

3) Минимальное количество подвижных форм тяжёлых металлов наблюдается в случае добавки кислой смолки к ТБО, что, по-видимому, тоже объясняется более плотной структуры шлака.

Табл. 8. Предельно допустимых и ориентировочно допустимые концентрации тяжелых металлов в почвах и шлаке сжигания ТБО [8].

№ п.п.	Металл	Содержание в почве валовой формы, мг/кг	Содержание подвижной формы в почве, мг/кг	Содержание в шлаке сжигания ТБО в валовой формы, мг/кг
1	Pb	32	6	4770
2	Ni	20	4	130
3	Cr	-	6	280
4	Cu	33	3	1140
5	Zn	55	23	2600
6	Hg	2,1	-	-
7	Co	-	5	30

Библиографический список

1. **Сметанин В.И.** Защита окружающей среды от отходов производства и потребления. М.: Колос, 2003 - с. 22
2. **A review of municipal waste combustion technology / Chappell Peter // Energy waste clean, green and profitable : pap. and Synop. presentat. conf., London, oct., 1991 / Inst. Energy .- London, 1991. – p. 11**
3. **Chimenos JM, Segarra M, Fernandez M.A, Espiell F. (1999)** Characterization of the bottom ash in municipal solid waste incinerator. J Hazard Mater A64:211–222
4. **Wiles C.C. (1996)** Municipal solid waste combustion ash: state-of-the-knowledge. J Hazard Mater 47:325–344
5. **Пурим В.Р.** Бытовые отходы. Теория горения. Обезвреживание. Топливо для энергетики – М.: Энергоатомиздат, 2002 – с.39
6. **Изучение потоков вторичного сырья в твёрдых бытовых отходах г. Донецка / М.Е. Краснянский, А. Бельгасем, О.Н. Калинин - Проблемы сбора, переработки и утилизации отходов. Сб. науч. статей, О.:, ОЦНТЭИ, 2004 – с.219-222**
7. **Васильев В.И.** Аналитическая химия Т.2 М.: ВШ, 1985 – 232 с.
8. **Ориентировочно-допустимые концентрации (ОДК) тяжёлых металлов и мышьяка в почвах (Дополнение №1 к перечню ПДК и ОДК №6229-91): Гигиенические нормативы.** М.: Информационно-издательский центр Госкомсанэпиднадзора России, 1995. - 8с.

© Калинин О.Н., Краснянский М.Е., Рекун В.В. 2004

УДК 622.867:623.455.1

ОНАСЕНКО А.А. (ПО «Шахта им. Ф.Э.Дзержинского ГП «Ровенькиантрацит»)

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ГАЗОЗАЩИТНОМ КОСТЮМЕ С ВОДОЛЕДЯНОЙ СИСТЕМОЙ ОХЛАЖДЕНИЯ

Приведены математическая модель и метод расчёта динамики температуры и содержания вредных веществ в оболочке теплогазозащитного костюма и в подкостюмном пространстве в зависимости от температуры и содержания в окружающей среде. Результаты исследований использованы при разработке противотеплогазозащитного костюма и позволяют прогнозировать защитную его способность с учетом химико-физических свойств материала оболочки, мощности источников вредных веществ и теплоты.

В практике горноспасательных работ неоднократно возникали ситуации, когда в выработки шахт Донбасса проникали с поверхности вещества: хлорбензол, ацетон, бензол, серная кислота и т.д. (шахты «Александр-Запад ПО «Артемуголь», «Углегорская», им. М.И.Калинина, «Кондратьевская» ПО «Орджоникидзеуголь» [1].

При ликвидации аварий в выработках с температурой окружающей среды до 40 °С шахты «Александр-Запад» произошло отравление многих шахтеров и горноспасателей, некоторые получили тепловые поражения и были госпитализированы. Во время ликвидации аварии для разведки выработок горноспасатели использовали одни из лучших в мировой практике газозащитные костюмы типа «Трелльчем» с воздушными аппаратами «Спироматик-324» фирмы «Интерспирс», однако защитная их способность оказалась недостаточной, ввиду наличия однослойной оболочки и отсутствия системы охлаждения. В связи с этим, возникла необходимость в разработке газозащитного костюма с многослойной оболочкой и использования в нем водолеяных охлаждающих элементов (ОЭ), применяемых горноспасателями в противотепловой одежде и, в частности, математической модели процесса теплопереноса в костюме с учетом температуры и содержания вредных веществ в окружающей среде, которая отсутствует в литературных источниках.

