

УДК 622.831

Н.Н. Кузнецов, А.К. Пак

О влиянии отношения размеров образцов скальных горных пород на результаты определения их прочности при одноосном сжатии

N.N. Kuznetsov, A.K. Pak

Influence of the hard rock specimens' size ratio on the results of their strength determination under uniaxial compression

Аннотация. В работе представлены результаты испытаний образцов скальных горных пород на одноосное сжатие. Установлена зависимость значений пределов прочности образцов от отношения их размеров. Определены условия применимости коэффициента формы для расчетов по методике, описанной в ГОСТ 21153.2-84. Предложена методика определения значений пределов прочности на одноосное сжатие цилиндрических образцов с учетом отношений высоты к диаметру, равных 2 и 1.

Abstract. The paper describes the results of uniaxial compression tests of hard rock specimens. The influence of the specimens' size ratio on the strength limit values has been established. The conditions of the shape coefficient applicability have been determined for computation by the methods described in state standards (GOST 21153.2-84). The methods for determining the strength limits on the uniaxial compression of cylindrical specimens with height-diameter ratios of 2 and 1 have been proposed.

Ключевые слова: отношение размеров образцов, одноосное сжатие, предел прочности, скальные горные породы, коэффициент формы, образец, отношение высоты к диаметру

Key words: specimens' size ratio, uniaxial compression, strength limit, hard rock, shape coefficient, specimen, height-diameter ratio

1. Введение

Основными методами определения механических свойств образцов горных пород являются испытания на одноосное сжатие, одноосное растяжение, сдвиг и объемное сжатие. Наибольшее распространение получил метод одноосного сжатия, что главным образом связано с простотой его применения. С помощью этого метода определяются значения параметра, используемого при решении многих горнотехнических задач, – предела прочности на одноосное сжатие образцов горных пород (Бориц-Компоницец, 2013; Барон, 1972; Ильницкая и др., 1969).

Несмотря на простоту в применении, метод одноосного сжатия не лишен ряда недостатков. Наиболее значимыми из них являются сложность подготовки образцов для проведения испытаний (Породы горные..., 1975); влияние контактных условий между образцом и плитами прессы (Барон, 1972); влияние режима нагружения на характер разрушения образцов (Ставрогин, Тарасов, 2001); зависимость прочности образцов при одноосном сжатии от их размеров (Берон и др., 1984; Богданович, 1984; Барон, 1972). Именно о последней проблеме и пойдет речь в данной статье.

Вопросом о влиянии отношения размеров образцов (масштабного фактора) на их прочность задавались многие ученые. Некоторые из них считали, что с увеличением размера, в частности при увеличении значения отношения высоты к диаметру цилиндрических образцов, уменьшалось значение предела прочности на одноосное сжатие (Tarasov, 2013; Берон и др., 1984; Богданович, 1984; Барон и др., 1962). Данный факт подтверждает статистическая теория прочности, согласно которой для образцов больших размеров вероятность обнаружить структурное нарушение выше, чем для образцов меньших размеров. Поскольку прочность твердого тела, в соответствии с указанной выше теорией, определяется прочностью его самого слабого места, то время стадии предразрушения большого тела будет меньше, чем маленького. Однако некоторыми исследователями (Берон и др., 1984; Барон, 1972; Ильницкая и др., 1969) описаны испытания, в ходе которых были получены противоположные результаты, т.е. увеличение размера образцов приводило к увеличению значения предела прочности их на одноосное сжатие. М.И. Койфман (1962) высказал предположение о том, что такого рода результаты связаны с проявлением поверхностного масштабного эффекта, вызванного нарушением поверхностного слоя образцов при подготовке к испытаниям. Но, как отмечает Л.И. Барон (1972), в своих рассуждениях Койфман не учел того, что шероховатость по-разному проявляется в крепких и мягких породах. Также им не был учтен гранулометрический состав продуктов разрушения образца. Помимо этого, ученые связывают полученные результаты с высокой структурной неоднородностью образцов, о чем свидетельствует различный характер их разрушения при одноосном нагружении (Basu et al., 2013; Барон, 1972;

Ильницкая и др., 1969). В целом, исходя из вышесказанного, единого мнения о влиянии отношения размеров образцов горных пород на изменение значений их прочности на тот момент не существовало. Возникла необходимость в подходе, который смог бы унифицировать размеры образцов при определении предела их прочности в процессе испытаний на одноосное сжатие.

