

УДК 622.465.3

**Евстратенко Л.И.**, аспирант  
(Государственный ВУЗ «КНУ»)

**ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМА ДВИЖЕНИЯ ВОЗДУХА В  
ЗОНАХ ОБРУШЕНИЙ РУДНИКОВ КРИВБАССА**

**Евстратенко Л.И.**, аспірант  
(Державний ВНЗ «КНУ»)

**ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМУ РУХУ ПОВІТРЯ В  
ЗОНАХ ОБВАЛЕНЬ РУДНИКІВ КРИВБАСУ**

**Evstratenko L.I.**, Doctoral Student  
(State H E I «KNU»)

**RESEARCH OF AIR MOTION IN CAVING  
ZONES OF THE KRYVBASS MINES**

**Аннотация.** При добыче руды с глубоких рудников на эффективность функционирования вентиляционных систем значительное влияние оказывают аэродинамически активные зоны обрушений. В этих условиях для правильного решения основных вопросов по повышению эффективности проветривания глубоких рудников важной задачей является достоверная оценка параметров фильтрационных потоков и режимов движения воздуха в пористой среде обрушенных зон рудников.

В статье выполнена оценка параметров фильтрационных потоков и режимов движения воздуха в пористой среде обрушенных зон рудников. Показано, что при фильтрации газов в пористой среде, потери давления более правильно определять по двучленной формуле с учетом параметров породы, по которой происходит движение газа. Получена эмпирическая зависимость между параметром турбулентности пористой среды и коэффициентом проницаемости.

**Ключевые слова:** рудник, зона обрушения, пористая среда, фильтрация газа.

**Введение.** Движение газа в пористой среде обрушенных зон связано с возникновением сильных возмущений, обусловленных чрезвычайно сложной конфигурацией пор. Поэтому, скорости движения газа в пористой среде незначительны, по сравнению с движением в каналах. Факторами такого возмущения являются: множество резких поворотов на сравнительно малых отрезках длины поровых каналов; срыв струи с многочисленных выступов и образование местных вихрей; возникновение возмущений в потоке в результате слияния отдельных струек, которые зачастую разнонаправлены и имеют различную величину скорости. В связи с этим, при фильтрации в пористой среде, отклонение от закона Дарси происходит достаточно плавно и при малых числах Re. Плавный переход одного режима фильтрации в другой при движении газа в пористой среде обусловлен также наличием пор различного диаметра.

При достижении значений числа Рейнольдса выше критического, т.е. когда имеет место увеличение скорости движения флюида в пористой среде, нарушается линейный закон фильтрации и происходит переход через неустойчивую зону к турбулентному режиму.

Целью настоящей публикации является проведение исследований по установлению режимов фильтрации воздуха в пористой среде обрушенных зон рудников Кривбасса.

**Теоретическая часть.** С известной долей приближения, суммарный градиент давления при движении жидкости в порах породы можно представить как сумму потерь от инерционных сил и от сил трения [1, 2]

$$\Delta P = \frac{2L\mu}{k_{np}} v_{\phi} + \frac{2L\rho}{k_T} v_{\phi}^2 \quad (1)$$

где  $\Delta P$  – перепад давления, Па;  $L$  – длина (или толщина слоя) пористой среды, м;  $\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu$  – динамическая вязкость воздуха, Н·с/м<sup>2</sup>;  $v_{\phi}$  – скорость фильтрации, м/с;  $k_{np}$  – коэффициент проницаемости пористой среды, определяемый экспериментально при ламинарном режиме течения;  $k_T$  – коэффициент проницаемости пористой среды, определяемый экспериментально при турбулентном режиме течения.

Турбулентность потока в различных порах возникает не одновременно. Если в некоторых из них движение идет при уже сформировавшемся турбулентном потоке, то в других он может только зародиться. При этом общего перемешивания потока, которое происходит в трубах при турбулентном движении, в пористой среде не может быть из-за наличия перегородки между отдельными порами.

Таким образом, все перечисленные выше факторы снижают критическое значение числа  $Re$  для пористой среды и приводят к плавному переходу режима фильтрации от чисто ламинарного до вполне сформировавшегося турбулентного режима и вызывают его значительно быстрее, чем это наблюдается в единичных каналах (щелях или трубах). Выделить из этого множества фактор, преобладающий для данной пористой среды, пока не представляется возможным.

В условиях сформировавшегося турбулентного режима фильтрации газа в пористой среде, когда коэффициент гидравлического сопротивления  $\lambda_T$  не зависит от параметра  $Re_T$ , для определения потери давления принят параметр, учитывающий суммарно все изложенные выше факторы [3]. Таким параметром для пористой среды является параметр турбулентности  $k_T$  или иначе ее проницаемость при вполне сформировавшемся турбулентном режиме фильтрации.

