

УДК 622.02:539.2/.8

д.т.н. Дрибан В. А.,

к.т.н. Дуброва Н. А.

(РАНИМИ, г. Донецк, ДНР, viktor-driban@yandex.ru, dubrovan@mail.ru)

ФИЛЬТРАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ МНОГОКРАТНО ПОДРАБОТАННОГО МАССИВА

Построена и верифицирована диффузионно-дисперсионная модель распределения вредных загрязняющих веществ, адекватно описывающая геомеханические и фильтрационные процессы в многократно подработанном массиве горных пород. Путем решения обратной задачи рассеивания получены коэффициенты фильтрации многократно подработанного массива горных пород в условиях Центрального района Донбасса.

Ключевые слова: многократно подработанный массив, проницаемость горных пород, фильтрационные свойства массива, коэффициент фильтрации.

Особую актуальность решение гидро-геомеханических и фильтрационных задач приобретает в горнодобывающих регионах, где естественная природная структура массива горных пород нарушается проведением подземных выработок различного назначения. Наиболее остро эта проблема проявилась в Центральном районе Донбасса, где подработка ведется более 130 лет по десяткам угольных пластов, что привело к кардинальному изменению геологической среды целого региона и, в частности, физико-механических и фильтрационных свойств горных пород.

В ранее опубликованных работах [1–4], посвященных оценке степени нарушенности массива горных пород было показано, что ведение горных работ в условиях ЦРД приводит к кардинальному изменению проницаемости горных пород со стабилизацией значений на уровне, соответствующем проницаемости зон водопроводящих трещин. Данное обстоятельство позволило сформулировать гипотезу, о том, что в процессе ведения горных работ породный массив трансформируется в квазиоднородную по фильтрационным характеристикам среду. Для подтверждения полученной оценки изменения фильтрационных характеристик деформирующегося массива горных пород были использованы нетрадиционные дополнительные экспериментальные данные о распределении вредных загрязняющих

веществ (ВЗВ) в массиве как наиболее представительные, полные и удовлетворяющие задаче исследования.

Высокая степень техногенной нагрузки в Горловской горно-промышленной агломерации привела к аварийной ситуации отравления шахтной атмосферы летально опасными концентрациями ВЗВ в 90-х гг. на шахтах «Углегорская» и «Александр-Запад», в силу чего были проведены уникальные исследования и получен широкий спектр фактических гидрогеохимических данных, включающих информацию о концентрациях и распространении ВЗВ в массиве [5].

На основе данных гидрогеохимического опробования по 58 наблюдательным скважинам и более чем 1500 проб были построены модели распределения загрязнителей в массиве (рис. 1). Объем массива составляет около 60 км³.

Еще раз подчеркнем, что район, в котором расположены потенциальные источники загрязнения (Горловский химзавод, ПО «Стирол» и пр.), в течение многих лет неоднократно подрабатывался. В качестве примера, иллюстрирующего интенсивность техногенной нагрузки на исследуемом участке, приведен рисунок 2, где на разрезе вкрест простирания горных пород совместно визуализированы зоны влияния аппроксимированных контуров горных работ и очаг загрязнения массива ацетоном.

