



УДК 622.817.4:546.296

АЭРОГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА РАДОНОВУЮ ОПАСНОСТЬ В УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ

В.И.ЕФИМОВ¹, А.Б.ЖАБИН², Г.В.СТАСЬ²

¹ ОАО ХК «СДС-Уголь», Кемерово, Россия

² Тульский государственный университет, Тула, Россия

Рассмотрена вертикальная миграция радона во вмещающих породах, описываемая первым законом Фика совместно с уравнением неразрывности диффузионного потока, с учетом процессов сорбции и радиоактивного распада. Учитывая особенности диффузионного процесса вертикальной диффузии радона, можно считать этот процесс установившимся. Показано, что на очистном участке целесообразно рассматривать одномерную конвективную диффузию, так как диффузионный перенос радона воздухом в выработках очистного участка происходит в стационарном режиме. Как правило, фактор радоновыделений является преобладающим при стабильном атмосферном давлении. При этом количество воздуха, рассчитанное по этому фактору, на 20-30 % превышает количество воздуха, необходимое для разбавления углекислого газа до предельно допустимого значения.

Ключевые слова: радон, кнудсеновская диффузия, горные породы, сорбция, радиоактивный распад, конвективно-турбулентная диффузия, количество воздуха, математическая модель

Как цитировать эту статью: Ефимов В.И. Аэрогазодинамические процессы, влияющие на радоновую опасность в угольных шахтах / В.И.Ефимов, А.Б.Жабин, Г.В.Стась // Записки Горного института. 2017. Т. 223. С. 109-115. DOI: 10.18454/PMI.2017.1.109

Физическая модель и математическое описание миграция радона в надработанных породах. Расчетная схема вертикальной миграции радона от залежи урана к горной выработке представлена на рис.1. В соответствии с законом Фика диффузионный поток радона от источника его образования можно записать так:

$$\vec{j}_{Rn} = -D_{Rn} \text{grad}[C_{Rn}(z, t)] , \quad (1)$$

где $\vec{j}_{Rn}$ – вектор скорости фильтрации; D_{Rn} – коэффициент эффективной диффузии радона; C_{Rn} – концентрация радона в породах, расположенных над залежью урана.

Рассмотрим произвольный объем породы V , ограниченный внешней поверхностью F , в котором находится радон. Количество радона, проходящего через поверхность F , можно определить следующим образом:

$$- \iint_F \vec{j}_{Rn} dF . \quad (2)$$

Тогда изменение всей массы радона в объеме V в единицу времени будет равно

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V (M + q) dV , \quad (3)$$

где M, q – масса свободного и сорбированного радона в единичном объеме породы.

Из закона сохранения массы следует, что

$$- \iint_F \vec{j}_{Rn} dF + \iiint_V \frac{\partial}{\partial t} (M + q) dV = 0 . \quad (4)$$

Преобразовав первое слагаемое уравнения (4) по формуле Остроградского – Гаусса, получим

$$- \iiint_V \text{div}(\vec{j}_{Rn}) dV + \iiint_V \frac{\partial}{\partial t} (M + q) dV = 0 . \quad (5)$$

Поскольку объем V выбран произвольно, условие (5) выполняется в том числе, если в нем сумма подынтегральных выражений равна нулю. Тогда уравнение баланса массы газа при его диффузии в пористой сорбирующей среде выразится в виде [3, 4]

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial t} = \text{div}\{D_{Rn} \text{grad}[C_{Rn}(z, t)]\} . \quad (6)$$