Все факторы, резко снижающие критическое значение параметра  $Re_T$  для пористой среды по сравнению с трубами и приводящие к плавному отклонению сопротивления при увеличении скорости фильтрации от найденного согласно линейному закону, зависят от структуры порового пространства. Следователь-

но, параметр турбулентности пористой среды  $k_T$  является ее функцией. В свою очередь структура порового пространства обуславливается породообразующим материалом, его укладкой, цементирующим веществом и рядом дополнительных причин, влияющих на обычные характеристики пористой среды: проницаемость, пористость, эффективный диаметр зерна, средний радиус пор и т. д. Поэтому вполне естественно связывают параметр турбулентности пористой среды с обычными характеристиками породы.

Параметр турбулентности пористой среды можно рассчитать по следующей формуле [4]

$$k_T = \frac{gd_{cp}^2}{N_T\gamma}, \quad (2)$$

где  $N_T$  – постоянная величина для определенного гранулометрического состава пористой среды обладающей свойственной лишь ей структурой шероховатости на внешней поверхности кусков и присущим ей эквивалентным диаметром каналов [5]; для устойчивого турбулентного режима в пористой среде можно принимать  $N_T = f$  [5];  $d_{cp}$  – средний диаметр пор, мм;  $\gamma$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $f$  – коэффициент аэродинамического сопротивления пористой среды.

На рис. 1 показана зависимость параметра турбулентности пористой среды от среднего диаметра зерна породы.

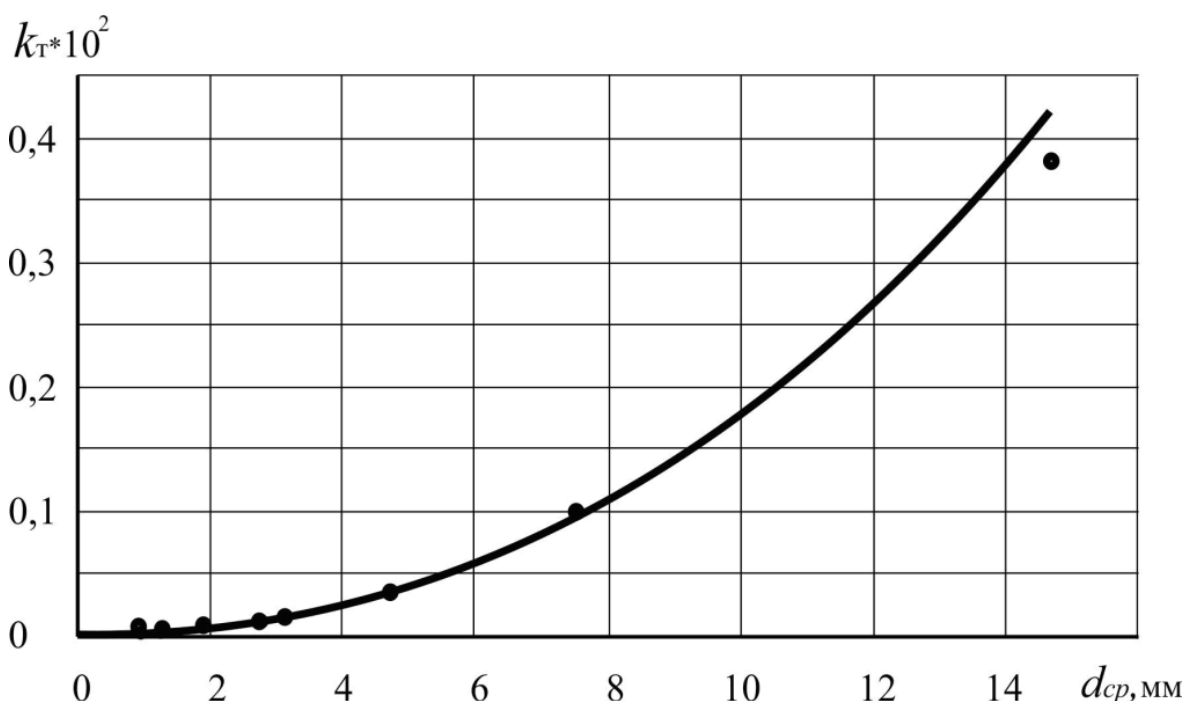


Рисунок 1 - Зависимость  $k_T$  от  $d_{cp}$ .

