
ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ, СВЯЗАННЫХ С ИЗУЧЕНИЕМ ТРЕЩИНОВАТОСТИ СКАЛЬНЫХ МАССИВОВ

В.С. Кузьмин¹, А.С. Копытин²

¹Экологический факультет
Российский университет дружбы народов
Подольское шоссе, 8/5, Москва, Россия, 113093

²ОАО «Институт Гидропроект»
Волоколамское шоссе, 2, Москва, Россия, 125993

Полнота и детальность информации о характере и интенсивности трещиноватости оказывает большое влияние на достоверность геоэкологических прогнозов и принятие инженерных решений при проектировании и строительстве сооружений. Авторами настоящей статьи предложена новая методика, позволяющая автоматизировать трудоемкий процесс построения диаграмм трещиноватости и оценки фильтрационной анизотропии. В статье приводится подробное описание и обоснование предлагаемой методики и примеры ее применения.

Ключевые слова: трещиноватость скальных пород, оценка трещиноватости, диаграммы трещиноватости, фильтрационная анизотропия, коэффициент фильтрации.

Изучение закономерностей трещиноватости скальных массивов представляет собой важную геоэкологическую и инженерно-геологическую задачу. Высокая степень трещиноватости приводит к увеличению проницаемости массива горных пород, усиливает его механическую и фильтрационную неоднородность, способствует активизации экзогенных процессов и явлений [6].

Трещиноватость в значительной степени повышает риск нарушения устойчивости оснований сооружений, особенно гидротехнических объектов, а следовательно, и их безопасность. Устойчивость системы «окружающая среда — гидротехническое сооружение» зависит от множества факторов, взаимосвязанных и взаимозависимых, любое изменение которых может повлечь за собой нарушение ее равновесия. Поскольку трещиноватость во многом определяет геомеханические и фильтрационные свойства скального массива, полнота и детальность информации о характере и интенсивности трещиноватости оказывает большое влияние на достоверность геоэкологических прогнозов и принятие инженерных решений при проектировании и строительстве различных сооружений.

В силу вышеуказанных причин проектирование инженерных сооружений повышенного класса ответственности, основанием или вмещающей средой которых являются скальные массивы, включает в себя среди прочего изучение литогенетической, экзогенной и тектонической трещиноватости. Результаты изучения трещиноватости представляются в соответствующих разделах проекта сооружений посредством ее описания, достоверность и полнота которого являются достаточными для обеспечения надежности сооружений. В практике проектирования описание

трещиноватости принято называть моделированием трещиноватости, а законченное описание — моделью трещиноватости, которая включает в себя описание генетических особенностей трещиноватости, диаграммы трещиноватости (отображающие пространственную ориентировку систем трещин), классифицирование трещин по порядкам (размерам), таблицы (характеризующие геометрические параметры систем трещин) и некоторые другие характеристики трещиноватости (модуль трещиноватости, коэффициент трещиной пустотности и пр.).

Компьютерные технологии позволяют существенно автоматизировать трудоемкий процесс моделирования трещиноватости. В данной статье рассматриваются некоторые аспекты автоматизации построения круговых диаграмм трещиноватости, необходимых для разделения совокупности трещин на системы (группы) на основании изучения их пространственной ориентировки.

Ориентировка плоскости трещины геометрически может быть представлена как точка на поверхности сферы со сферическими координатами R , α , β , где R — радиус сферы, α — азимут падения (долгота), β — угол падения (полярное расстояние). В мировой инженерно-геологической практике для выделения систем трещин по их ориентировке чаще всего используют проекцию полусферы Шмидта на горизонтальную плоскость, проходящую через центр сферы. В силу симметрии сферы одна из половин отбрасывается, причем в отечественной практике отбрасывается нижняя полусфера и рассматривается верхняя полусфера, а в зарубежной практике обычно отбрасывается верхняя полусфера. Проекция Шмидта (сетка Шмидта) представляет собой плоское отображение полусферы, на котором соотношение площадей участков ограниченных меридианами и параллелями соответствует таковым на поверхности полусферы.