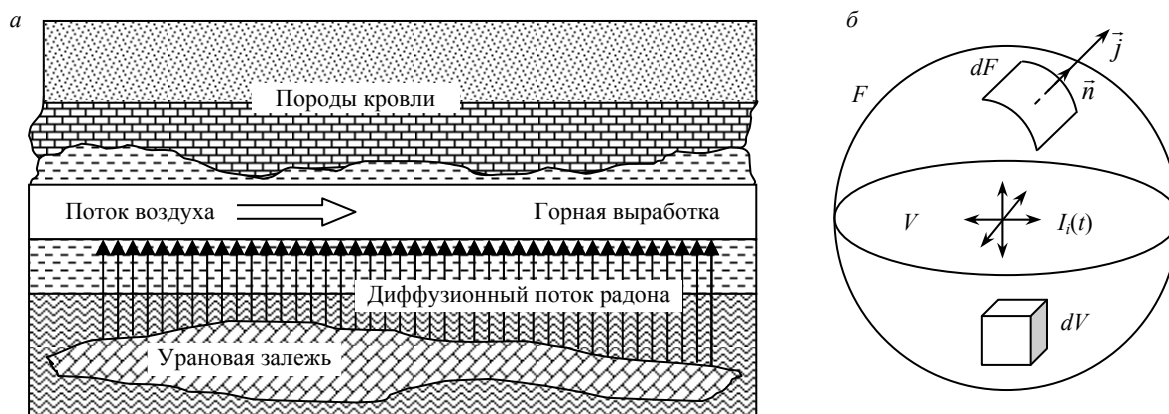


Рис.1. Расчетная схема вертикальной миграции радона от залежи урана к горной выработке: а – диффузия радона в горную выработку из подрабатываемой урановой залежи; б – расчетная схема к математическому описанию диффузионного переноса радона

Вторым уравнением, характеризующим перенос радона в покрывающих породах, является уравнение кинетики процесса взаимодействия газообразного вещества с твердой фазой. Основным процессом взаимодействия газа с твердой фазой является сорбция [5, 10]. В общем случае скорость процесса зависит от количества радона в газовом потоке в сорбированном состоянии, коэффициента диффузии и скорости потока. Эта зависимость в неявном виде записывается следующим образом:

$$\frac{\partial q}{\partial t} = f[M(C_{Rn}), q(C_{Rn}), \vec{V}(C_{Rn}), D_{Rn}]. \quad (7)$$

Из соотношения (7) следует, что скорость сорбции определяется как сорбционной способностью породы, так и внешними воздействиями, изменяющими диффузионное сопротивление твердой фазы и влияющими на интенсивность диффузионного газового потока. Уравнение газового состояния имеет вид

$$\rho = f(C_{Rn}). \quad (8)$$

Сложную замкнутую систему уравнений (1)-(8) можно упростить без существенного искажения физической картины переноса радона в пористой среде. Экспериментальные исследования кинетики сорбции газов показали, что скорость процесса определяется диффузией из твердой фазы в газовый поток. При этом возможны два следующих случая [1, 7]:

- скорость десорбции ограничивается диффузией радона к стенкам макропор (процесс протекает во внутريدиффузионной области);
- скорость десорбции ограничивается интенсивностью отвода газа из макропор (процесс протекает во внешнедиффузионной области).

Уравнение диффузионной кинетики десорбции имеет вид

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \beta_{Rn} [M(C_{Rn}) - q'(C_{Rn})], \quad (9)$$

где β_{Rn} – константа скорости диффузии; $q'(C_{Rn})$ – масса сорбированного газа, соответствующая равновесному состоянию для текущего значения концентрации радона C_{Rn} .

Величины $M(C_{Rn})$, $q'(C_{Rn})$ в явном виде можно записать следующим образом:

$$M(C_{Rn}) = m\rho(C_{Rn}) = m\rho_{Rn|0} \left(\frac{C_{Rn}}{C_{Rn|0}} \right)^{1/n};$$

$$q'(C_{Rn}) = \frac{abC_{Rn}}{1 + aC_{Rn}},$$



где m – среднее значение коэффициента пористости пород; $C_{Rn|_0}$, $\rho_{Rn|_0}$ – соответственно начальная концентрация и плотность радона; a , b – экспериментальные постоянные изотермы Лэнгмюра; n – показатель политропы (при $n = 1$ имеем изотерму; при $n = 1,41$ – адиабату).

