

Условия обеспечения радиационной безопасности при проходке выработок в урановых рудниках

Н. И. ЧЕСНОКОВ, Ю. А. ЛЕБЕДЕВ, И. В. ПАВЛОВ

УДК 613.6:621.039

В воздушную среду подземных рудников, разрабатывающих урановые руды, из стенок горных выработок и отбитой горной массы постоянно выделяется радон с интенсивностью $(2 \div 5) \cdot 10^{-8}$ кюри/сек·м² [1].

Для уменьшения радиационного воздействия выделяющегося радона и особенно его короткоживущих продуктов распада — Po^{218} (RaA), Pb^{214} (RaB) и Bi^{214} (RaC) — на всех рудниках осуществляется искусственное проветривание. Интенсивное проветривание помимо выноса радона значительно нарушает радиоактивное равновесие между радоном и его дочерними продуктами. С учетом нарушения этого равновесия степень радиационного воздействия смеси дочерних продуктов радона можно оценить по величине скрытой энергии их распада.

Ее величина определяется по формуле [2]

$$\varphi = K_{\varphi}(0,4C_{\text{RaA}} + 0,5C_{\text{RaB}} + 0,4C_{\text{RaC}}), \quad (1)$$

где φ — скрытая энергия, Мэв/м³; C_{RaA} , C_{RaB} , C_{RaC} — концентрация каждого из продуктов распада радона, кюри/м³; K_{φ} — переводной коэффициент, равный $1,3 \cdot 10^{15}$ Мэв/кюри.

Среднегодовая допустимая величина скрытой энергии в рудничной атмосфере $\varphi_{\text{д.к}}$ при стаже работы горнорабочих не более 15—17 лет составляет $1,3 \cdot 10^8$ Мэв/м³ [2].

Между тем в практике разведки и эксплуатации урановых месторождений известны случаи, когда в непроветриваемых горных выработках величина скрытой энергии достигала $(2 \div 3) \times 10^{11}$ Мэв/м³ [3], т. е. уже на несколько часов работы в такой атмосфере горнорабочие могли получить облучение, превышающее в несколько раз предельно допустимую годовую дозу.

С помощью интенсивного проветривания, как правило, удается снизить величину скрытой энергии до допустимых значений. Однако при большой длине проходческих выработок и значительном радоновыделении не всегда удается обеспечить требуемые условия по всей длине выработки. В этих случаях следует ограничивать время пребывания горнорабочих на различных участках выработки или использовать воздухоочистительные фильтры и индивидуальные респираторы.

Из опыта проходки горных выработок известно, что горнорабочие большую часть времени находятся в пределах призабойного участка выработки длиной 30—40 м (рис. 1). Поэтому при расчете радиационной защиты достаточно ориентироваться на среднюю величину скрытой энергии в призабойном участке $\varphi_{\text{ср}}^{\text{заб}}$. В сочетании с индивидуальными дозиметрами это вполне может обеспечить радиационную безопасность горнорабочих.

Закон изменения значений скрытой энергии в проходческой выработке весьма сложен и зависит от большого числа факторов, важнейшими из которых являются: а) интенсивность и расположение источников радоновыделения; б) концентрация радона и скрытая энергия в месте забора воздуха для проветривания; в) количество подаваемого в выработку воздуха и аэродинамические особенности ее проветривания (проветриваемый объем, распределение утечки воздуха по трубопроводу, расстояние от конца трубопровода до груди забоя и т. п.).

Большинство определяющих факторов изменяется во времени в довольно широких пределах. Кроме того, некоторые факторы вообще недо-

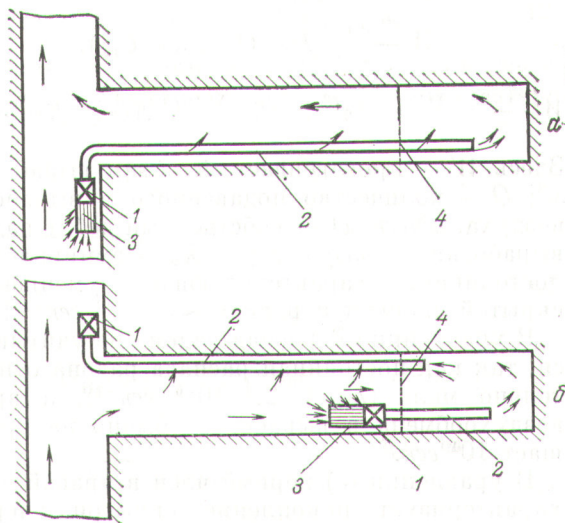


Рис. 1. Схема вентиляции проходческой горной выработки при нагнетательном (а) и комбинированном (б) способах проветривания:

1 — вентиляторы; 2 — трубопроводы; 3 — аэрозольные фильтры; 4 — граница призабойного участка.