Формальным основанием для выделения систем трещин является пространственная обособленность группы трещин на проекции полусферы, которая более четко проявляется в структуре поля изолиний плотности точек. В методической литературе [1; 7] для построения изолиний плотности точек рекомендовано использовать трафарет-круг радиусом 10% от радиуса проекции (рис. 1). Количество точек, попавших в трафарет-круг, отнесенное к общему количеству точек, представляет собой меру плотности точек на проекции полусферы, которую выражают в процентах или нормированных единицах и приписывают центру трафарет-круга. Центр трафарет-круга последовательно совмещается со всеми узлами прямоугольной сетки с шагом 10% от радиуса проекции, что позволяет разбить пространство проекции на относительно равноудаленные участки, которым приписывается то или иное значение плотности точек, что позволяет тем или иным способом построить изолинии плотности точек на проекции полусферы.

С внедрением ЭВМ стали появляться программы, которые автоматизировали некоторые процессы построения диаграмм трещиноватости, выделения систем трещин и вычисления их геометрических параметров. [5; 10]. Однако и в настоящее время совершенствование методик построения диаграмм трещиноватости не утратило актуальности.

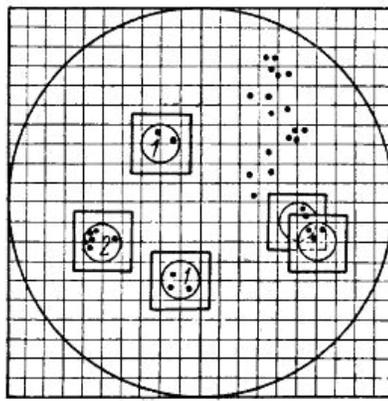


Рис. 1. Обработка точечной диаграммы трещиноватости [1]

Некоторые авторы уделяют внимание совершенствованию построения прямоугольных диаграмм трещиноватости, к которым, в связи с наличием некоторых недостатков стереографических сеток, относится наличие трудности расшифровки систем трещин, сосредоточенных в центре диаграммы, трудоемкость ручного подсчета точек-трещин и др. [7].

Однако, с нашей точки зрения, по сравнению с прямоугольными диаграммами круговые диаграммы трещиноватости лучше подходят для решения такого рода пространственных задач.

В данной статье приводится описание алгоритма, разработанного для автоматизированного построения круговой диаграммы трещиноватости на сетке Шмидта, который позволяет значительно сократить затраты времени на выполнение операций при большом количестве замеров трещин.

В описанной выше методике ручного построения круговой диаграммы подсчет точек производился путем смещения вспомогательного трафарет-круга по узлам решетки сантиметровой трафарета. Однако данная конфигурация узлов не является единственно возможной. Более того, у данной конфигурации узлов имеются некоторые недостатки. Например, в направлениях с азимутом падения 45° , 135° , 225° , 315° расстояния между узлами сантиметровой решетки будут несколько большими, чем в других направлениях. И хотя данный недостаток будет компенсирован эффектом скользящего среднего (окружность с центром во втором узле, смежном первому, перекрывает часть точек окружности с центром в первом узле), данное обстоятельство может привести к некоторому искажению распределения плотности точек трещин.

Для минимизации данного эффекта наиболее приемлемой конфигурацией узлов будет спираль с шагом 1 см, равным радиусу r единичной окружности площадью 1% от площади диаграммы, раскручивающаяся из центра большого круга диаграммы. Узлы решетки — центры единичных окружностей — размещаются на одинаковом удалении друг от друга на расстоянии r . Так была получена конфигурация, состоящая из 293 узлов — центров единичных окружностей (рис. 2).