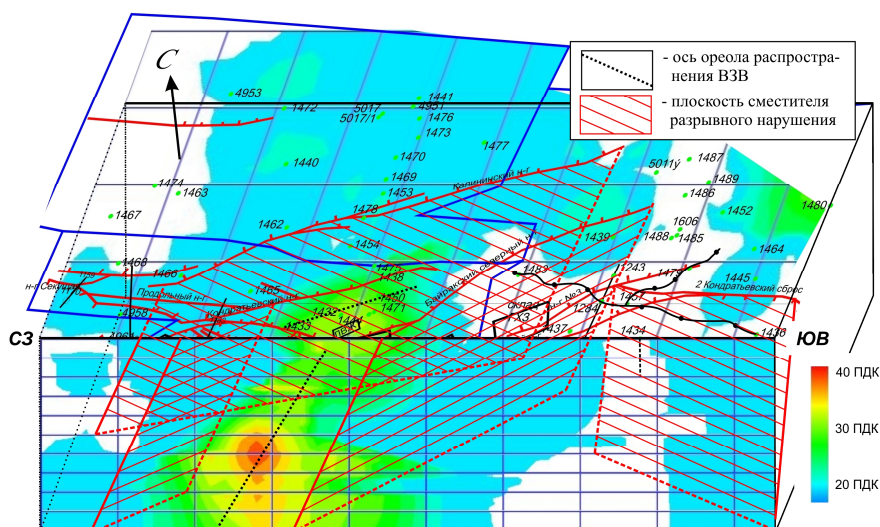


Рисунок 1 Ореол загрязнения дифенилолпропаном

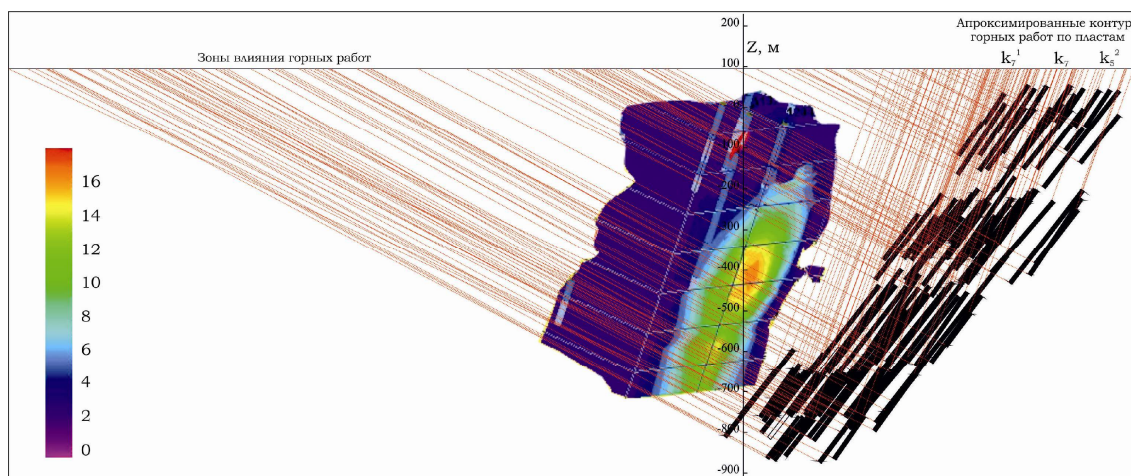


Рисунок 2 Разрез вкрест простирания горных пород с визуализацией зон влияния аппроксимированных контуров горных работ и очага загрязнения ацетоном

Анализ полученных моделей (см. рис. 1) выявил дуализм воздействия структурных геологических неоднородностей на распространение ВЗВ. Так, геометрия тела загрязнения наследует сходные элементы залегания основных тектонических структур по простиранию и падению и пространственно ограничена плоскостями их сместителей. При этом разрывные нарушения задают общее движение миграционного потока в блоке и представляют собой «миграционный коридор». Однако тектонические нарушения с направлением падения сместителя, про-

тивоположным направлению падения углепородной толщи, выполняют функцию тектонического экрана (барьера) при распространении ВЗВ.

Для корректной обработки экспериментальных данных разработана безразмерная модель распределения загрязнителей в массиве и на базе аналитического моделирования и статистического анализа выявлены типовые закономерности их распределения. Нормирование модели производилось по максимальным значениям концентраций и радиусу зоны их сосредоточения на каждом из срезов. Для реализации указанного подхо-

да полученные статические поэлементные модели были нарезаны горизонтальными и вертикальными сечениями с интервалом 100–200 м. На каждый горизонтальный и вертикальный срез были вынесены основные направления координатной сетки таким образом, чтобы точка пересечения координатных осей находилась в центре области (окружности), ограничивающей максимальные концентрации загрязнителя на данной глубине (для горизонтальных сечений) и на данном направлении (для вертикальных). В качестве пространственного показателя распределения ВЗВ использован параметр, характеризующий удаленность точки с известной концентрацией загрязнителя от центра очага загрязнения в единицах, приведенных к размеру радиуса тела максимально обнаруженной концентрации загрязнителя. На основании полученных данных были построены графики зависимости нормированных концентраций загрязнителей от нормированной пространственной составляющей их обнаружения.