Рассмотрим процессы теплопереноса в трехслойной оболочке (рис.1): 1 – наружный слой; 2 – воздушная прослойка; 3 – внутренний слой. В дальнейшем, для краткости, теплогазозащитный костюм назовем оболочкой, а под субстанцией подразумеваем теплоту или вредное вещество.

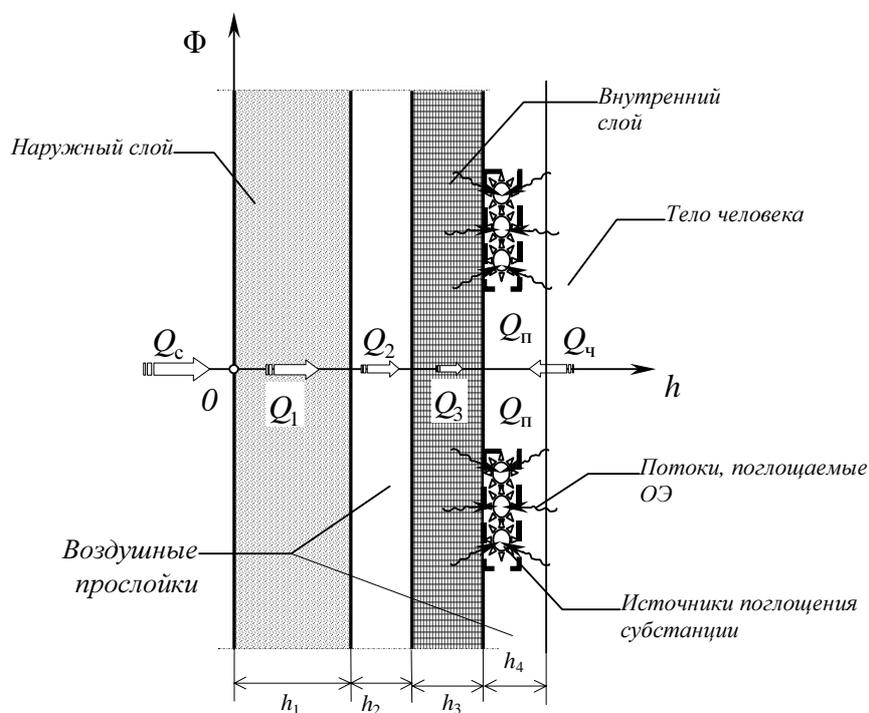


Рис. 1. Расчётная схема оболочки костюма

Оболочка подвержена тепловому или химическому воздействию со стороны окружающей среды извне и тепловому со стороны тела человека. Кроме того, в воздушной прослойке подкостюмного пространства расположены источники поглощения субстанции – водолеяные ОЭ.

Для построения математической модели процессов переноса субстанции в оболочке костюма вводится пространственная координата h , m , отсчитываемая от наружной поверхности костюма, по нормали вглубь оболочки (см. рис. 1). Принимается допущение, что по поверхности любого слоя оболочки (в направлениях, перпендикулярных Oh) субстанция распределена равномерно, т.е. градиент субстанции по площади слоёв оболочки, в окрестности исследуемого фрагмента костюма, пренебрежимо мал по сравнению с градиентом вглубь оболочки. Текущее время τ , s , отсчитывается с момента попадания человека в защитном костюме в среду с повышенным содержанием субстанции. Динамика распределения субстанции по толщине защитной оболочки описывается дифференциальным уравнением вида [2-5]:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \tau} = \varphi^2 \frac{\partial^2 \Phi}{\partial h^2}, \quad (1)$$

где $\Phi = \Phi(h, \tau)$ – физическая переменная, характеризующая содержание субстанции в единице объёма оболочки, а именно: температура, T , K , или концентрация C вредных веществ, $кг/м^3$; $\varphi^2 = \varphi^2(h)$ – коэффициент диффузионной проводимости материала оболочки: температуропроводности a или диффузии D , $м^2/с$.