статочны изучены (например, степень осаждения продуктов распада радона в трубопроводе и на стенках горной выработки). Это заставляет вводить в расчеты определенные допущения, в частности, не учитывать осаждение продуктов распада радона, поступление воздуха из пневматических инструментов и др.

Трудности, возникающие при расчете средних концентраций радона и скрытой энергии, можно устранить путем использования следующих величин:

$$Z_{Rn} = \frac{C_{исх} - C_{вх}}{C_{ср} - C_{вх}}, \quad (2)$$

$$Z_{\varphi} = \frac{\varphi_{исх} - \varphi_{вх}}{\varphi_{ср} - \varphi_{вх}}, \quad (3)$$

которые мы назовем показателями условий проветривания выработки по радону Z_{Rn} и по скрытой энергии Z_{φ} .

Величины Z_{Rn} и Z_{φ} связывают между собой среднюю по объему концентрацию радона и скрытую энергию в выработке $C_{ср}$, $\varphi_{ср}$ с соответствующими значениями в исходящей струе $C_{исх}$, $\varphi_{исх}$. Эти показатели характеризуют интенсивность воздухообмена между различными участками выработки и расположение в ней источников радоновыделения. Они практически не зависят от времени воздухообмена в выработке.

Рассмотрим уравнения, характеризующие процесс изменения во времени количества радона и скрытой энергии в горной выработке:

$$W \frac{dC_{ср}}{dt} = D - Q(C_{исх} - C_{вх}), \quad (4)$$

$$W \frac{d\varphi_{ср}}{dt} = W\lambda_{\varphi}(K_{\varphi}C_{ср} - \varphi_{ср}) - Q(\varphi_{исх} - \varphi_{вх}). \quad (5)$$

Здесь W — проветриваемый объем выработки, m^3 ; Q — количество подаваемого в выработку воздуха, $m^3/сек$; D — собственный дебит радона выработки, $кюри/сек$; λ_{φ} — эмпирическая постоянная, характеризующая уменьшение скрытой энергии и равная $\sim 3 \cdot 10^{-4} \text{ сек}^{-1}$ [4].

В уравнении (4) распад радона не учитывается, так как постоянная распада радона относительно мала ($\lambda_{Rn} = 2,1 \cdot 10^{-6} \text{ сек}^{-1}$), а время воздухообмена в выработке обычно не превышает 10^4 сек .

В уравнении (5) первый член в правой части характеризует накопление скрытой энергии в результате образования дочерних продуктов и последующего их распада, второй член этого уравнения характеризует процесс изменения скрытой энергии за счет привноса и выноса

дочерних продуктов проветривающей воздушной струей.

Подставив в уравнения (4) и (5) значения $C_{исх}$ и $\varphi_{исх}$ из уравнений (2) и (3), для установившегося режима проветривания получим

$$C_{ср} = C_{вх} + \frac{D}{QZ_{Rn}}, \quad (6)$$

$$\varphi_{ср} = \frac{\varphi_{вх}}{1 + \frac{QZ_{\varphi}}{W\lambda_{\varphi}}} + \frac{K_{\varphi}C_{ср}}{1 + \frac{QZ_{\varphi}}{W\lambda_{\varphi}}}. \quad (7)$$

Числовые значения Z_{Rn} и Z_{φ} можно определить экспериментально как на лабораторных моделях, так и в естественных условиях.

Для проходческих выработок Z_{Rn} и Z_{φ} зависят в основном от расположения источников эманирования и утечек воздуха в трубопроводе. В призабойном участке выработки существенное значение имеет также расстояние от конца трубопровода до груди забоя. При этом, чем больше это расстояние, тем меньше величины Z_{Rn} и Z_{φ} и, следовательно, тем хуже условия проветривания призабойного участка и выработки в целом.