Близость функций распределения загрязнителей оценивалась коэффициентом тесноты связи, который рассчитывается по формуле:

$$k_{\text{св}} = 1 - \left(\int_a^b (f(x) - g(x))^2 dx \right)^{0.5} \left(\int_a^b g(x)^2 dx \right)^{-0.5}. \quad (1)$$

Коэффициент тесноты связи рассчитывался между кривыми, характеризующими распределение загрязнителя на одном горизонте в направлении основных осей координатной сетки. Характер полученных распределений имеет высокие коэффициенты тесноты связи от 0,71 до 0,97 для различных глубин, направлений и веществ. Данные результаты позволяют говорить о типовых закономерностях распределения ВЗВ.

Сделанные ранее выводы о трансформации массива в квазиоднородную среду дают возможность построения относительно простой фильтрационной модели на основе данных о распространении загрязнителей.

Согласно [6], в сравнительно однородных породах, квазигомогенных по филь-

трационным свойствам, миграция описывается в рамках моделей микродисперсии: предполагается, что все механизмы процесса идут на одном микроуровне, отвечающем репрезентативному элементу гомогенной пористой или трещиноватой среды. Для трещиноватых пород это предполагает: пренебрежимо малое влияние пористости породной матрицы; рассмотрение объемов массива, удовлетворяющих условию сплошности среды; синхронность заполнения веществом трещин разного порядка в пределах физической точки репрезентативного минимального объема среды.

В работе [6] отмечено, что для крупноблочных трещиноватых пород или пород с каналовым механизмом миграции последние два условия выполнимы лишь для больших пространственно-временных масштабов, до достижения которых такие породы должны рассматриваться как гетерогенная среда.

Заметим, что описанные в [6] принципы в рамках решаемой нами задачи практически выполнены, что дает нам возможность построения аналитической модели распространения ВЗВ в первом приближении. Таким образом, задачу можно формализовать следующим образом.

Требуется определить поле распределения концентраций ВЗВ в плоскости при наличии постоянно действующего во времени источника загрязнений интенсивностью 1, занимающего некоторую область Ω . В общем случае диффузионно-дисперсионный перенос описывается уравнением, базирующимся на феноменологическом законе Фика [7]:

$$n \frac{\partial c}{\partial t} + \nabla J + W_s = 0, \quad (2)$$

где функция $J(c)$ отвечает массовому потоку (статистически осредненному в пределах минимальных репрезентативных объемов пористой или трещиноватой среды); W_s — объемная интенсивность поглощения-выделения, обусловленная проявлением внутренней гетерогенности пород (двойная

пористость, регулярная слоистость и т.п.) или физико-химическими взаимодействиями.

Вид функционала $\nabla J(c)$, вообще говоря, зависит от мерности процесса. В общем трехмерном случае в декартовой системе координат описывается формулой:

$$\nabla J = \frac{\partial}{\partial x_i} (v_i c) - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ij} \frac{\partial c}{\partial x_j} \right), \quad (3)$$

где D_{ij} — компоненты тензора микродисперсии, зависящие от рассеивающих свойств среды.

Высказанные выше соображения о трансформации многократно подработанного массива в квазигомогенную среду позволяют существенно упростить выражения (2), (3). В безразмерных координатах указанные формулы принимают вид:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} = \frac{\partial \Phi}{\partial \tau}, \quad (4)$$

где τ — обобщенный параметр, увязывающий время протекания процесса, диффузионно-фильтрационные характеристики массива и геометрические параметры области источника.

На основании частного решения уравнения диффузии (фильтрации, теплопро-

водности) поле распределений нормированных концентраций ВЗВ можно записать в следующем виде:

$$\Phi(\vec{r}_0, t) = \int_0^t \iint_{\Omega} \tau^{-1} e^{-\frac{|\vec{r}-\vec{r}_0|^2}{4k\tau}} d\Omega d\tau, \quad (5)$$

где r_0 — радиус-вектор данной точки плоскости сечения.