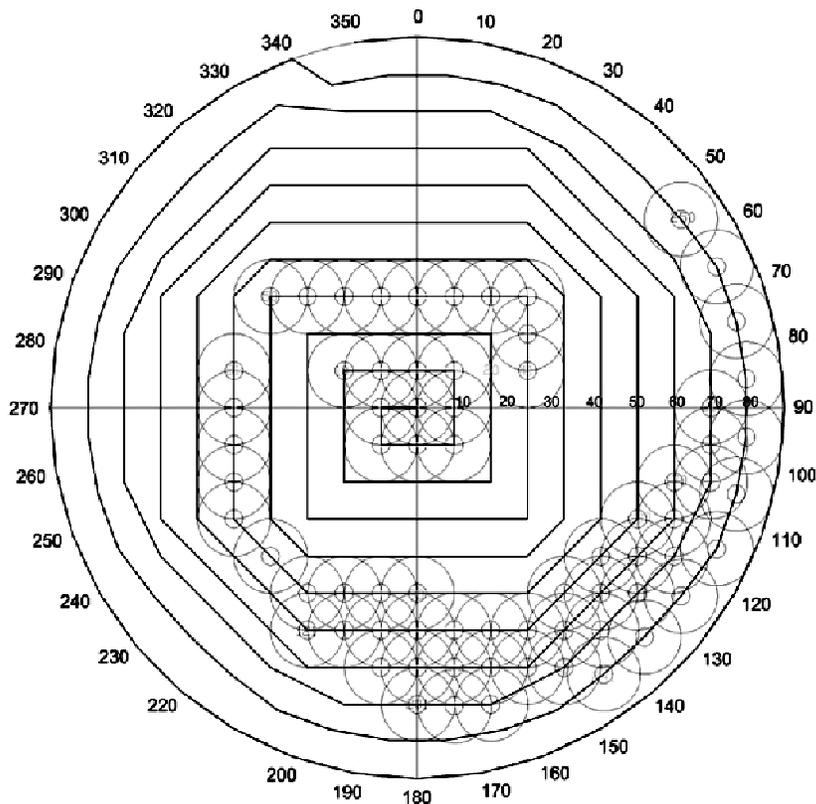


Рис. 2. Конфигурация узлов-центров единичных окружностей на полярной сетке Шмидта (для наглядности приведено положение части единичных окружностей)

Для каждой полученной единичной окружности были определены декартовы координаты x и y . Они определяются единожды и используются как шаблонные при последующих вычислениях, поэтому метод нахождения координат узлов не существен. В нашем случае они определялись вручную в программе AutoCad.

Поскольку плоскости трещин описываются полярными координатами (азимут и углом падения), для их перевода в декартовы координаты используются некоторые преобразования. Учитывая, что шкала углов падений, отсчитываемая от центра окружности (0°) до собственно окружности (90°) неравнопромежуточная, длина отрезка, соответствующего значению определенного угла падения трещины, вычисляется по формуле [3]:

$$r = \sqrt{2R' \sin \beta / 2}, \tag{1}$$

где r — длина отрезка, соответствующего значению определенного угла падения трещины; β — угол падения; R' — радиус круга (для стандартной диаграммы $R = 10$ см).

Для перехода к декартовым координатам используются следующие формулы:

$$x = r \cos (90 - \alpha), \tag{2}$$

$$y = r \sin (90 - \alpha), \tag{3}$$

где x и y — декартовы координаты точек-проекций трещин, r — длина отрезка, соответствующего значению определенного угла падения трещины, α — азимут падения трещины.

Для подсчета количества точек в каждой единичной окружности составляется матрица, которая представляет собой некий шаблон в программе Microsoft Excel. По вертикали находятся элементы залегания выявленных трещин, преобразованные в декартовы координаты по формулам (2) и (3). По горизонтали располагаются декартовы координаты всех единичных окружностей (в нашем случае их 293).

Попадание любой точки в ту или иную единичную окружность задается условием

$$\left[(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 \right] \leq r^2, \quad (4)$$

где x_i и y_i — координаты центра i -той единичной окружности, а x_j и y_j — координаты j -той точки-проекции трещины на диаграмме, r — единичный радиус.

Поскольку радиус r единичной окружности равен 1, данное условие приобретает следующий вид:

$$\left[(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 \right] \leq 1. \quad (5)$$

Далее во все ячейки данной матрицы задается условие вида «если неравенство для определенной ячейки „ $(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 \leq 1$ “ — истинно, то этой ячейке IJ присваивается значение 1, если ложно, то 0».

Под координатами центров единичных окружностей (по горизонтали) помещается функция-счетчик, позволяющая суммировать количество точек, попавших в площадь данной единичной окружности.

После преобразования количества точек, попавших в площадь каждой единичной окружности в долю от общего числа выявленных трещин (в процентах), необходимо транспонировать горизонтальную таблицу с координатами центров единичных окружностей и полученными данными по относительной плотности точек.

Полученная таблица, состоящая из трех столбцов — координаты x , координаты y и плотности точек, готова для импорта в любую программу для построения изолиний, например, Surfer (рис. 3).