Значение константы скорости диффузии β_{Rn} будет различным для процессов, протекающих во внешне- и внутридиффузионной областях. Если процесс протекает в смешанной диффузионной области, то

$$\frac{1}{\beta_{Rn}} \approx \frac{1}{\beta_{Rn1}} + \frac{1}{\beta_{Rn2}},$$

где β_{Rn1} , β_{Rn2} – константы соответственно для внешне- и внутридиффузионной области.

Введем потенциальную функцию давления Л.С.Лейбензона:

$$\bar{C} = \int_0^p \rho(C_{Rn}) dC_{Rn} = \lambda c C_{Rn}^{1+1/n}, \quad (10)$$

где $\lambda = n/(n+1)$; $c = \rho_{Rn|_0} / C_{Rn|_0}^{1/n}$.

Тогда с учетом выражения (10) скорость изменения массы свободного радона в макропорах можно записать в виде

$$\frac{\partial M(C_{Rn})}{\partial t} = m \frac{\partial \rho(C_{Rn})}{\partial t} = m \frac{d\rho}{dC_{Rn}} \frac{\partial C_{Rn}}{\partial t} = \frac{m \rho_{Rn|_0}}{C_{Rn|_0}} \frac{\partial C_{Rn}}{\partial t}.$$

Принимая диффузионные характеристики пород постоянными и учитывая, что движение радона во вмещающих породах происходит вертикально, систему уравнений (6)-(9) можно свести к дифференциальному уравнению

$$\frac{\partial^2 C_{Rn}}{\partial z^2} = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dC_{Rn}} + \frac{\partial q}{\partial t}. \quad (11)$$

Математическое описание (11) адаптируют к конкретным физическим условиям. При этом можно получить математические модели для расчета поступлений радона в горные выработки очистного участка и в проводимую подготовительную выработку.

Миграция радона в надроботанных породах. Вертикальное распределение радона во вмещающих породах с учетом уравнения неразрывности диффузионного потока радона и первого закона Фика можно записать в следующем виде:

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial t} = \text{div} \{ D_{Rn} \text{grad}[C_{Rn}(z, t)] \}. \quad (12)$$

Адаптируя уравнение (12) к реальным условиям вертикальной диффузии в надроботанных породах, получим

$$\frac{\partial C_{Rn}}{\partial t} = D_{Rn} \frac{\partial^2 C_{Rn}}{\partial z^2} - \lambda_{Rn} C_{Rn} + I_{Rn}, \quad (13)$$

где λ_{Rn} – эффективная константа скорости процессов сорбции и радиоактивного распада радона; I_{Rn} – мощность источника генерации радона за счет радиоактивного распада урана.

Учитывая особенности диффузионного процесса вертикальной диффузии радона, можно считать этот процесс установившимся. Тогда, переходя к удельной активности газовых смесей, представим уравнение (17) в следующем виде:

$$D_{Rn} \frac{d^2 A_{Rn}^{B, \Pi}}{dz^2} - \lambda_{Rn} A_{Rn}^{B, \Pi} = 0,$$

где $A_{Rn}^{B, \Pi}$ – удельная активность по радону газовой смеси во вмещающих породах.



Граничные условия для вертикальной миграции имеют вид

$$-D_{\text{Rn}} \left. \frac{dA_{\text{Rn}}^{\text{B.П}}}{dz} \right|_{z=0} = J_{\text{Rn}}^{\text{B.П}} = \text{const}, \quad \lim_{z \rightarrow \infty} A_{\text{Rn}} \neq \infty,$$

где $J_{\text{Rn}}^{\text{B.П}}$ – интенсивность образования радона в подрабатываемом урановом месторождении.