Анализ фактических распределений загрязнителей позволяет, по крайней мере, в первом приближении аппроксимировать область максимальных концентраций в виде круга радиуса R . В этом случае выражение (5) упрощается и принимает приемлемый для счета и анализа одномерный вид:

$$\Phi(r_0, t) = \int_0^t \int_0^{2\pi} \int_0^1 r \tau^{-1} e^{-\frac{|\vec{r}-\vec{r}_0|^2}{4k\tau}} dr d\theta d\tau, \quad (6)$$

где r_0 — радиус-вектор; r, θ — полярные координаты.

На рисунке 3 представлены типовые кривые распределения концентраций для различных значений обобщенного параметра в зависимости от относительного (приведенного к радиусу области максимальных концентраций) расстояния.

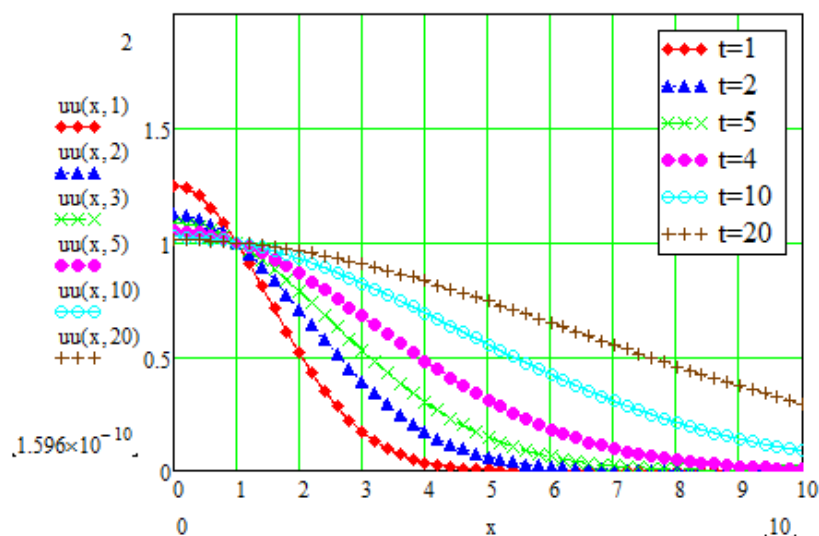


Рисунок 3 Типовые кривые распределения концентраций для различных значений обобщенного параметра в зависимости от относительного расстояния

Итак, построена теоретическая модель, описывающая поля распределения ВЗВ. Следующим необходимым шагом является верификация указанной модели по экспериментальным данным. Для этого были проанализированы функции невязки типовых распределений и фактических данных:

$$f(\tau) = \sum_i (\Phi(x_i, \tau) - yf_i)^2, \quad (7)$$

где yf_i — фактические относительные концентрации; x_i — относительные расстояния до центра пятна загрязнения; τ — обобщенный параметр, определяемый по формуле $\tau = 4ktR^{-2}$.

Расчет выполнен для временного интервала длительностью 10 лет, выбор которого обоснован временем обнаружения первых проявлений ВЗВ в горных выработках. На рисунке 4 представлена кривая невязки для О-ксилола, направление — восток-запад, горизонт «-120» м. Минимум функции невязки соответствует максимальным значениям тесноты связи фактических данных и теоретической кривой.

Таким образом, произведены перерасчеты и построены планиметрические модели распространения ВЗВ, а также решена обратная задача: по данным имитационного моделирования найдены параметры диффузионно-дисперсионного процесса протекающего в массиве.

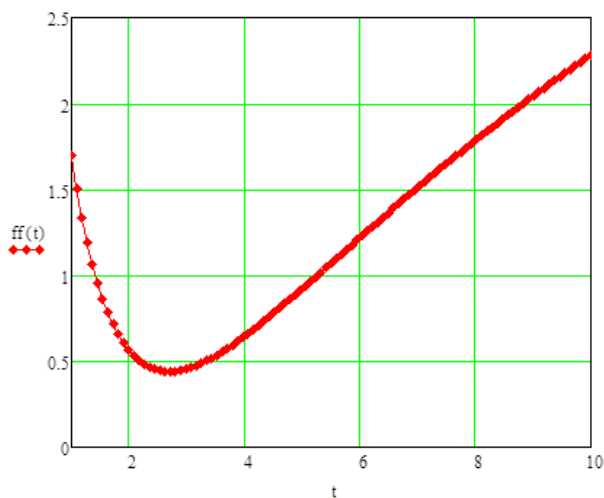


Рисунок 4 Кривая невязки для О-ксилола (направление — восток-запад, горизонт «-120» м)

Расчет выполнялся совместно для сопряженных направлений (восток-запад, север-юг) и в направлении залегания основных тектонических структур, однако в связи со спецификой (отсутствием полноты) исходных данных некоторые направления рассмотрены одиночно.