В 1975 г. был разработан ГОСТ 21153.2-75 для решения обозначенной выше и ряда других проблем. В соответствии с ним образец правильной формы имел отношение высоты к диаметру, равное 1 (рассматривается форма цилиндра). Предел прочности на одноосное сжатие вычислялся по формуле

$$\sigma_{\text{сж}} = 10P/S, \quad (1)$$

где P – разрушающая образец нагрузка, кН; S – площадь поперечного сечения образца, см².

В случае когда высота образца отличалась по своей величине от диаметра, для определения предела прочности использовали формулу

$$\sigma_{\text{нсж}} = 9\sigma_{\text{сж}}/(7 + 2d/h),$$

где $\sigma_{\text{сж}}$ – предел прочности на одноосное сжатие образца правильной формы ($h/d = 1$), МПа; d – диаметр образца, см; h – высота образца, см.

Введенный ГОСТ 21153.2-75 позволил унифицировать методы определения предела прочности на одноосное сжатие и внести долю ясности в зависимость между масштабным фактором и прочностью образцов. Однако уже в 1984 г. на смену ему приходит ГОСТ 21153.2-84, согласно которому отношение высоты к диаметру правильного образца равняется 2. Такое изменение размера в стандарте объяснялось тем, что при одноосном нагружении в образце с отношением высоты к диаметру, равным 1, создавалось сложное напряженное состояние, тогда как при испытании образца с соотношением, равным 2, в центральной его части происходило "чистое" одноосное сжатие, способствующее увеличению степени достоверности результатов испытаний (Барон, 1972; Ильницкая и др., 1969).

Введение нового ГОСТа (Породы горные..., 1984) обозначило новый подход к определению предела прочности. Для учета различных отношений высоты к диаметру образцов стал использоваться безразмерный коэффициент формы K_b . Так, для образцов с отношением, равным 2, коэффициент K_b равнялся 1, а для образцов с отношением, равным 1, – 0,8. Значение предела прочности вычислялось по формуле

$$\sigma_{\text{сж}} = 10K_b \cdot P/S. \quad (2)$$

В настоящее время проведение испытаний на одноосное сжатие регламентируется ГОСТом (Породы горные..., 1984). Однако неоднозначность в вопросе о влиянии масштабного фактора остается до сих пор, особенно для пород с пределом прочности более 50 МПа.

С целью устранения вышеуказанной неоднозначности были проведены испытания на одноосное сжатие образцов пяти различных типов скальных горных пород с отношениями высоты к диаметру, равными 2 ($h = 8,4$ см; $d = 4,2$ см) и 1 ($h = 4,2$ см; $d = 4,2$ см). Испытания были разделены на несколько групп, соответствующих разности породы: 1 – карбонатит; 2 – уртит среднезернистый массивный с включением пегматита; 3 – уртит неравномерно-зернистый; 4 – уртит среднезернистый массивный; 5 – пегматоидный уртит. Количество образцов с отношением высоты к диаметру, равным 2 и 1, в группах: 1 – 7 и 7 шт., 2 – 6 и 10 шт., 3 – 9 и 7 шт., 4 – 9 и 5 шт., 5 – 6 и 10 шт. соответственно. Всего было испытано 76 образцов.

2. Методы проведения исследований и обработки результатов

Исследования на одноосное сжатие проводили на испытательной установке *MTS 816 Rock Test System*. Подробная конфигурация установки и процесс выполнения экспериментов представлены в работе (Kozyrev et al., 2013).

Отбор и подготовку образцов для проведения испытаний осуществляли по ГОСТу (Породы горные..., 1984). Образцы доводили до разрушения со скоростью нагружения 4 кН/с (примерно 3 МПа/с). По результатам испытаний для каждого из них устанавливали значение разрушающей нагрузки. На основании полученных данных определяли величину предела прочности на одноосное сжатие по формуле (2). С целью установления влияния отношения размеров образцов на их прочностные свойства проводили дополнительные расчеты по формуле (1) в отсутствие безразмерного коэффициента формы K_b . Полученные результаты подвергали статистической обработке – определяли значения среднего арифметического, среднеквадратического отклонения и коэффициента вариации. По последнему параметру определяли надежность данных согласно методике Барона (Барон, 1972): при коэффициенте вариации меньше 20-30 % полученные результаты считались надежными.

Визуализацию данных осуществляли при помощи построения графиков зависимости значений пределов прочности при одноосном сжатии от значений разрушающих нагрузок. Выбор таких параметров сделан вследствие того, что между ними и коэффициентами формы существует связь, выраженная уравнением (2).

Результирующие усредненные данные использовали для вычисления процентной разницы между ними. На основе полученных значений пределов прочности и процентной разницы проводили оценку влияния отношения размеров образцов на их прочность при одноосном сжатии.