Применение подобного шаблона на практике показывает, что он значительно облегчает трудоемкий процесс построения круговой диаграммы трещиноватости для больших объемов данных при массовых замерах ориентировки трещин.

Вышеописанный алгоритм построения диаграмм трещиноватости может быть осуществлен в различных программных средах и доработан под конкретные инженерные цели и задачи, например для анализа пространственной анизотропии фильтрационных свойств трещиноватых пород.

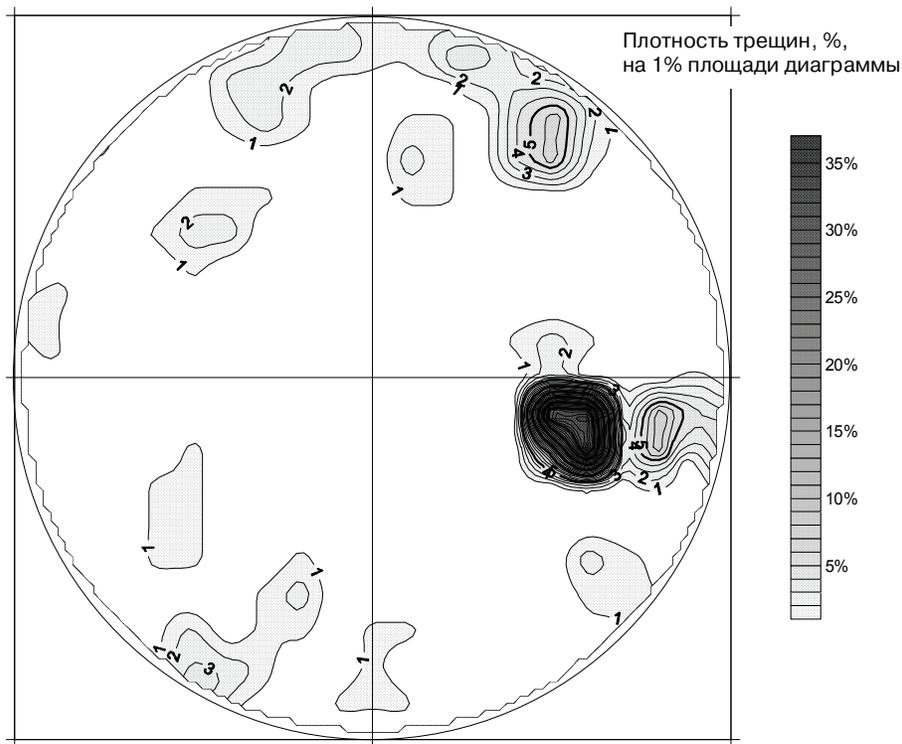


Рис. 3. Пример построения изолиний интенсивности трещиноватости

Для определения фильтрационной анизотропии скальных массивов можно использовать аналитическую зависимость, описывающую скорость течения воды через гладкую трещину, предложенную Г.М. Ломизе [4] для условий ламинарного течения

$$V = \gamma b^2 I / 12\mu, \quad (6)$$

где V — скорости течения, γ — плотность воды, μ — коэффициент вязкости, b — ширина трещины, I — гидравлический уклон.

Для системы параллельных трещин с шагом a скорость течения будет равна средневзвешенной величине скорости по трещине и межтрещинному целику:

$$V = (b/a)(\gamma b^2 I / 12\mu) = \gamma b^3 I / 12\mu a. \quad (7)$$

Уравнение (7) описывает скорость течения воды через систему трещин, ориентированных параллельно вектору градиента напора, поэтому его можно представить в виде

$$\vec{V} = \gamma b^3 \vec{I} / 12\mu a, \quad (8)$$

где \vec{V} — вектор скорости фильтрации, \vec{I} — вектор градиента напора.