Решение уравнения (3) для условий (4) можно записать следующим образом:

$$A_{\text{Rn}}^{\text{B.П}}(z) = \frac{0,5 J_{\text{Rn}}^{\text{B.П}}}{\sqrt{D_{\text{Rn}} \lambda_{\text{Rn}}}} \exp\left(-z \sqrt{\frac{\lambda_{\text{Rn}}}{D_{\text{Rn}}}}\right).$$

Дифференцируя зависимость (5) в точке $z = h$, где h – расстояние от урановой залежи до почвы рассматриваемой выработки, найдем абсолютное радоновыделение из подрабатываемого уранового месторождения:

$$I_{\text{Rn}}^{\text{B.П}} = J_{\text{Rn}}^{\text{B.П}} \exp\left(-h \sqrt{\frac{\lambda_{\text{Rn}}}{D_{\text{Rn}}}}\right).$$

Разработана программа RnVP для вычислительных экспериментов с использованием стандартного пакета MATHEMATICA 2.2. Графики зависимости отношения величин $I_{\text{Rn}}^{\text{B.П}} / J_{\text{Rn}}^{\text{B.П}}$ от расстояния h для различных значений $\sqrt{\lambda_{\text{Rn}} / D_{\text{Rn}}}$ представлены на рис.2. Анализируя профили диффузионного потока радона во вмещающих породах, следует отметить высокий темп снижения скорости миграции радона при уменьшении коэффициента эффективной диффузии. Разумеется, такие результаты вычислений совпадают с данными натурных наблюдений по другим газам, например по метану, поступающему из подрабатываемых угольных пластов [2, 6, 8, 9].

Косвенное подтверждение адекватности разработанной математической модели можно считать в данном случае приемлемым, так как в настоящее время нет необходимой эмпирической базы данных. При этом результаты вычислений показывают, что абсолютная радонообильность будет пропорциональна интенсивности образования радона на подрабатываемом урановом месторождении.

Эта величина имеет физический смысл диффузионного потока радона на контакте надрабатываемой ураносодержащей линзы и надрабатываемого породного слоя. Следовательно, интенсивность образования радона на подрабатываемом урановом месторождении является одним из важнейших параметров геофизического исследования угольных месторождений промышленного значения в Подмосковном бассейне. Таким образом, новые математические модели газоразделения позволяют расширить круг задач, решаемых при геологических исследованиях. Разумеется, без совместного решения этих задач невозможно дать достоверную прогнозную оценку газовой опасности по любому газу, и в данном случае это относится к радону.

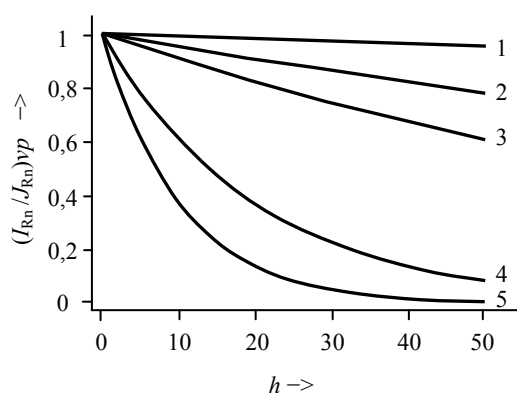


Рис.2. Графики зависимости отношения величин $I_{\text{Rn}}^{\text{B.П}} / J_{\text{Rn}}^{\text{B.П}}$ от расстояния h в метрах.

Значения $\sqrt{\lambda_{\text{Rn}} / D_{\text{Rn}}}$ соответственно равны:
1 – 0,001; 2 – 0,005; 3 – 0,01; 4 – 0,05; 5 – 0,1

Разумеется, без совместного решения этих задач невозможно дать достоверную прогнозную оценку газовой опасности по любому газу, и в данном случае это относится к радону.

Перенос радона в выработках очистного участка и расчет количества воздуха по радоновому фактору.