3. Результаты и их обсуждение

3.1. Испытания образцов на одноосное сжатие

Исследования влияния отношения размеров образцов на значения их прочности при сжатии были выполнены в пять этапов, на каждом из которых проводили испытания определенного типа пород. Ниже представлено подробное описание каждого из этапов.

I этап. На одноосное сжатие были испытаны две подгруппы образцов карбонатита: 1) с отношением высоты к диаметру, равным 2 (7 шт.); 2) отношением, равным 1 (7 шт.). Для первой подгруппы установлено среднее значение пределов прочности 57 МПа с коэффициентом вариации 12 %, для второй – 60 МПа с коэффициентом вариации 13 %. Разница полученных результатов составила 5 %, что свидетельствует об их высокой сходимости. Однако значения пределов прочности на одноосное сжатие в этом случае были вычислены по формуле (2), т.е. был использован безразмерный коэффициент формы. При расчете по формуле (1) среднее значение предела прочности для первой подгруппы образцов не изменилось, тогда как для второй оно составило 75 МПа. Разница в этом случае увеличилась до 31 %. Из этого следует, что образцы карбонатита с отношением высоты к диаметру, равным 1, прочнее, чем образцы с отношением, равным 2, что согласуется со статистической теорией прочности. Таким образом, расчет значений предела прочности на одноосное сжатие образцов по формуле (2) позволил уйти от влияния масштабного фактора.

Результаты, полученные на I этапе испытаний, представлены в виде графика зависимости на рис. 1.

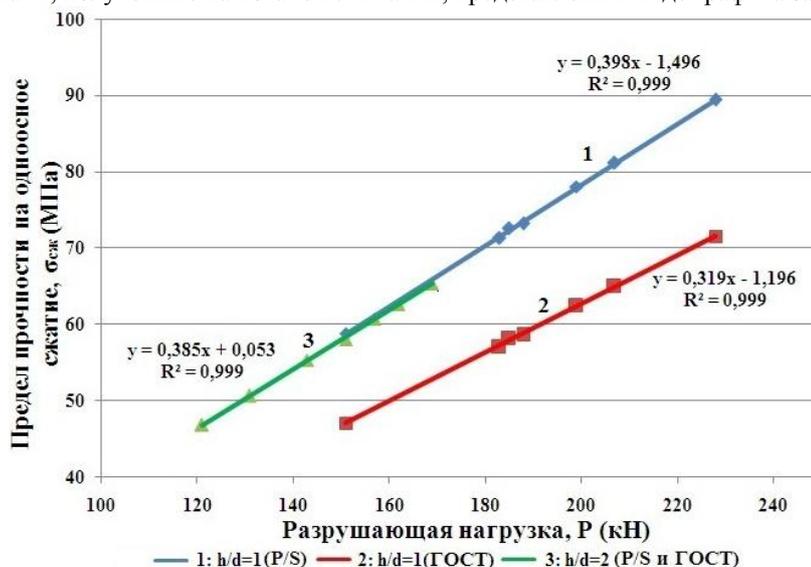


Рис. 1. Сопоставление результатов, полученных на I этапе испытаний

Значения пределов прочности на одноосное сжатие и разрушающих нагрузок (рис. 1) связаны прямолинейной зависимостью, величина достоверности аппроксимации которой близка к единице. Представленные на рисунке прямые отражают:

- влияние коэффициента формы на значения прочности образцов (прямая 1 переносится параллельно вниз в среднем на 15 МПа, занимая положение прямой 2);
- результаты расчетов этих значений без учета указанного коэффициента (прямые 1 и 3 совпадают в диапазоне от 59 до 65 МПа, причем прямая 1 является как бы продолжением прямой 3).

II этап. На данном этапе испытаны образцы уррита среднезернистого массивного с включениями пегматита. Образцы были разделены на две подгруппы: 1) с отношением высоты к диаметру, равным 2 (6 шт.); 2) отношением, равным 1 (10 шт.). Для первой подгруппы среднее значение пределов прочности, вычисленных по формуле (2), составило 185 МПа с коэффициентом вариации 7 %,

для второй – 156 МПа с коэффициентом вариации 7 %. Разница между значениями составила 19 %. В отличие от результатов, установленных в ходе испытаний образцов карбонатита, в данном случае наблюдалось значительное их расхождение (но не выходящее за рамки допустимых значений). Среднее значение пределов прочности на одноосное сжатие, вычисленное по формуле (1), образцов первой подгруппы осталось неизменным, второй – составило 195 МПа. При этом разница значений сократилась до 5 %. Если сравнивать полученный результат с тем, что был установлен для карбонатитов, то также будет наблюдаться обратная тенденция. Чем же объясняется данный факт? Для наглядного объяснения обратимся к рис. 2.