Средний уровень облучения горнорабочего за смену определяется величиной скрытой энергии радиоактивных аэрозолей:

$$\varphi_{см} = \varphi_{ср}^{заб} \delta + \varphi_{ср} (1 - \delta), \quad (8)$$

где δ — относительная продолжительность пребывания горнорабочего в призабойном участке. Поскольку обычно $\delta > 0,8$, то в случае невозможности обеспечения условия $\varphi_{ср} \ll \varphi_{ср}^{заб}$ следует стремиться увеличить количество воздуха, подаваемого непосредственно в забой $Q_{заб}$.

Кривая 1 на рис. 2 иллюстрирует зависимость вентиляции, необходимой для обеспечения величины скрытой энергии не выше $0,8 \varphi_{ср}^{заб}$, от удельного выделения радона в призабойном участке выработки сечением 8 м^2 и длиной 40 м при $C_{вх} = 3 \cdot 10^{-7} \text{ кюри/м}^3$, $\varphi_{вх} = 0,9 \cdot 10^8 \text{ Мэв/м}^3$, $Z_{Rn} = 1,0$, $Z_{\varphi} = 1,5$.

Поскольку производительность вентиляторов местного проветривания не превышает $3-5 \text{ м}^3/сек$, то из-за утечки воздуха в трубопроводе в забой проходческой выработки большой протяженностью трудно подать более $2-3 \text{ м}^3$ воздуха за 1 сек . В связи с этим в призабойных участках выработок с большим выделением радона не всегда имеется возможность обеспечить радиационную безопасность только за счет вентиляции. Если на участке воздухозабора концентрация радона и скрытая энергия высо-

кие, то следует использовать аэрозольные фильтры, изготовленные на основе ткани ФП [5]. Эффект применения таких фильтров иллюстрируется кривой 2 на рис. 2. Расчет необходимой вентиляции при использовании фильтров можно проводить по формуле (7) с подстановкой $\varphi_{вх} = 0$.

Фильтры для очистки рудничного воздуха от продуктов распада радона должны обеспечивать высокую степень очистки в сочетании с большой пылеемкостью, быть легкими, малогабаритными, негигроскопичными и обладать сравнительно небольшим аэродинамическим сопротивлением. Опытные образцы таких фильтров прошли производственные испытания на нескольких урановых рудниках и показали эффективность очистки воздуха более 90% как по крупнодисперсной рудничной пыли, так и по продуктам распада радона.

Фильтры состоят из отдельных цилиндрических секций длиной 2 м. Необходимая пылеемкость (до $0,3 \text{ кг/м}^2$) обеспечивается применением лавсанового волокна.

Наиболее благоприятные условия для эффективного использования таких фильтров создаются при проветривании горных выработок комбинированным способом (см. рис. 1, б), который имеет ряд преимуществ по сравнению с нагнетательным (в частности, значительно быстрее удаляются газообразные продукты взрывных работ).

Таким образом, вентиляция с использованием при необходимости аэрозольных фильтров в принципе позволяет обеспечить радиационную безопасность горнорабочих.

Однако этот вывод справедлив только для установившегося режима вентиляции. Остановка вентилятора местного проветривания приводит обычно к резкому ухудшению радиационной обстановки в забое.

Для оценки опасности, связанной с отключением вентиляторов местного проветривания, рассмотрим дифференциальные уравнения, описывающие процесс изменения количества радона и скрытой энергии в горной выработке, в которой отсутствует всякое движение воздуха, кроме диффузионного переноса:

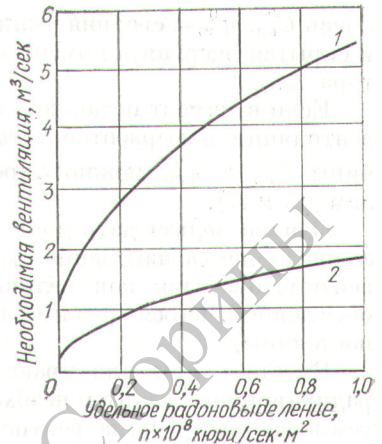
$$W \frac{dC_{cp}}{dt} = D(t) - WC_{cp}\lambda_{Rn}, \quad (9)$$

$$W \frac{d\varphi_{cp}}{dt} = W\lambda_{\varphi}(K_{\varphi}C_{cp} - \varphi_{cp}). \quad (10)$$

Быстрое увеличение концентрации радона после остановки вентилятора приводит к умень-

Р и с. 2. Зависимость количества воздуха, необходимого для проветривания призабойного участка выработки, от удельного радоноразделения:

1 — без аэрозольного фильтра; 2 — с аэрозольным фильтром; $C_{вх} = 3 \cdot 10^{-7} \text{ кюри/м}^3$; $\varphi_{вх} = 0,9 \cdot 10^8 \text{ Мэв/м}^3$.