В дальнейшем температуру и концентрацию вредных веществ назовем концентрацией субстанции, а первый указанный параметр отнесем к процессу теплопереноса, второй – к процессу массопереноса.

Принимаем, что во внешней среде концентрация Φ_c постоянна

$$\Phi|_{h<0} = \Phi_c = \text{const}. \quad (2)$$

Далее предполагаем, что в начальный момент времени концентрация в оболочке Φ_0 – минимальная и одинакова во всех слоях, а именно:

$$\Phi|_{\tau=0} = \Phi_0 = \text{const}. \quad (3)$$

Проникновение субстанции из внешней среды в оболочку и из оболочки в подкостюмное пространство (ПП) моделируется в соответствии с законом Ньютона граничными условиями третьего рода:

$$\sigma_c (\Phi_c - \Phi_1|_{h=0}) = -\varphi_1^2 \frac{\partial \Phi_1}{\partial h} \Big|_{h=0}; \quad -\varphi_3^2 \frac{\partial \Phi_3}{\partial h} \Big|_{h=\Delta} = \sigma_n (\Phi_3|_{h=\Delta} - \Phi_n), \quad (4)$$

где $\Delta = \sum_{i=1}^3 h_i$ – суммарная толщина слоёв оболочки, $м$; h_i – толщина i -го слоя или прослойки, $м$; σ_c и σ_n – коэффициенты обмена субстанцией между средой и оболочкой, оболочкой и ПП, $м/с$; Φ_n – концентрация субстанции в ПП.

Предположим, что обмен субстанцией на границах воздушной прослойки (см. рис. 1) происходит по закону Фурье, что соответствует граничным условиям четвёртого рода

$$\Phi_i|_{h=\delta_i} = \Phi_{i+1}|_{h=\delta_i}; \quad \varphi_i^2 \frac{\partial \Phi_i}{\partial h} \Big|_{h=\delta_i} = \varphi_{i+1}^2 \frac{\partial \Phi_{i+1}}{\partial h} \Big|_{h=\delta_i}, \quad (i=1,2) \quad (5)$$

где $\delta_1 = h_1$; $\delta_2 = h_1 + h_2$.

Количество субстанции, проникшей в ПП, может быть определено на основании уравнения её материального баланса, то есть

$$Q_n = Q_c + Q_{ш} + Q_ч + Q_и, \quad (6)$$

где Q мощность потока субстанции, то есть тепловая мощность, $Вт$, или массовый расход вредного вещества $кг/с$; индексы указывают соответственно на мощность потока субстанции в ПП: “н” – аккумулярованной в текущий момент; “с” – проникшей из внешней среды через материал оболочки; “ш” – проникшей из внешней среды через швы костюма; “ч” – от тела человека; “и” – поглощаемой или выделяемой источниками. В дальнейшем предполагаем, что величины $Q_{ш}$ и $Q_ч$ – известные константы.

Для процесса переноса теплоты выражение (6) представим в виде

$$\rho_p V_n \frac{dT_n}{d\tau} = \alpha_n S_n (T_\Delta - T_n) + Q_\Phi - \alpha_3 S_3 (T_n - T_3), \quad (7)$$

где ρ – плотность среды ПП, $кг/м^3$; c_p – удельная теплоёмкость среды ПП, $Дж/(кг \cdot K)$; V_n – объём ПП, $м^3$; T_n – температура в ПП, K ; α_n – суммарный коэффициент конвективного и лучистого теплообмена между внутренней поверхностью оболочки и ПП, $Вт/(м^2 \cdot K)$; S_n – площадь внутренней поверхности оболочки, $м^2$; $T_\Delta = T_3|_{h=\Delta}$ – температура внутренней поверхности оболочки, K ; $Q_\Phi = Q_ч + Q_{ш}$ – суммарная тепловая мощность потоков от тела человека и через швы из внешней среды (фоновая мощность), $Вт$; α_3 – суммарный коэффициент конвективного и лучистого теплообмена между поверхностью оболочки охлаждающих элементов ПП, $Вт/(м^2 \cdot K)$; S_3 – суммарная площадь поверхности охлаждающих элементов, $м^2$; T_3 – температура охлаждающих элементов, K .