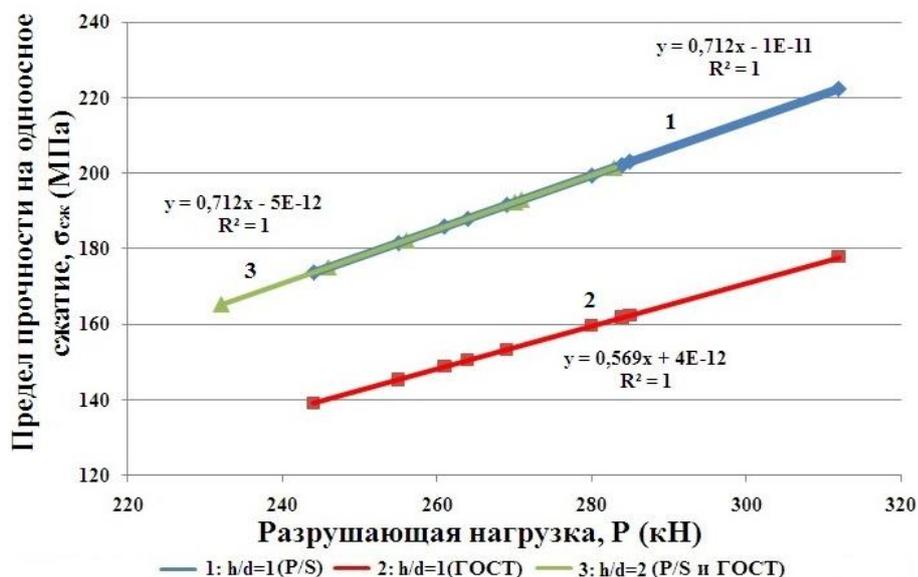


Рис. 2. Сопоставление результатов, полученных на II этапе испытаний

Как видно из рисунка, зависимость между значениями пределов прочности на одноосное сжатие и величинами разрушающих нагрузок, как и в случае с образцами карбонатита, носит линейный характер. При учете коэффициента формы прямая 1 переносится параллельно вниз в среднем на 39 МПа, занимая положение прямой 2. Прямые 1 и 3 совпадают в диапазоне значений пределов прочности от 174 до 201 МПа, причем прямая 1 является продолжением прямой 3. В целом расположение прямых на рис. 2 совпадает с их положением на рис. 1. Однако при внимательном изучении можно увидеть, что область совпадения прямых на рис. 2 больше, чем на рис. 1. Кроме того, разность разрушающих нагрузок на первом этапе составила 31 %, а на втором – 5 %. Следовательно, значение прочности образцов уртыта с отношением высоты к диаметру, равным 1, мало отличается от этого же значения для образцов с отношением, равным 2. Тогда, применив безразмерный коэффициент формы 0,8 в формуле (2) для образцов с отношением, равным 1 (*Породы горные...*, 1984), получим пониженные значения предела прочности на одноосное сжатие.

Полученные результаты не могут быть объяснены с позиций статистической теории прочности, так как значения прочности образцов разных размеров оказались примерно равными. Данные значения предположительно обусловлены внутренней структурой образцов, а именно – наличием включений пегматита, вызывающих сложное напряженное состояние в них в процессе нагружения. Применение безразмерного коэффициента формы для расчета значений пределов прочности в данном случае также не дает удовлетворительных результатов, что вызвано особенностями методики (*Породы горные...*, 1984), опирающейся на принципы статистической теории прочности и функционирующей в рамках ее условий. Во всех остальных ситуациях использование этой методики будет приводить к расхождению значений пределов прочности для образцов с различными отношениями высоты к диаметру. Полученные на втором этапе результаты могут быть связаны с хрупкостью горных пород: более прочные уртыты разрушались хрупко, с сильным разлетом осколков, тогда как менее прочные карбонатиты проседали под нагрузкой без динамических проявлений. Отсюда можно сделать предположение, что ГОСТ (*Породы горные...*, 1984) больше ориентирован на слабые горные породы, чем на прочные скальные. Ниже представлено подтверждение этих предположений.