шению дебита радона по закону [6]

$$D(t) = S\sqrt{\lambda_{Rn}K_d}(C_{\infty} - C_{cp}), \quad (11)$$

где S — поверхность горной выработки, м^2 ; K_d — коэффициент диффузии радона в породах с учетом пористости, $\text{м}^2/\text{сек}$; C_{∞} — концентрация радона в породах горных пород на такой глубине, на которой практически отсутствует диффузия радона в атмосферу выработки, кюри/м^3 .

При работающем вентиляторе $C_{cp} \ll C_{\infty}$ и $D = S\sqrt{\lambda_{Rn}K_d}C_{\infty}$. Обозначив отношение периметра выработки к ее сечению величиной « κ », получим

$$S = \kappa W,$$

$$D(t) = D - \kappa W \sqrt{\lambda_{Rn}K_d} C_{cp}. \quad (12)$$

Решения уравнений (9) и (10) с учетом значения $D(t)$ из выражения (12) и некоторых упрощений имеют вид

$$C_{cp} = C_{cp}^0 e^{-(\lambda_{Rn} + \kappa \sqrt{\lambda_{Rn}K_d})(t-t_0)} + \frac{D}{W(\lambda_{Rn} + \kappa \sqrt{\lambda_{Rn}K_d})} [1 - e^{-(\lambda_{Rn} + \kappa \sqrt{\lambda_{Rn}K_d})(t-t_0)}], \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \varphi_{cp} = & \varphi_{cp}^0 e^{-\lambda_{\varphi}(t-t_0)} + K_{\varphi} C_{cp}^0 \times \\ & \times [e^{-(\lambda_{Rn} + \kappa \sqrt{\lambda_{Rn}K_d})(t-t_0)} - e^{-\lambda_{\varphi}(t-t_0)}] + \\ & + \frac{K_{\varphi} D}{W(\lambda_{Rn} + \kappa \sqrt{\lambda_{Rn}K_d})} \left\{ 1 - e^{-\lambda_{\varphi}(t-t_0)} + \right. \\ & \left. + \frac{\lambda_{\varphi}}{\lambda_{\varphi} - (\lambda_{Rn} + \kappa \sqrt{\lambda_{Rn}K_d})} \times \right. \\ & \left. \times [e^{-\lambda_{\varphi}(t-t_0)} - e^{-(\lambda_{Rn} + \kappa \sqrt{\lambda_{Rn}K_d})(t-t_0)}] \right\}. \quad (14) \end{aligned}$$

Здесь $C_{ср}^0$, $\varphi_{ср}^0$ — средняя концентрация радона и скрытая энергия в момент остановки вентилятора t_0 .

Если в момент остановки вентилятора режим вентиляции в выработке установился, то величины $C_{ср}^0$ и $\varphi_{ср}^0$ можно определить по формулам (6) и (7).

Однако нельзя дать достаточно точное описание процесса изменения $C_{ср}$ и $\varphi_{ср}$ после пуска вентилятора, так как величины Z_{Rn} и Z_{φ} для неустановившегося режима в общем случае не постоянны.