В свою очередь баланс массы вредного вещества описывается уравнением

$$V_n \frac{\partial C_n}{\partial \tau} = \sigma_n S_n (C_\Delta - C_n), \quad (8)$$

где $C_\Delta = C|_{h=\Delta}$ – концентрация вредного вещества на внутренней поверхности оболочки.

Если обе части уравнения (7) разделить на $(\rho \cdot c_p \cdot V_n)$, а уравнение (8) на V_n , то их можно записать одним уравнением

$$\frac{\partial \Phi_n}{\partial \tau} = \frac{\sigma_n}{\delta_n} (\Phi_\Delta - \Phi_n) + q_\Phi + \frac{\sigma_3}{\delta_3} (\Phi_n - \Phi_3), \quad (9)$$

где для процесса теплопереноса: $\sigma_n = (\alpha_n S_n) / (\rho c_p)$ и $\sigma_3 = (\alpha_3 S_3) / (\rho c_p)$ – относительные величины коэффициентов теплообмена, m/c ; $q_\Phi = Q_\Phi / (\rho c_p V_n)$ – относительная величина фоновой мощности теплового потока K/c ; $\delta_n = V_n / S_n$ и $\delta_3 = V_3 / S_3$ – условная толщина ПП и охлаждающих элементов, m ;

$\Phi_\Delta = \Phi|_{h=\Delta}$ – концентрация субстанции на внутренней поверхности оболочки.

При исследовании процесса переноса вредных веществ последние два слагаемых в правой части (9) приравняются нулю.

Следовательно, по динамике концентрации субстанции на внутренней поверхности оболочки с помощью (9) имеется возможность прогнозировать её содержание в ПП, а значит и пропускную способность оболочки. Величина C_Δ (или T_Δ) определяется из решения уравнения (1) с краевыми условиями (2)-(5).

В ходе решения поставленной задачи расчёт параметров переноса субстанции через оболочку производим путём дискретного представления динамики процесса, а именно рассматриваем поле концентрации субстанции по толщине оболочки через равные промежутки времени $\Delta\tau, c$, длительность которых определяем из условий сходимости метода решения. На очередном временном шаге $\tau_n = n \cdot \Delta\tau$ ($n = 1 \dots N$), c , решение (1) представляем в виде

$$\Phi_i^n = a_i^n + b_i^n \cdot \psi(x_i^n), \quad (10)$$

где верхний индекс “ n ” указывает на значение переменной в момент времени τ_n ;

$\psi = \psi(x_i^n) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{x_i^n} e^{-\xi^2} \cdot d\xi$ – интегральная функция или функция ошибок $\text{erf}(x_i^n)$;

$x_i^n = \frac{h}{2 \cdot \varphi_i \cdot \sqrt{\tau_n}}$ – относительное значение переменной h в пределах i -го слоя или прослойки.

При $\tau_n \Rightarrow 0$ в соответствии с (10) имеем $x_i^n \Rightarrow \infty$; $\psi(x_i^n) \Rightarrow 1$ и тогда из начального условия (3) следует

$$a_i^n = \Phi_0 - b_i^n, \quad (11)$$

а выражение (10) преобразуется к следующему виду

$$\Phi_i^n = \Phi_0 - b_i^n [1 - \psi(x_i^n)]. \quad (12)$$

Константы b_i^n определяются из граничных условий (4), (5).

С учётом (12) первое из условий (4) на внешней поверхности оболочки представим в виде:

$$\sigma_c (\Phi_c - \Phi_0 + b_1^n) = -b_1^n \cdot \frac{\varphi_1}{\sqrt{\pi \cdot \tau_n}}, \quad \text{откуда } b_1^n = -\frac{\Phi_c - \Phi_0}{1 + \frac{\varphi_1}{\sigma_c} \cdot \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot \tau_n}}}. \quad (13)$$

Величины b_i находим из условия совпадения концентрации на границах. В результате из условия неразрывности поля концентрации (5) и, не указывая верхний индекс « n » с целью упрощения, имеем

$$b_{i+1} = b_i \cdot \frac{1 - \psi(x_{ii})}{1 - \psi(x_{i+1i})}, \quad x_{ii} = \frac{\delta_i}{2 \cdot \varphi_i \sqrt{\tau}}, \quad (i=1,2) \quad (16)$$