III этап. В процессе испытаний образцы уртыта неравномерно-зернистого разделены на подгруппы. Первая подгруппа включала 9 образцов (отношение высоты к диаметру, равное 2), вторая – 7 (отношение, равное 1). Среднее значение пределов прочности на одноосное сжатие образцов первой

подгруппы равнялось 202 МПа (коэффициент вариации 10 %), второй – 140 МПа (коэффициент вариации 14 %). Разница между ними составила 44 %. В данном случае также наблюдалось значительное расхождение результатов (выходящее за рамки допустимых значений). Среднее значение пределов прочности на одноосное сжатие образцов первой подгруппы, вычисленное по формуле (1), осталось неизменным, второй – составило 175 МПа. При этом разница значений сократилась до 16 %. Следовательно, прочность образцов с отношением высоты к диаметру, равным 2, оказалась более высокой в сравнении с прочностью образцов с отношением, равным 1.

Полученные на III этапе испытаний результаты представлены графически на рис. 3.

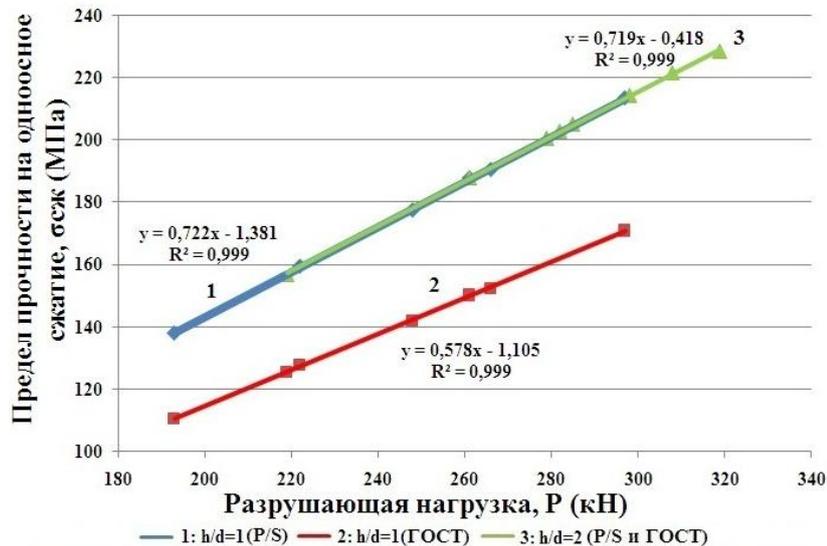


Рис. 3. Сопоставление результатов, полученных на III этапе испытаний

Из рисунка видно, что зависимость между значениями прочности и разрушающих нагрузок носит линейный характер. Коэффициент формы выполняет ту же функцию, что и на предыдущих этапах. Главное различие состоит в том, что прямая 3 находится выше прямой 1. Это является наглядным свидетельством того, что прочность образцов большего размера выше прочности образцов меньшего размера. Значение предела прочности на одноосное сжатие образцов с отношением, равным 1, вычисленное по формуле (2) с учетом коэффициента формы 0,8 (*Породы горные...*, 1984), уменьшилось в еще большей степени по сравнению со значением, рассчитанным по формуле (1). Таким образом, разность значений составила 44 %.

IV этап. На этом этапе проведены испытания образцов уррита среднезернистого массивного. Первая подгруппа включала 9 образцов (отношение высоты к диаметру, равное 2), вторая – 5 (отношение, равное 1). Среднее значение пределов прочности образцов первой подгруппы, вычисленное по формуле (2), равнялось 174 МПа (коэффициент вариации 14 %), второй – 145 МПа (коэффициент вариации 6 %). Разница между значениями составила 20 %. Среднее значение пределов прочности на одноосное сжатие образцов первой подгруппы, вычисленное по формуле (1), осталось неизменным, второй – составило 181 МПа. Разница в этом случае равна 4 %. Результаты испытаний представлены в графическом виде на рис. 4.

Если сравнивать с результатами предыдущих исследований, то можно заметить, что полученные на этом этапе численные данные соответствуют тем, что были получены на II этапе при испытании образцов уррита среднезернистого массивного с включениями пегматита. Но при сопоставлении рис. 2 и 4 видно, что различия все-таки есть. На рис. 2 прямая 3 расположена ниже прямой 1 и охватывает более половины диапазона ее значений. На рис. 4 прямая 3 содержит в себе прямую 1; таким образом, наблюдается больший разброс данных, поэтому средние значения пределов прочности образцов, исследованных на II и IV этапах, примерно одинаковые.

