от него. То наистина зависи от h , но в съизмерима степен, както добре е известно [1,2,4,14], напрегнатото състояние на образца зависи от упоменатите по-горе вътрешни фактори – нееднородността и дефектността на скалата, от която е изготвен той. Гореизложеното поставя два проблема – степента на проява без изкривявания на определяемия параметър – осовата якост σ_1 ; и второ – степента на регистрираното му в количествено съответствие на определената, към истинската обемна якост. В случаят, може да се твърди, че определяемата якост σ'_c не е осовата якост на натиск при обемно напрегнато състояние [6,3,9], а е якостта на изпитвания образец при някакво непознато такова. Ситуацията се усложнява, ако се отчете и обстоятелството, че всяко якостно определяне по същество е отделен процес със специфични особености, характеризиращи конкретните резултати от него [16].

По вторият критерий: Тук ще отбележим само, че той зависи единствено от външните фактори. Натрупан е голям опит, теста е рутинен и чрез допълнително приетите мерки, като изложените в III, метрологичните грешки могат да се избегнат и/или минимизират до приемливи нива. В апроксимационната зависимост 2, освен взаимовръзките σ_c, σ'_c и h, d , при определянето на условия екивалентен товар σ_k участва коефициента k , отчитащ контактното триене по работните сечения. Според методиката, неговата дименсия е напрежение [12,13], като за скалите на якост в диапазона 20 – 100 МПа, k се изменя незначително [13], поради което авторите му определят препоръчителна усреднена стойност от 7 МПа. Анализът на опитната постановка и предлаганата апроксимация показва, че освен от триенето, при осовото натоварване, напрегнатото състояние на образеца зависи и от конкретните якостни характеристики на едноосов натиск, крехкостта и/или еластичността на скалата и следователно за σ_x , k и определяемата σ'_c . Освен това, максималните напрежения от триене е известно, че действат по контура на сечението [3,4,1] на цилиндричния образец и намаляват с отдалечаване към центъра и по посока средната му част във височина. Повечето изследвания за връзката якост – размер на образеца, както бе споменато, установяват хиперболичното разпределение и предлагат удовлетворяващи го апроксимационни зависимости [5,10,11,12], както и в конкретния случай. Приемайки тази хипотеза е необходимо да се отбележи, че ако резултатите от якостните определяния лежат на бедрата на хиперболата, становището за малкото изменение на k е приемливо, но ако резултатите са в зоната на фокалната ѝ кривина, тази постановка не е удовлетворителна.

Въпреки изключването на мащабния ефект от този анализ е необходимо да се отбележи, че наред с цитираните изследвания на връзката якост/размер на образеца, базирани на изменението на височината му h , при изучаване на мащабния фактор са известни изследвания, в които височината е фиксирана и е изследвано влиянието на изменение на диаметъра на образеца [19,5]. Базирани на статистическата теория за якост, целта на изследванията е търсенето на онзи размер (мащаб) на образеца, който ще обхване всички представени дефекти на геоложкия материал, от които е изготвен образеца [2,1,14]. Това ще минимизира разсейванията, резултатите ще се стабилизират около една стойност, която ще бъде реалната якост на скалата.

Изясняването и отразяването на изложените обстоятелства (например, обуславянето на стойностите на k чрез периметъра на работната повърхност, обвързката с якостта на едноосов натиск, на търсенето на специфичен размер) биха подобрили качеството на апроксимацията, а с това и надеждността на метода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Всеки геомеханичен анализ се прави на основата на якостните характеристики и използването на някои от критериите за якост на скалите. В този смисъл, актуалността на предложения метод е несъмнена. Оригиналността на идеята и опитната постановка са с висока практическа ценност. Базиран на рутинни и/или лесно реализуеми изпитвания, методът има потенциал за повишена производителност, необходима при масови изпитвания (в сравнение с триаксиалните тестове), достъпен е за широк кръг специалисти, без да се използва дефицитно (все още) лабораторно оборудване.

Прегледът на свързаните с проблема публикации, извършената експериментална провёлка на базовата хипотеза и анализът на резултатите разкриват някои неизяснени обстоятелства относно надеждността и точността на метода, и определяните чрез него характеристики.

При отчитането, обаче, че фактическата точност на използваните лабораторни методи за механични изпитвания на скалите е в граници 10 – 30 % е необходимо да се отбележи, че построяваните чрез метода обобщени якостни паспорти, в качествено отношение и информативност са аналогични на тези от специализираните триаксиални измервания. Последното ни дава основание за заключението, че методът на етапа на развитието си може да обслужи и подпомогне всяко изследване или проект на един предварителен етап, както и убедеността ни, че си струва да се инвестират допълнително усилия и средства за изясняването на отбелязаните ограничения за неговото усъвършенстване.

ЛИТЕРАТУРА

1. Турчанинов И. А. и др. - Основы механики горных пород. Недра, 1989.
2. Goodman R.E. - Introduction of Rock Mechanics. John Wiley & Sons, 1980. N.Y.
3. Фадеев А. Б. – Прочность и деформируемость горных пород, М. недра, 1975.
4. Берон А. И. – Свойства горных пород при разных видах и режимах нагружения, М. Недра, 1983.
5. Hoek E., Brown ET. - Practical estimation of rock mass strength, International Journal of Rock Mechanics, Min Sci Geomech Abstr. 1997, 37.
6. Ягодкин Г. И. и др. – Прочность и деформируемость горных пород в процессе их Нагружения, М. Наука, 1972.
7. Hoek E. T. "Rock Engineering" A. A. Balkema, Rotterdam, 2001.
8. Budavari S. – Rock Mechanics in Mining Practice, SAIMM, Johannesburg, 1983.
9. Suggested Methods for Determining the Strength of Rock Materials in Triaxial Compression Revised version.
10. Bienjowski Z. T. – The effect of specimen size on compressive strength, Int. J. RM, vol.5.
11. Pratt H. R. – The effect of specimen size on mechanical properties of unjointed diorite, Int. J. RM, Min Sei, vol 9)4.
12. Методические указания по определению прочности горных пород на сжатие, ВНИИМ, Л. 1973.

13. Карташов Ю. М. и др. – Разработка упрощенного метода испытании прочности горных пород, Л.1973, приложение към методиката.
14. Троллоп Д. Х. – Введение в механики горных пород, Мир, 1985.
15. Brown E. T. – Rock Characterisation Testing and Monitoring, ISRM, 1981.
16. Иванов В. – Определяне на якостно-деформационните характеристики на скалите при различни видове натоварвания, сб. доклади RIFREN, 2008.
17. Иванов В. и др. – Определяне на якостните и деформационните характеристики на комплекса покриващи скали на находище „Челопеч“ чрез изследване на ядки от повърхността, НИ отчет по договор № 1729/НИС при МГУ „Св. Иван Рилски“.
18. Иванов В и др. – Определяне на якостните и деформационни характеристики на скали от находище „Челопеч“ чрез изследване на сондажни ядки, НИ отчет по договор № 1816/НИС при МГУ „Св. Иван Рилски“.
19. Medhurst T. R., Brown E. T. – Large scale laboratory testing of coal, 7th Conf. Geomech, Canberra, 1996.

Препоръчана за публикуване от Катедра „Подземно разработване на полезни изкопаеми“, МТФ