Как видно из графика, параметр  $k_T$  возрастает с увеличением среднего диаметра пор  $d_{cp}$ , которая определяется по зависимости полученной на основании исследований [6]

$$d_{cp} = 1,311 \exp 0,0575 d_k \quad (3)$$

где  $d_k$  – диаметр частиц породы, мм.

Количество приведенных данных на графике ограничено в связи с тем, что не по всем образцам пористых сред, на которых исследовались режимы фильтрации жидкостей и газов, проводился ситовой анализ породообразующего материала.

Подставляя в выражение (2) зависимость (3) и с учетом того, что  $N_T = f$ , получим

$$k_T = 1,719 \frac{g(\exp 0,0575 d_k)}{f\gamma}$$

Изменение параметра  $k_T$  наблюдается и от коэффициента пористости  $m$  (рис. 2).

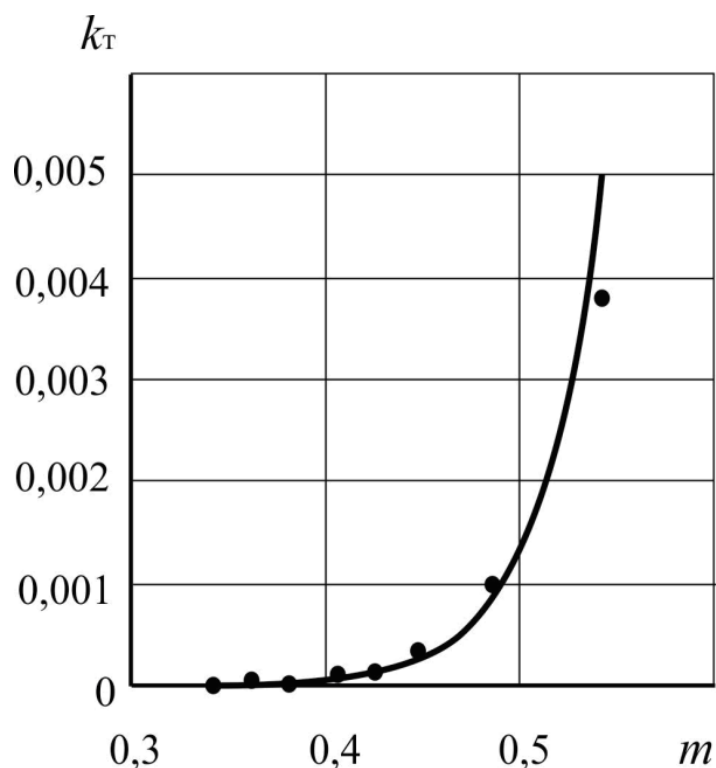


Рисунок 2 - Зависимость  $k_T$  от коэффициента пористости  $m$ .

С увеличением значений  $m$ , параметр турбулентности пористой среды возрастает. Подобная тенденция к изменению параметра  $k_T$  наблюдается и от от-

ношений проницаемости пористой среды к среднему радиусу пор или к эффективному диаметру зерна.

Как видно из графиков рис. 1 и 2, параметр турбулентности пористой среды неоднозначно зависит от тех или иных обычных параметров породы. По-видимому, эта зависимость имеет более сложный характер и не остается постоянной для различных серий пористых сред, образовавшихся при отличных геологических условиях.

Параметр турбулентности пористой среды и проницаемость породы имеют различный физический смысл. Первый обуславливает потерю давления при квадратичном законе фильтрации и имеет размерность длины. Второй характеризует пористую среду при движении в ней жидкостей или газов по закону Дарси и имеет размерность площади. Однако, как видно из рис. 3, некоторая зависимость между параметром турбулентности пористой среды и коэффициентом проницаемости для исследованных образцов породы существует. Это происходит потому, что параметр турбулентности пористой среды обуславливается суммой рассмотренных выше факторов, которые влияют также до некоторой степени и на проницаемость породы, а общее сочетание их, по-видимому, характерно для первого и второго параметров. Найденная эмпирическая зависимость между параметром турбулентности пористой среды и коэффициентом проницаемости нанесена на график (рис. 3) и имеет вид