Диффузионный перенос радона воздухом в выработках очистного участка происходит в стационарном режиме. Учитывая соотношения поперечных размеров и суммарной длины выработок, целесообразно рассматривать одномерную конвективную диффузию. В выработках очистного участка (рис.3) средняя скорость движения воздуха достаточно велика, чтобы можно было пренебречь турбулентной диффузией, поэтому в общем виде нестационарная конвективная диффузия радона в выработках очистного участка описывается одномерным уравнением гиперболического типа

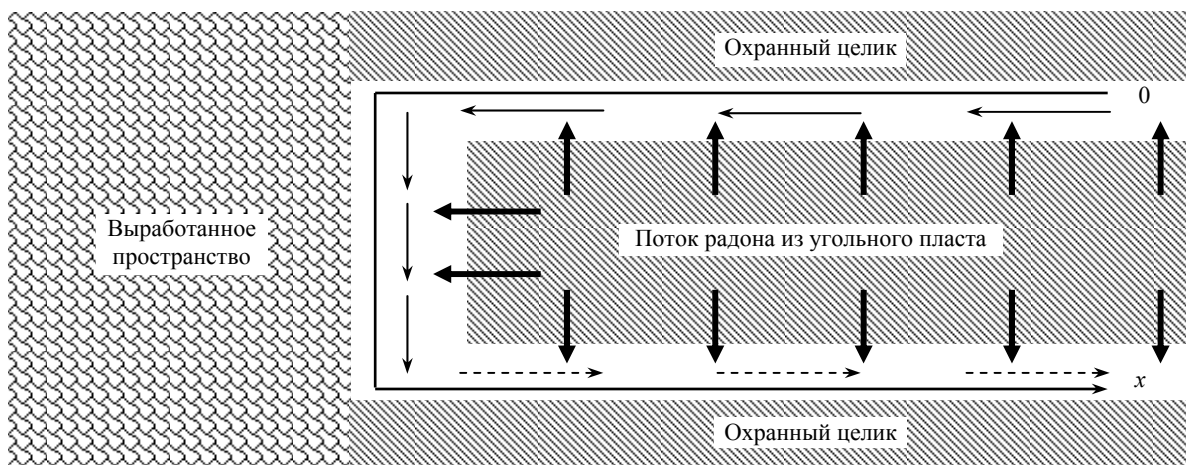


Рис.3. Расчетная схема переноса радона в выработках очистного участка

$$\frac{\partial A_{Rn}}{\partial t} + u_{o,y} \frac{\partial A_{Rn}}{\partial x} = -\lambda_{Rn} A_{Rn} + (\Sigma I_{Rn})_{o,y}, \quad (14)$$

где $u_{o,y}$ – средняя скорость воздуха в выработках очистного участка; $(\Sigma I_{Rn})_{o,y}$ – суммарные выделения радона в воздух выработок очистного участка из различных источников.

Адаптируя уравнение (14) к реальным физическим условиям, перенос радона в выработках очистного участка можно описать следующим уравнением:

$$u_{o,y} \frac{dA_{Rn}}{dx} = -\lambda_{Rn} A_{Rn} + (\Sigma I_{Rn})_{o,y}. \quad (15)$$

Граничные условия для выработок очистного участка имеют следующий вид:

$$A_{Rn}(0) = 0; A_{Rn}(x) = A_{Rn}. \quad (16)$$

Решение уравнения (15) для условий (16) имеет вид

$$A_{Rn}(x) = \frac{(\Sigma I_{Rn})_{o,y}}{\lambda_{Rn}} \left[1 - \exp\left(-\frac{\lambda_{Rn}}{u_{o,y}} x\right) \right]. \quad (17)$$

Разработана программа ARnOU для вычислительных экспериментов с использованием стандартного пакета МАТНЕМАТИКА 2.2. Результаты вычислительных экспериментов представлены на рис.4 в виде графиков зависимости $\bar{A}_{Rn} = A_{Rn}(x)/A_{Rn\infty}$ от координаты x , где $A_{Rn\infty} = (\Sigma I_{Rn})_{o,y}/\lambda_{Rn}$; $\bar{A}_{Rn} = \lambda_{Rn} A_{Rn}(x)/(\Sigma I_{Rn})_{o,y}$. Вычислительные эксперименты проведены для различных значений $\omega = \lambda_{Rn}/u_{o,y}$.