В случае, если \vec{I} образует с плоскостью трещины угол ψ , то его проекция (I') на плоскость трещины будет равна

$$I' = \vec{I} \cos \psi, \quad (9)$$

а проекция \vec{V} на плоскость трещины

$$V' = \vec{V} \cos \psi. \quad (10)$$

Умножение левой и правой частей выражения (8) на $\cos \psi$

$$\vec{V} \cos \psi = \gamma b^3 \vec{I} \cos \psi / 12\mu a \quad (11)$$

показывает, что проектирование \vec{V} и \vec{I} на плоскость трещины не приводит к изменению величины коэффициента фильтрации, причем коллинеарность этих векторов сохраняется при их проектировании на любую плоскость, несмотря на то, что \vec{V} не коллинеарно направлению движения воды в плоскости трещины. Некоторые авторы ошибочно полагают, что направление воды в плоскости трещины совпадает с направлением \vec{V} , а \vec{V} не коллинеарно \vec{I} . Следствием таких представлений является проблема двойственности коэффициентов фильтрации трещиноватых пород [10]. Предположим, что \vec{V} и \vec{I} не коллинеарны, а их модули больше нуля. Но в перпендикулярной вектору \vec{I} трещине \vec{V} превращается в нуль-вектор, а это возможно только в случае коллинеарности \vec{V} и \vec{I} , что противоречит предположению, следовательно, \vec{V} и \vec{I} коллинеарны.

На основании (10) и (11) при условии коллинеарности векторов \vec{V} и \vec{I} , получаем

$$V' = \frac{\gamma b^3 \vec{I} \cos \psi}{12\mu a}. \quad (12)$$

Очевидно, что

$$\cos \psi = \sin(90 - \psi) = \sin \rho, \quad (13)$$

если $\rho = 90 - \psi$.

Для перехода к уравнению, задающему угол между плоскостью обнажения и плоскостью трещины в сферических координатах, представим его сначала в прямоугольной системе координат. В декартовой системе координат X, Y, Z сферическими координатами ориентировки плоскости обнажения, перпендикулярной вектору \vec{I} , будем считать (φ, θ) , где φ — азимут падения, θ — угол падения, а сферическими координатами плоскости трещин (α, β) , где α — азимут падения, β — угол падения. Угол ρ между двумя плоскостями находится из выражения [2]:

$$\cos \rho = \frac{X_1 X_2 + Y_1 Y_2 + Z_1 Z_2}{\sqrt{(X_1^2 + Y_1^2 + Z_1^2)(X_2^2 + Y_2^2 + Z_2^2)}}, \quad (14)$$

где X_1, Y_1, Z_1 и X_2, Y_2, Z_2 — декартовы координаты концов векторов, перпендикулярных соответственно плоскости обнажения и плоскости трещины.

Используя формулы перехода от декартовых координат к сферическим [2]:

$$X_1 = R \sin \theta \cos \varphi, \quad X_2 = R \sin \beta \cos \alpha, \quad (15)$$

$$Y_1 = R \sin \theta \sin \varphi, \quad Y_2 = R \sin \beta \sin \alpha, \quad (16)$$

$$Z_1 = R \cos \theta, \quad Z_2 = R \cos \beta, \quad (17)$$

переходим к уравнению, задающему угол между плоскостью обнажения и плоскостью трещины в сферических координатах:

$$\sin \rho = \sqrt{1 - \cos^2 \rho} = \sqrt{1 - (\cos \theta \cos \beta + \sin \theta \sin \beta \cos(\varphi - \alpha))^2}. \quad (18)$$

Из (12), (13) и (18) следует, что

$$V' = \frac{\gamma b^3 \bar{I} \sqrt{1 - (\cos \theta \cos \beta + \sin \theta \sin \beta \cos(\varphi - \alpha))^2}}{12 \mu a}. \quad (19)$$

Используя формулу Дарси $k = V/I$ и на основании (19), при значении плотности воды 1 г/см^3 и вязкости $1 \text{ г/см}\cdot\text{с}$, модуль вектора коэффициента фильтрации \bar{I} , перпендикулярного плоскости (φ, θ) для скального массива с одной системой трещин, можно оценить по формуле

$$k = \frac{b^3 \sqrt{1 - (\cos \theta \cos \beta + \sin \theta \sin \beta \cos(\varphi - \alpha))^2}}{12 a}. \quad (20)$$

При наличии в скальном массиве n -го количества систем трещин k будет равен сумме k_i , определенных по формуле (20) для каждой i -той системы трещин. В этой формуле a и b имеют размерность (см), а k — (см/с). Следует учитывать, что данная формула применима при ламинарном режиме фильтрации, а при градиентах гидравлического напора > 1 в трещинах шириной ≥ 1 мм возникает турбулентный режим [4].