$$k_T = 1 \cdot 10^{-6} e^{1,402k} \quad (4)$$

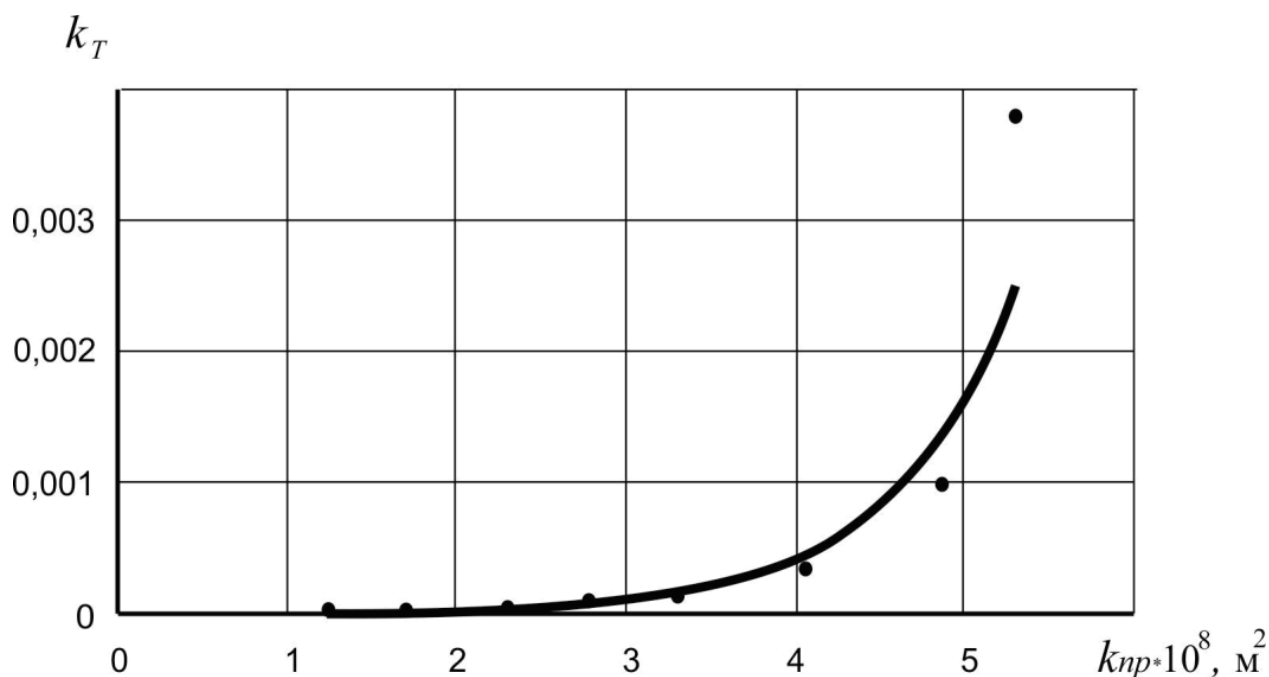


Рисунок 3 - Зависимость параметра турбулентности пористой среды от проницаемости.

**Результаты и их обсуждение.** Полученное выражение не рассчитано на высокую точность определения параметра турбулентности пористой среды по ко-

эффиценту проницаемости, поэтому может быть рекомендовано лишь как оценочное.

Учитывая выражение (4), можно без непосредственного определения величины параметра турбулентности пористой среды, что в некоторых случаях значительно затруднено, приближенно рассчитать потерю давления по двучленному уравнению, которое справедливо в любом диапазоне чисел  $Re_m$ . Для такого оценочного расчета на основании формулы (1) и эмпирического выражения (4) двучленное уравнение можно представить в виде

$$\Delta P = \frac{2L\mu}{k_{np}} v_{\phi} + \frac{2 \cdot 10^6 L\rho}{\exp 1,402k_{np}} v_{\phi}^2$$

**Выводы.** Таким образом, потерю давления при фильтрации газов в пористой среде более правильно определять по двучленной формуле с применением параметров породы, по которой происходит движение газа (проницаемости и турбулентности пористой среды). При малых значениях параметра  $Re$  ошибка в расчете потери давления по уравнению Дарси в сравнении с экспериментом будет незначительной, но при возрастании этого числа значительно выше критического при заданной точности проводимых расчетов будет заметно увеличиваться разница между рассчитанным и замеренным (при экспериментальном исследовании) перепадом давления на участке пористой среды. Во втором случае, при больших значениях параметра  $Re$  расчет по квадратичной зависимости будет приближаться к действительности по мере увеличения скорости фильтрации.