Поскольку вода является основным «переносчиком» ВЗВ в массиве, то появляется возможность отождествить диффузионно-дисперсионные коэффициенты с коэффициентами фильтрации и проницаемости.

Пример полученных моделей представлен на рисунке 5.

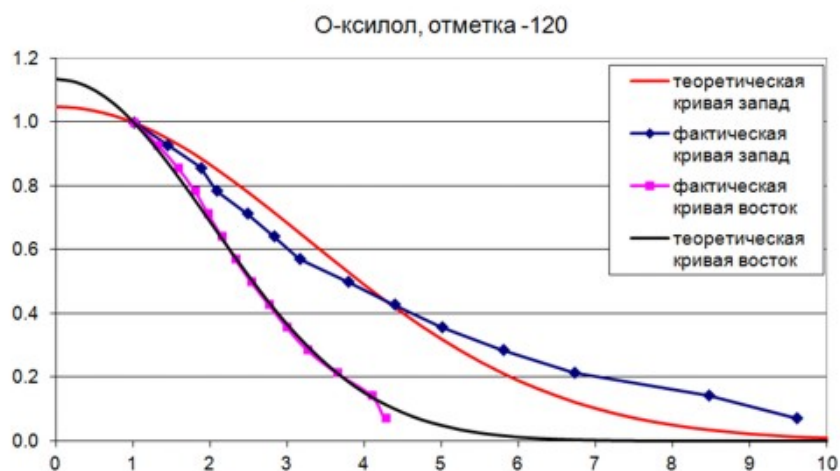


Рисунок 5 Типовые кривые распределения концентраций О-ксилола на горизонте «-120» м, направление — запад-восток

Полученные теоретические значения коэффициентов фильтрации изменяются от единиц до сотен метров в сутки и хорошо коррелируются с результатами экспериментальных исследований по запуску трассеров, выполненных Ростовским гидрохимическим институтом [5]. Так, установленная скорость миграции ВЗВ в массиве по данным режимных наблюдений и трассерных экспериментов 100–1400 м/сут при преобладающих значениях 200–600 м/сут. Время перемещения трассеров от источника до горных выработок варьируется от 5–14 до 30–37 суток по различным шахтам. Данные величины, согласно классификации Плотникова Н. А. [8], соответствуют первой группе — очень хорошо проницаемым породам (100–1000 Дарси) — и полностью соответствуют ранее сделанным выводам о скачкообразном (до 5 порядков) росте проницаемости многократно подработанных массивов.

Построена и верифицирована диффузионно-дисперсионная модель распределения ВЗВ, адекватно описывающая реальные геомеханические и фильтрационные процессы в многократно подработанном массиве горных пород. Путем решения обратной задачи рассеяния получены коэффициенты фильтрации многократно подработанного массива горных пород, которые в условиях ЦРД изменяются от еди-

ниц до сотен метров в сутки и соответствуют трансформации массива до проницаемого и очень хорошо проницаемого. А также реализована принципиальная возможность решения обратной задачи — восстановления, уточнения и прогноза изменения фильтрационных свойств массива по точечным (малым) данным о концентрациях загрязнителей, что представляет интерес для последующего прогноза экологической ситуации в регионе.

Отметим, что важной особенностью обратных геофильтрационных задач является их относительно слабая устойчивость, когда малые погрешности исходных данных приводят к большим погрешностям результата. Поэтому решение таких задач имеет свою серьезную специфику. Не вдаваясь в детали данного вопроса, заметим только, что алгоритм, используемый для решения обратной задачи, должен быть апробирован на чувствительность к определяемому параметру. Оправданным является применение только чувствительных алгоритмов. Это означает, что при подстановке в них реально возможных диапазонов изменения параметров измеряемых величин изменяются достаточно ощутимо по сравнению с их фоновыми колебаниями и точностью измерений. Заметим, что построенная в работе модель вполне соответствует указанным требованиям.