По нашим данным, анализ фильтрационной анизотропии скального массива существенно облегчается, если результаты вычислений k представить графически на сетке Шмидта. Для построения круговой диаграммы коэффициентов фильтрации берется та же конфигурация узлов-центров единичных окружностей, расположенных по спирали с шагом 1 см для построения диаграммы трещиноватости. Только теперь данные узлы являются базовыми направлениями осуществления фильтрации в массиве горных пород. Для каждого базового направления выполняются расчеты коэффициента фильтрации по формуле (20).

Для построения поля изолиний коэффициентов фильтрации можно использовать любую программу для построения изолиний, например Surfer (рис. 4). Данная диаграмма отражает относительное значение коэффициента фильтрации (в долях от максимального) в зависимости от ориентировки плоскости, перпендикулярно которой происходит фильтрация.

По мнению авторов, предложенные алгоритмы и подходы могут быть широко использованы для решения задач, связанных с оценкой трещиноватости горных пород.

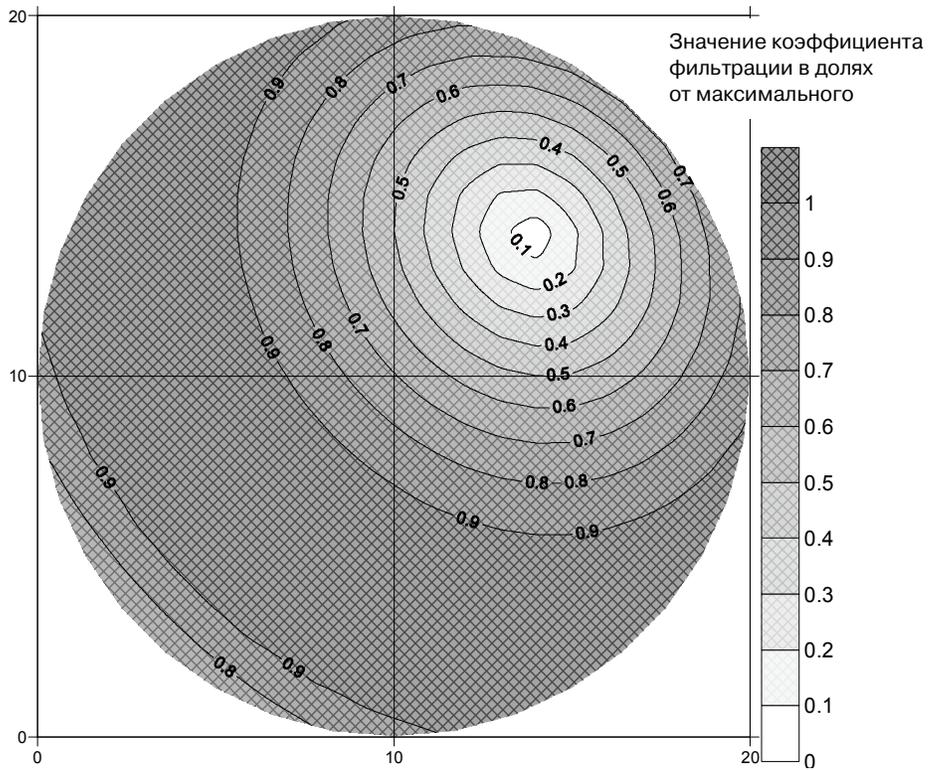


Рис. 4. Пример построения диаграммы фильтрационной анизотропии на сетке Шмидта для системы трещин с азимутом падения 45° , углом падения 45° , с шагом трещин 1 м и шириной 1 см

Диаграмма показывает, что коэффициент фильтрации в направлении перпендикулярном данной системе трещин равен 0.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ажгирей Г.Д. Структурная геология. — М.: Изд-во Московского Университета, 1956.
- [2] Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. — М.: Наука, 1986.
- [3] Газиев Э.Г. Скальные основания бетонных плотин: Монография. — М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2005.
- [4] Ломизе Г.М. Фильтрация в трещиноватых породах. — Госэнергоиздат, 1951.
- [5] Мирошникова Л.С. Опыт применения ЭВМ для обработки результатов инженерно-геологических работ при расчетах и исследованиях скальных массивов // Сборник научных трудов Гидропроекта. — 1988. — Вып. 128. — С. 59—66.
- [6] Молоков Л.А. Взаимодействие инженерных сооружений с окружающей средой. — М.: Недра, 1988.
- [7] Нейштадт Л.И., Пирогов А.А. Методы инженерно-геологического изучения трещиноватости горных пород. — М.: Энергия, 1969.
- [8] Нурпеисова М.Б., Бек А.Ш., Жетибаева А.А. Методика обработки геопространственных данных съемки трещин на компьютере // Инновационные технологии для сбора и обработки геопространственных данных для управления природными ресурсами: Материалы международной конференции, 18—19 сентября 2012 г. — Алматы: КазНТУ им. К.И. Сатпаева. — С. 33—38.