Анализ результатов вычислительных экспериментов показывает, что при больших значениях x удельная активность воздуха по радону стремится к

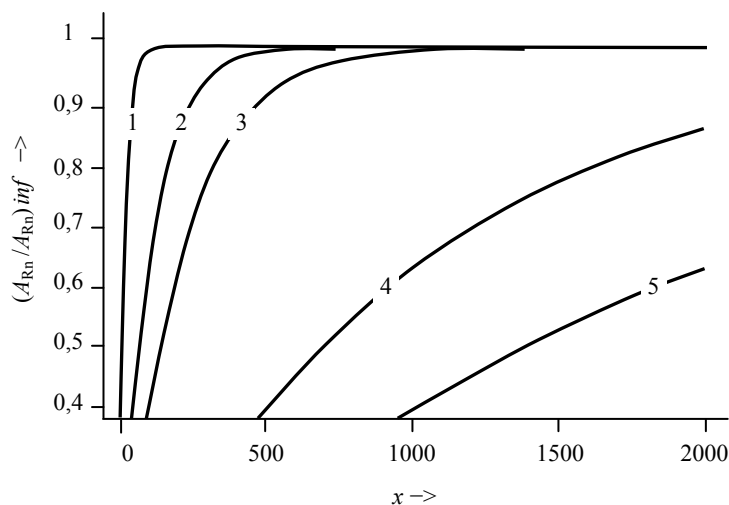


Рис.4. Графики зависимости $\bar{A}_{Rn}$ от координаты x в метрах для выработок очистного участка.
Значения ω , 1/м: 1 – $5 \cdot 10^{-2}$; 2 – 10^{-2} ; 3 – $5 \cdot 10^{-3}$; 4 – 10^{-3} ; 5 – $5 \cdot 10^{-4}$



асимптотическому значению $A_{R_{\infty}}$. Удельная активность воздуха в выработках очистного участка зависит от абсолютного радоновыделения, скорости радиоактивного распада радона, средней скорости движения воздуха и коэффициента турбулентной диффузии. Следовательно, зависимость (17) может быть использована при расчете количества воздуха очистного участка по фактору радоновыделения.

Зависимость (17) позволяет рассчитать количество воздуха динамическим методом, в соответствии с которым средняя по сечению выработки концентрация радона не должна превышать ПДК_{Rn}. Решая уравнение (17) для $A_{Rn}(x) = \text{ПДК}$ соответственно при $x = (\Sigma L)_{o,y}$ относительно средней скорости движения воздуха и переходя к объемному расходу воздуха, получим следующее алгебраическое уравнение для расчета количества воздуха по фактору радоновыделений:

$$Q_{Rn}^{oc} = \lambda_{Rn} (\Sigma L)_{o,y} S_3 / \ln \left| \frac{(\Sigma I_{Rn})_{o,y}}{(\Sigma I_{Rn})_{o,y} - \lambda_{Rn} \text{ПДК}_{Rn}} \right|,$$

где Q_{Rn}^{oc} – количество воздуха, которое необходимо подавать в очистной участок, чтобы концентрация радона на исходящей струе не превышала ПДК_{Rn}; $(\Sigma L)_{o,y}$ – суммарная проектная длина выемочных штреков и лавы; S_3 – эквивалентная по расходу воздуха площадь поперечного сечения выработок очистного участка.

Расчеты количества воздуха для очистных участков шахт Подмосковского бассейна

№ п/п	Сочетание расчетных параметров	Расчетная углекислотообильность, м ³ /мин		Расчетное количество воздуха, м ³ /мин	
		Среднестатистический очистной участок	Очистной участок с оптимальными параметрами	по углекислотообильности	по радоновому фактору
1	Максимальное	0,85	1,00	201-260	274
2	Минимальное	0,10	0,24	36-86	156
3	Среднее	0,63	0,74	189-222	231

Данные, представленные в таблице, наглядно свидетельствуют, что как для среднестатистического очистного участка, так и для очистного участка с оптимальными параметрами радоновый фактор является определяющим. Следует отметить, что такое положение может складываться не только в условиях Подмосковского бассейна. Выделение радона при расчете количества воздуха может оказаться преобладающим фактором и в Кузбассе, и в Восточном Донбассе.