---

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ушаков, К. З. Газовая динамика шахт / К.З. Ушаков. - М.: Изд. МГГУ, 2004. - 481 с.
2. Пятибрат, В.П. Подземная гидромеханика / В.П. Пятибрат. - Ухта: УГТУ, 2002. - 100 с.
3. Шевелев, Г.А. Фильтрация газа в шахтах / Г.А. Шевелев, В.Г. Перепелица. - К.: Наукова думка, 2010. - 291 с.
4. Oshmyansky, I.B. Substantiation of parameters of filtration flows in mining collapsed areas / I.B.Oshmyansky, L.I.Yevstratenko // Balkema, CRC Press: Progressive Technologies of Coal, Coalbed Methane, and Ores Mining. -Taylor & Francis Group, London, 2014. -P. 373 – 378.
5. Черных, А.Д. Открыто-подземная разработка рудных месторождений / А.Д. Черных, Б.Н. Андреев, И.Н. Ошмянский. - К.: Техника, 2010. - 520 с.
6. Изменение газовой проницаемости в напряженных горных породах / В.Г.Перепелица, В.С.Кулинич, Г.А.Шевелев [и др.]// Уголь Украины. - 2006. - № 3. - С. 33-35.

---

#### REFERENCES

1. Ushakov, K. Z. (2004), *Gazovaya dinamika shakht* [Gas dynamics mines], Izd. Moscow state mining University, Moskov, Russia.
2. Pyatibrat, V.P. (2002), *Podzemnaya gidromechanika* [Underground hydromechanics], UGTU, Ukhta, Russia.
3. Shevelev, G.A. and Perepelitsa, V.G. (2010), *Filtratsiya gaza v shakhtakh* [Filtering gas in mines], Naukova Dumka, Kiev, Ukraine.
4. Oshmyansky, I.B. and Yevstratenko, L.I. (2014), "Substantiation of parameters of filtration flows in mining collapsed areas", Balkema, CRC Press: Progressive Technologies of Coal, Coalbed Methane, and

Ores Mining ,Taylor & Francis Group, London, pp. 373 – 378.

5. Chernyh, A.D., Andreev, B.N. and Oshmyansky, I.B. (2010), *Otkryto-pogzemnaya razrabotka rudnykh mestorohzdeniy* [Open-pit and underground development of mineral deposits], Techika, Kiev, Ukraine.

6. Perepelitsa, V.G., Kulinich, V.S., Shevelev, G.A. and Kulinich, S.V. (2006), “Changes in gas permeability in stressed rocks”, *Coal of Ukraine*, no. 3, pp. 33-35.

---

### Об авторе

*Евстратенко Лилия Игоревна*, аспирант кафедры рудничной аэрологии и охраны труда, Государственное высшее учебное заведение «Криворожский национальный университет» (ГБУЗ «КНУ»), Кривой Рог, Украина, [Liliya.evstratenko@gmail.com](mailto:Liliya.evstratenko@gmail.com).

### About the author

*Evstratenko Lilia Igorevna*, Doctoral Student, Department of mine aerology and labour protection, State Higher Education Institution «National University of Krivoy Rog » (SHEI «KNU»), Krivoy Rog, Ukraine, [Liliya.evstratenko@gmail.com](mailto:Liliya.evstratenko@gmail.com).

---

**Анотація.** При видобутку руди у глибоких рудниках на ефективність функціонування вентиляційних систем значний вплив мають аеродинамічно активні зони обвалень. У цих умовах для правильного вирішення основних питань щодо підвищення ефективності провітрювання глибоких рудників важливим завданням є достовірна оцінка параметрів фільтраційних потоків і режимів руху повітря в пористому середовищі обвалень.

У статті виконано оцінку параметрів фільтраційних потоків і режимів руху повітря в пористому середовищі завалених зон рудників. Показано, що при фільтрації газів в пористому середовищі, втрати тиску більш правильно визначати по двочленній формулі з урахуванням параметрів породи, по якій відбувається рух газу. Отримана емпірична залежність між параметром турбулентності пористого середовища і коефіцієнтом проникності.

**Ключові слова:** рудник, зона обвалення, пориста середу, фільтрація газу.

**Abstract.** In the course of the ore extraction from deep horizons, efficiency of ventilation system is under a strong impact of aerodynamically active zones of caving. In these circumstances, a evaluation of reliable parameters of seepages and air flow regimes in the porous media of the mine caving zones is critical for making proper decisions on improving ventilation efficiency in the deep mines.

The article presents evaluated parameters of seepages and air flow regimes in the porous media of the mine caving zones. It is shown that at gas filtration into the porous media, it would be more reasonable to define pressure loss by binomial formula with taking into account parameters of the rock where gas moves. An empirical relationship between parameter of porous medium turbulence and permeability coefficient is described.

**Keywords:** mine, collapse zone, porous medium, gas filtration.

*Стаття постуила в редакцію 17.09.2014*

*Рекомендовано к печати д-ром техн. наук В.Г. Шевченко*