Библиографический список

1. Дрибан, В. А. Особенности деформирования массивов горных пород ЦРД при многократной долгосрочной подработке [Текст] / В. А. Дрибан, Н. Н. Грищенко, Н. А. Дуброва // *Форум гірників — 2013 : матеріали міжнар. конф. — Дніпропетровськ : Національний гірничий університет, 2013. — Т. 2. — С. 226–232.*
2. Дрибан, В. А. Особенности формирования техногенных коллекторов при отработке угольных пластов в условиях ЦРД [Текст] / В. А. Дрибан, Н. Н. Грищенко, Е. Д. Ходырев, Н. А. Дуброва // *Наукові праці УкрНДМІ : зб. наук. праць. — Донецьк, УкрНДМІ НАН України, 2011. — №13 (I). — С. 220–237.*
3. Driban, V. Evaluation of changes in rock mass permeability due to long-time repeated mining / V. Driban, N. Dubrova // *PROGRESSIVE TECHNOLOGIES OF COAL, COALBED METHANE, AND ORES MINING. — CRC Press/Balkema, Netherlands, 2014. — pp. 167–174.*
4. Дрибан, В. А. Оценка изменения проницаемости трещиноватой деформируемой среды [Текст] / В. А. Дрибан, Н. А. Дуброва, Л. П. Полякова // *Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр : 2-я Международная научная школа академика К. Н. Трубецкого. — М., 2016. — С. 57–60.*

5. Результаты разведки очагов загрязнения и создания сети наблюдательных скважин на полях шахт Центрального района Донбасса [Текст]: отчет о НИР (заключ.) / Укруглегеология; рук. О. А. Куц. — ГР 39–90; Инв. 743/Л. — Донецк, 1993. — 117 с.

6. Мироненко, В. А. Проблемы гидрогеоэкологии. Т. 1. Теоретическое изучение и моделирование геомиграционных процессов [Текст] / В. А. Мироненко, В. Г. Румынин. — М. : Изд. Московского государственного горного университета, 1998. — 611 с.

7. Лукнер, Л. Моделирование миграции подземных вод [Текст] / Л. Лукнер, В. М. Шестаков. — М. : Недра, 1986.

8. Справочное руководство гидрогеолога [Текст] / Под ред. В. М. Максимова. — Л. : Недра, 1967. — 592 с.

© Дрибан В. А.

© Дуброва Н. А.

*Рекомендована к печати д.т.н., зав. ОКТ РАНІМІ Глуховым А. А.
д.т.н., проф., зав. каф. СГ ДонГТУ Литвинским Г. Г.*

Статья поступила в редакцию 22.09.17.

д.т.н. Дрибан В. О., к.т.н. Дуброва Н. О. (РАНІМІ, м. Донецьк, ДНР)

ФІЛЬТРАЦІЙНА МОДЕЛЬ БАГАТОРАЗОВО ПІДРОБЛЕНОГО МАСИВУ

Побудовано та верифіковано дифузійно-дисперсійну модель розподілу шкідливих забруднюючих речовин, що адекватно описує геомеханічні та фільтраційні процеси у багаторазово підробленому масиві гірських порід. Шляхом розв'язання оберненої задачі розсіювання одержано коефіцієнти фільтрації багаторазово підробленого масиву гірських порід в умовах Центрального району Донбасу.

Ключові слова: багаторазово підроблений масив, проникність гірських порід, фільтраційні властивості масиву, коефіцієнт фільтрації.

Doctor of Tech. Sc. Driban V. A., PhD Dubrova N. A. (RARDI, Donetsk, DPR, viktordriban@yandex.ru, dubrovan@mail.ru)

FILTRATION MODEL OF A REPEATEDLY WORKED-OUT MASSIF

A diffusion-dispersion model for the distribution of harmful pollutants adequately describing the geomechanical and filtration processes in the repeatedly worked-out rock massif was constructed and verified. By solving the inverse scattering problem, the filter coefficients of the repeatedly worked-out rock massif are obtained in the conditions of the Central region of the Donbas.

Key words: repeatedly worked-out rock massif, permeability of rocks, filtration properties of the massif, filtration coefficient.