Разработанные математические модели радоновыделений и расчета количества воздуха были положены в основу алгоритмов и комплекса программных средств, позволяющего автоматизировать процесс решения инженерных задач при использовании усовершенствованных методик прогноза газовыделений в выработки угольных шахт и расчета количества воздуха, необходимого для проветривания очистных и подготовительных участков. Вычислительные эксперименты, выполненные для среднестатистических значений горно-геологических условий и технологических параметров углекислотообильных шахт, показали, что, как правило, фактор радоновыделений является преобладающим при стабильном атмосферном давлении. При этом количество воздуха по фактору радоновыделений на 20-30 % превышает количество воздуха, необходимого для разбавления углекислого газа до предельно допустимого значения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воробьев С.А. Аэрогазодинамические процессы при подземной разработке полезных ископаемых / С.А.Воробьев, А.Ю.Ермаков, Д.Н.Шкурятский. Тула: Изд-во ТулГУ. 2016. 248 с.
2. Границы применимости линеаризованных уравнений фильтрации газов и прогноз динамики газовыделения из выработанного пространства / Н.М.Качурин, С.А.Воробьев, О.А.Афанасьев, Д.Н.Шкурятский // Известия ТулГУ. Сер. «Технические науки». 2014. Вып. 1. С. 165-172.



3. Качурин Н.М. Прогноз выделения радона в горные выработки угольных шахт / Н.М.Качурин, А.А.Поздеев, Г.В.Стась // Известия ТулГУ. Сер. «Естественные науки». 2012. Вып. 1. Ч. 2. С. 133-142.
4. Качурин Н.М. Выделения радона в атмосферу горных выработок угольных шахт / Н.М.Качурин, А.А.Поздеев, Г.В.Стась // Известия ТулГУ. Сер. «Науки о Земле». 2012. Вып. 1. С. 46-56.
5. Качурин Н.М. Радон в атмосфере угольных шахт / Н.М.Качурин, А.А.Поздеев, Г.В.Стась // Известия вузов. Горный журнал. 2013. № 4. С. 58-64.
6. Качурин Н.М. Прогноз метановыделения с поверхности обнажения угольного пласта в подготовительную выработку при высокой скорости проходки / Н.М.Качурин, С.А.Воробьев, А.Н.Качурин // Горный журнал. 2014. № 4. С. 70-73.
7. Миграция радона в надроботанных породах / Н.М.Качурин, Г.В.Стась, С.А.Воробьев, Мпеко Нсендо Арди // Известия ТулГУ. Сер. «Науки о Земле». 2014. Вып. 4. С. 69-72.
8. Прогноз метановыделения в подготовительные и очистные забои угольных шахт / Н.М.Качурин, С.А.Воробьев, А.Н.Качурин, И.В.Сарычева // Обогащение руд. 2014. № 6. С. 16-19.
9. Соколов Э.М. Углекислый газ в угольных шахтах / Э.М.Соколов, Н.М.Качурин. М.: Недра. 1987. 142 с.
10. Физическая модель и математическое описание миграции радона в надроботанных породах / Н.М.Качурин, Г.В.Стась, С.А.Воробьев, Мпеко Нсендо Арди // Известия ТулГУ. Сер. «Науки о Земле». 2014. Вып. 4. С. 64-68.

Авторы: **В.И.Ефимов**, д-р техн. наук, профессор, efimov@pk-ugol.ru (ОАО ХК «СДС-Уголь», Кемерово, Россия),
А.Б.Жабин, д-р техн. наук, профессор, galina_stas@mail.ru (Тульский государственный университет, Тула, Россия),
Г.В.Стась, канд. техн. наук, доцент, galina_stas@mail.ru (Тульский государственный университет, Тула, Россия).

Статья принята к публикации 11.11.2016