V этап. На последнем этапе были испытаны две подгруппы образцов пегматоидного уррита: 1) с отношением высоты к диаметру, равным 2 (6 шт.); 2) отношением, равным 1 (10 шт.). Среднее значение пределов прочности образцов первой подгруппы, вычисленное по формуле (2), равнялось 156 МПа (коэффициент вариации 27 %), второй – 147 МПа (коэффициент вариации 25 %). Высокие значения коэффициента вариации были вызваны неоднородной внутренней структурой образцов. Разница средних значений пределов прочности составила 6 %. Среднее значение пределов прочности на одноосное сжатие образцов первой подгруппы, вычисленное по формуле (1), осталось неизменным, второй – составило

184 МПа. При этом разница равна 16 %. Данные результаты аналогичны результатам, полученным на I этапе испытаний.

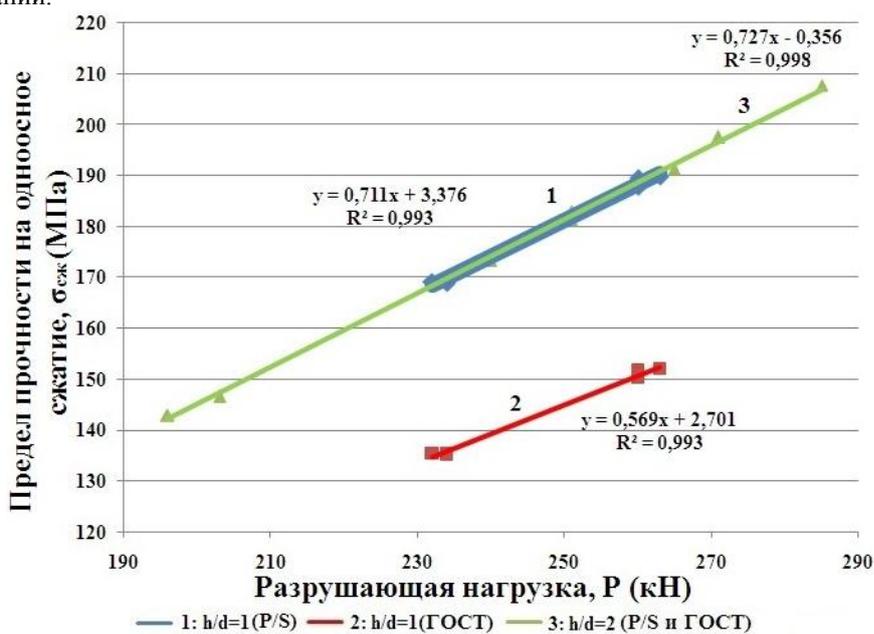


Рис. 4. Сопоставление результатов, полученных на IV этапе испытаний

Зависимости полученных значений пределов прочности от значений разрушающих нагрузок представлены на рис. 5.

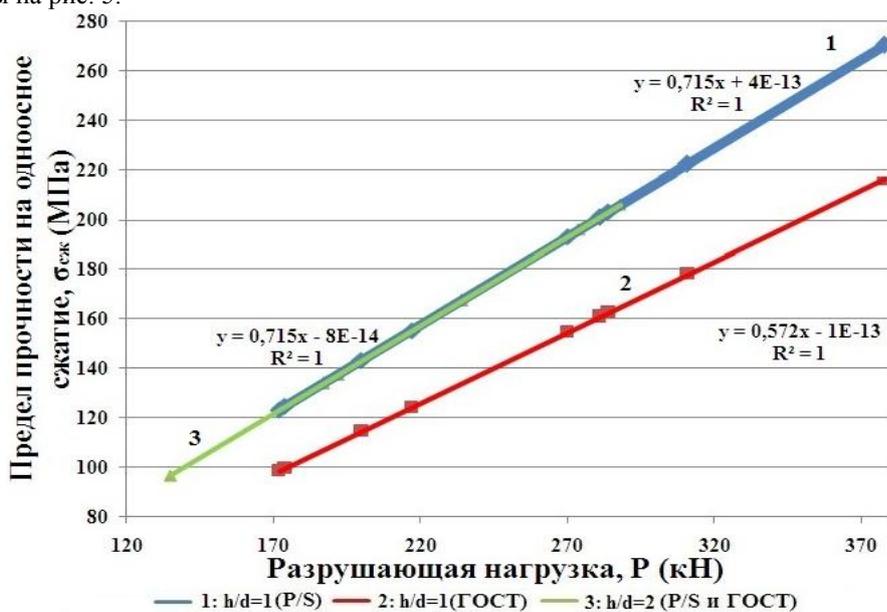


Рис. 5. Сопоставление результатов, полученных на V этапе испытаний

Расположение прямых на рисунке в большей степени соответствует рис. 2 (II этап), чем рис. 1 (I этап). Однако численные данные говорят об обратном. Было сделано предположение, что полученное расхождение связано с повышенной вариацией значений пределов прочности на одноосное сжатие.