Вместе с тем для правильной организации радиационной защиты необходимо знать время установления режима вентиляции. Для призабойного участка выработки при значительном отставании конца трубопровода от груди забоя время установления может быть намного больше чем $W_{заб}/Q_{заб}$. Принимая для этого случая Z_{Rn} и Z_{φ} примерно равными их значениям при установившемся режиме и решая уравнения (4) и (5), имеем

$$C_{ср} \approx C_{ср}^{\pi} e^{-Z_{Rn} \frac{Q}{W} (t-t_{\pi})} + C_{ср}^0 [1 - e^{-Z_{Rn} \frac{Q}{W} (t-t_{\pi})}], \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \varphi_{ср} \approx & \varphi_{ср}^0 [1 - e^{-(\lambda_{\varphi} + \frac{Q}{W} Z_{\varphi}) (t-t_{\pi})}] + \\ & + \varphi_{ср}^{\pi} e^{-(\lambda_{\varphi} + \frac{Q}{W} Z_{\varphi}) (t-t_{\pi})} + \frac{K_{\varphi} \lambda_{\varphi} (C_{ср}^{\pi} - C_{ср}^0)}{\lambda_{\varphi} + \frac{Q}{W} (Z_{\varphi} - Z_{Rn})} \times \\ & \times [e^{-Z_{Rn} \frac{Q}{W} (t-t_{\pi})} - e^{-(\lambda_{\varphi} + \frac{Q}{W} Z_{\varphi}) (t-t_{\pi})}]. \quad (16) \end{aligned}$$

В уравнениях (15) и (16) все параметры относятся к призабойному участку, а $C_{ср}^{\pi}$ и $\varphi_{ср}^{\pi}$ — сред-

няя концентрация радона и скрытая энергия в момент пуска вентилятора t_{π} , определенные по формулам (13) и (14).

Примерная величина дополнительного облучения (в нормо-сменах)*, которое получают горнорабочие, продолжающие работать в тушковой выработке при остановленном вентиляторе местного проветривания, приведена на рис. 3. При этом облучение за время установления поля скрытой энергии после включения вентилятора не учитывалось. Концентрации радона и скрытая энергия в момент остановки вентилятора взяты равными соответственно $3 \cdot 10^{-7}$ кюри/м³ и $1,3 \cdot 10^8$ Мэв/м³, а остальные расчетные параметры составляют: $\kappa = 1,4$; $K_d = 0,5 \times 10^{-6}$ м²/сек.

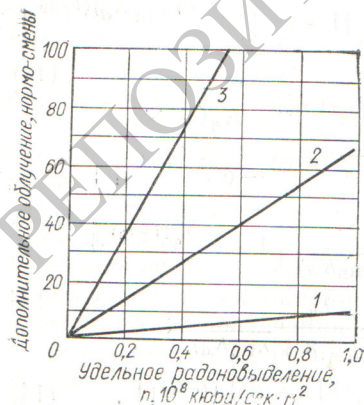
Из рис. 3 видно, что полное прекращение подачи воздуха даже на несколько часов в выработку с высоким радоновыделением может привести к дополнительному облучению горнорабочих, сравнимому с годовой предельно допустимой дозой. Это обстоятельство указывает на необходимость постоянного контроля за работой вентиляционных установок в таких проходческих выработках и своевременного вывода людей из забоя в случае остановки вентилятора. При выполнении этих условий проблема обеспечения радиационной безопасности при проходке горных выработок может быть успешно решена с помощью существующих технических средств.

Поступила в Редакцию 28/IV 1971 г.
В окончательной редакции 22/VII 1971 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. В. Быховский. Гигиенические вопросы при подземной разработке урановых руд. М., Медгиз, 1963.
2. Нормы радиационной безопасности НРБ-69. М., Атомиздат, 1970.
3. A. R i s e. Mines Mag., 47, 44 (1957).
4. И. И. Гусаров, В. К. Ляпидевский. «Атомная энергия», 10, 64 (1961).
5. А. В. Быховский, В. Д. Николаев, Н. И. Чесноков. В сб. «Вопросы гигиены труда на урановых рудниках и обогащательных предприятиях». Под ред. Г. М. Пархоменко, О. С. Андреевой, В. И. Бадина. М., Атомиздат, 1971, стр. 12.
6. А. С. Сердюкова, Ю. Т. Капитанов, М. П. Заводская. Изв. АН СССР. «Физика Земли», 7, 123 (1965).

* Нормо-смене соответствует облучение, которое получает человек в течение 7 ч, находясь в атмосфере горной выработки, где величина скрытой энергии равна $1,3 \cdot 10^8$ Мэв/м³.



Р и с. 3. Зависимость дополнительного облучения горнорабочих от удельного радоновыделения при перерыве проветривания в проходческой выработке:

1 — в течение 1 ч; 2 — 2 ч; 3 — 3 ч.