- [9] Рац М.В., Иванова Н.Б., Русин Г.Л., Слепцов Б.Г. Автоматизированная система обработки данных (АСОД) по трещиноватости горных пород для инженерно-геологических целей // *Инженерная геология*. — 1979. — № 5. — С. 78—89.
- [10] Ромм Е.С. Структурные модели порового пространства горных пород. — Л.: Недра, 1985.

LITERATURA

- [1] *Azhgirej G.D.* Strukturnaya geologiya. — М.: Izd-vo Moskovskogo Universiteta, 1956.
- [2] *Bronshitejn I.N., Semendyaev K.A.* Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashhix-sya vtuzov. — М.: Nauka, 1986.
- [3] *Gaziev E'.G.* Skal'nye osnovaniya betonnyx plotin: Monografiya. — М.: Izd-vo Associacii stroitel'nyx vuzov, 2005.
- [4] *Lomize G.M.* Fil'traciya v treshhinovykh porodax. — Gose'nergoizdat, 1951.
- [5] *Miroshnikova L.S.* Opyt primeneniya E'VM dlya obrabotki rezul'tatov inzhenerno-geologicheskix rabot pri raschetax i issledovaniyax skal'nyx massivov // *Sbornik nauchnyx trudov Gidroprojekta*. — 1988. — Vyp. 128. — S. 59—66.
- [6] *Molokov L.A.* Vzaimodejstvie inzhenernyx sooruzhenij s okruzhayushhej sredoj. — М.: Nedra, 1988.
- [7] *Nejshadt L.I., Pirogov A.A.* Metody inzhenerno-geologicheskogo izucheniya treshhinovatosti gornyx porod. — М.: E'nergiya, 1969.
- [8] *Nurpeisova M.B., Bek A.Sh., Zhetibaeva A.A.* Metodika obrabotki geoprostranstvennyx dannyx s'emki treshhin na komp'yutere//Innovacionnye texnologii dlya sbora i obrabotki geoprostranstvennyx dannyx dlya upravleniya prirodnyimi resursami: Materialy mezhdunar. konf., 18—19 sentyabrya 2012 g. — Almaty: KazNTU im. K.I. Satpaeva. — S. 33—38.
- [9] *Rac M.V., Ivanova N.B., Rusin G.L., Slepcov B.G.* Avtomatizirovannaya sistema obrabotki dannyx (ASOD) po treshhinovatosti gornyx porod dlya inzhenerno-geologicheskix celej // *Inzhenernaya geologiya*. — 1979. — № 5. — S. 78—89.
- [10] *Romm E.S.* Strukturnye modeli porovogo prostranstva gornyx porod. — Л.: Nedra, 1985.

COMPUTER TECHNOLOGIES APPLICATION FOR THE SOLUTION OF THE TASKS OF ROCKS FRACTURING INVESTIGATION

V.S. Kuzmin¹, A.S. Kopytin²

¹Ecological Faculty

Peoples' Friendship University of Russia
Podolskoye Shosse, Moscow, Russia, 113093

²JSC "Institute Hydroproject"

Volokolamskoye shosse, 2, Moscow, Russia, 125993

As far as fracturing assessment is concerned the information completeness of the data is responsible both for the geoeological forecasts reliability and the engineering decisions implementation. Authors developed a new technique allowing to provide a computer assisted process of drawing charts for the assessment of rock fracturing and an filtration anisotropy. The detailed description and justification of this technique as well as examples of its application are provided.

Key words: rocks jointing (fracturing), fracturing assessment, fracturing charts, filtration anisotropy, coefficient of permeability.