3.2. Методика определения прочности без учета коэффициента формы

Исходя из полученных результатов испытаний на одноосное сжатие, было сделано предположение о том, что методика, описанная в ГОСТе (*Породы горные...*, 1984), в большей степени применима для случаев, соответствующих статистической теории прочности. Так, применение коэффициента формы позволило уйти от влияния масштабного фактора на значения пределов прочности на I этапе испытаний. Однако в тех случаях, где с увеличением отношения высоты к диаметру образцов

значение их прочности почти не менялось (II и IV этапы) или же увеличивалось (III этап), применение коэффициента формы приводило к расхождению результатов. На II и IV этапах испытаний разница средних значений прочности образцов с отношениями, равными 2 и 1, составила примерно 20 %, тогда как на III этапе – 44 %. Если погрешность 20 % считается допустимой для решения горнотехнических задач, то погрешность 44 % уже не является таковой. В связи с этим следует разработать методику, которая позволит учитывать случаи, выходящие за рамки статистической теории прочности.

Основываясь на экспериментальных данных, рекомендуем скорректировать методику определения значений пределов прочности на одноосное сжатие, чтобы уйти от влияния масштабного фактора на прочность образцов, и включить в нее следующие этапы:

- 1) проведение испытаний на одноосное сжатие образцов с отношениями высоты к диаметру, равными 2 и 1;
- 2) расчет значений пределов прочности образцов на одноосное сжатие по формуле (1);
- 3) построение графика зависимости значений пределов прочности от значений разрушающих нагрузок;
- 4) нахождение на этих графиках участка совпадения прямых;
- 5) вычисление среднего арифметического значений пределов прочности из диапазона совпадения прямых;
- 6) определение надежности результатов с учетом значения коэффициента вариации (он не должен превышать 20-30 %).

Разработанную методику можно применять для определения пределов прочности при испытании цилиндрических образцов с отношениями высоты к диаметру, равными 2 и 1. Для других отношений и форм образцов требуется проведение дополнительных исследований.

4. Заключение

В результате испытаний на одноосное сжатие 76 образцов установлено, что с увеличением значения отношения размеров образцов их прочность уменьшалась (I этап), не изменялась (II и IV этапы) или увеличивалась (III этап). Методика обработки экспериментальных данных, регламентируемая ГОСТом (*Породы горные...*, 1984), показала наилучшую сходимость результатов в случаях, соответствующих статистической теории прочности. Во всех остальных случаях расчет по этой методике приводил к увеличению расхождения между средними значениями предела прочности образцов с отношениями высоты к диаметру, равными 2 и 1.

С целью устранения влияния размера образцов и уменьшения разницы между результатами была предложена методика определения пределов прочности без учета коэффициента формы. Она опробована на цилиндрических образцах с отношениями высоты к диаметру, равными 2 и 1. Для других отношений требуется проведение дополнительных исследований, однако отношения 2 и 1 являются приемлемыми для определения значений пределов прочности при массовых и сравнительных испытаниях.

Литература

- Basu A., Mishra D.A., Roychowdhury K.** Rock failure modes under uniaxial compression, Brazilian, and point load tests. *Heidelberg, Bull. of Engineering Geology and the Environment*, v. 72, Ns 3-4, p. 457-475, 2013.
- Kozyrev A.A., Lodus E.V., Kuznetsov N.N.** The study of rock properties of the Khibiny massif on shear and uniaxial compression. *Proceedings of the 6th International Symposium on In-Situ Rock Stress, ISRM Specialized Conference. Sendai*, p. 939-952, 2013.
- Tarasov B.G.** New insight into the nature of size dependence and the lower limit of rock strength. *Proceeding of the 8th International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines. Obninsk-Perm*, p. 31-40, 2013.
- Барон Л.И.** Коэффициенты крепости горных пород. *М., Наука*, 176 с., 1972.
- Барон Л.И., Логунцов Б.М., Позин Е.З.** Определение свойств горных пород. *М., Госгортехиздат*, 332 с., 1962.
- Берон А.И., Ватолин Е.С., Койфман М.И. и др.** Свойства горных пород при разных видах и режимах нагружения. *М., Недра*, 276 с., 1984.
- Богданович Е.А.** Совершенствование методики определения прочности образцов скальных грунтов из оснований сооружений. *Дис. ... канд. техн. наук, М.*, 173 с., 1984.
- Борщ-Компониц В.И.** Практическая механика горных пород. *М., Горная книга*, 322 с., 2013.
- Ильницкая Е.И., Тедер Р.И., Ватолин Е.С., Кунтыш М.Ф.** Свойства горных пород и методы их определения. *М., Недра*, 392 с., 1969.
- Койфман М.И.** О влиянии размеров на прочность горных пород. *М., Изд-во АН СССР*, с. 46-53, 1962.

- Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии. ГОСТ 21153.2-84. Введ. с 19.06.84 до 01.07.91. М., Изд-во стандартов, 8 с., 1984.
- Породы горные. Отбор проб и общие требования к методам физических испытаний. ГОСТ 21153.0-75. Введ. С 01.07.1975 до 01.07.1986. М., Изд-во стандартов, 3 с., 1975.
- Ставрогин А.Н., Тарасов Б.Г.** Экспериментальная физика и механика горных пород. СПб., Наука, 343 с., 2001.

References

- Basu A., Mishra D.A., Roychowdhury K.** Rock failure modes under uniaxial compression, Brazilian, and point load tests. Heidelberg, Bull. of Engineering Geology and the Environment, v. 72, Ns 3-4, p. 457-475, 2013.
- Kozyrev A.A., Lodus E.V., Kuznetsov N.N.** The study of rock properties of the Khibiny massif on shear and uniaxial compression. Proceedings of the 6th International Symposium on In-Situ Rock Stress, ISRM Specialized Conference. Sendai, p. 939-952, 2013.
- Tarasov B.G.** New insight into the nature of size dependence and the lower limit of rock strength. Proceeding of the 8th International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines. Obninsk-Perm, p. 31-40, 2013.
- Baron L.I.** Koeffitsientyi kreposti gorniyh porod [The coefficients of rocks' hardness]. М., Nauka, 176 p., 1972.
- Baron L.I., Loguntsov B.M., Pozin E.Z.** Opredelenie svoystv gorniyh porod [Defining the properties of rocks]. М., Gosgortehizdat, 332 p., 1962.
- Beron A.I., Vatolin E.S., Koifman M.I. i dr.** Svoystva gorniyh porod pri raznyih vidah i rezhimah nagruzheniya [Properties of rocks in different types and loading conditions]. М., Nedra, 276 p., 1984.
- Bogdanovich E.A.** Sovershenstvovanie metodiki opredeleniya prochnosti obraztsov skalnyih gruntov iz osnovaniy sooruzheniy [Improved methods of determining the strength of the samples rocky soils of ground structures]. Dis. ... kand. tekhn. nauk, М., 173 p., 1984.
- Borsch-Komponiets V.I.** Prakticheskaya mehanika gorniyh porod [Practical rock mechanics]. М., Gornaya kniga, 322 p., 2013.
- Инитская Е.И., Тедер Р.И., Ватолин Е.С., Кунтыш М.Ф.** Svoystva gorniyh porod i metody ih opredeleniya [Rock properties and methods of their determination]. М., Nedra, 392 p., 1969.
- Koifman M.I.** O vliyani razmerov na prochnost gorniyh porod [On the effect of size on the rocks' strength]. М., Izd-vo AN SSSR, p. 46-53, 1962.
- Porodyi gornye. Metodyi opredeleniya predela prochnosti pri odnoosnom szhatii [Rocks. Methods for determining the tensile strength under uniaxial compression]. GOST 21153.2-84. Vved. s 19.06.84 do 01.07.91. М., Izd-vo standartov, 8 p., 1984.
- Porodyi gornye. Otbor prob i obshchie trebovaniya k metodam fizicheskikh ispyitaniy [Rocks. Sampling and general requirements for physical test methods]. GOST 21153.0-75. Vved. S 01.07.1975 do 01.07.1986. М., Izd-vo standartov, 3 p., 1975.
- Stavrogin A.N., Tarasov B.G.** Eksperimentalnaya fizika i mehanika gorniyh porod [Experimental physics and rock mechanics]. SPb., Nauka, 343 p., 2001.

Информация об авторах

Кузнецов Николай Николаевич – Горный институт (ГоИ) КНЦ РАН, аспирант,
e-mail: nikavalon@mail.ru

Kuznetsov N.N. – Mining Institute KSC RAS, Ph.D. Student, e-mail: nikavalon@mail.ru

Пак Александр Климентьевич – Горный институт (ГоИ) КНЦ РАН, науч. сотрудник,
e-mail: aleksa76@bk.ru

Пак А.К. – Mining Institute KSC RAS, Researcher, e-mail: aleksa76@bk.ru