Из второго уравнения (4) следует, что концентрация субстанции в ПП ориентировочно может быть определена. Однако, этим выражением невозможно учесть объём ПП, наличие источников субстанции в нем и, в конечном счёте, не ясно на какой глубине ПП имеет место такая величина концентрации. В свою очередь, из решения уравнения (9) следует, что на каждом временном шаге концентрация в ПП в зависимости от ее величины на внутренней поверхности оболочки имеет вид

$$\Phi_{\Pi} = \frac{1}{\sigma_{\Pi\Xi}} \Phi_{\text{и}} - \left(\frac{1}{\sigma_{\Pi\Xi}} \Phi_{\text{и}} - \Phi_0 \right) \cdot e^{-\sigma_{\Pi\Xi} \cdot \tau}, \quad (16)$$

$$\sigma_{\Pi\Xi} = \frac{\sigma_{\Pi}}{\delta_{\Pi}} - \frac{\sigma_{\Xi}}{\delta_{\Xi}}; \quad \Phi_{\text{и}} = \frac{\sigma_{\Pi}}{\delta_{\Pi}} \Phi_{\Delta} - \frac{\sigma_{\Xi}}{\delta_{\Xi}} \Phi_{\Xi} + q_{\Phi}.$$

Данная аналитическая зависимость Φ_{Π} от Φ_{Δ} позволяет учесть указанные выше факторы и для её использования необходимо иметь данные о концентрации источника поглощения (выделения), которые могут быть получены в результате замеров в реальных условиях выработок шахт. Приведенные зависимости позволяют прогнозировать пропускную способность оболочки по концентрации на её внутренней поверхности.

В качестве примера такого прогноза на рис. 2 представлен один из результатов расчёта динамики концентрации вредного вещества в оболочке (при отсутствии внутренних источников), полученный на основании решения поставленной задачи в случае $\varphi_1^2 = 3,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$; $\varphi_2^2 = 4,0 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$; $\varphi_3^2 = 2,5 \text{ м}^2/\text{с}$; $\sigma_c = 5,0 \cdot 10^{-5} \text{ г}/\text{с}$, толщине слоёв $h_1 = 10 \text{ мм}$; $h_2 = 15 \text{ мм}$; $h_3 = 5 \text{ мм}$, концентрации субстанции $c_c = 0,1 \text{ г}/\text{м}^3$.

В данном случае концентрация вредного вещества в ПП при ее нулевом начальном может достичь половины концентрации во внешней среде через 1 ч, заметна тенденция стремления поверхности поля концентрации оболочки к плоскости, т.е. к стационарному распределению концентрации уже через 3 ч.

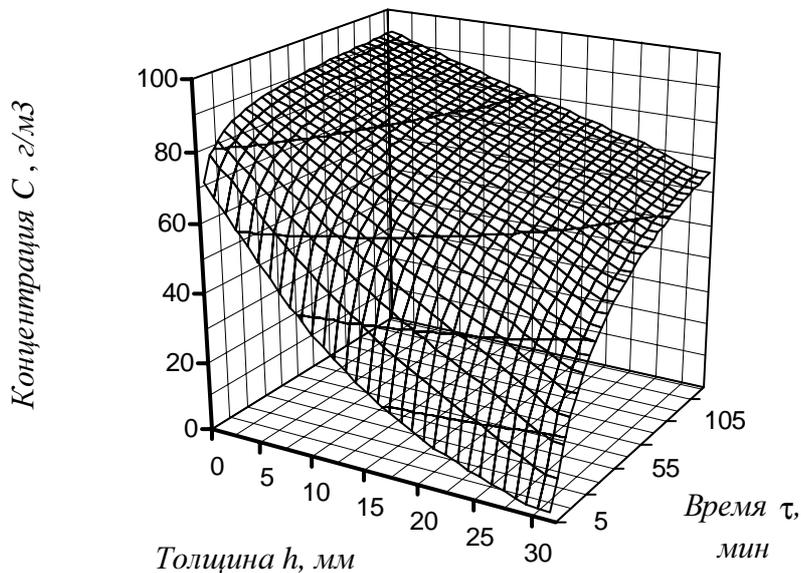


Рис. 2. Динамика концентрации вредного вещества в оболочке

Для исследования поля концентрации в общем случае решение задачи представим в безразмерных переменных

$$\phi = \frac{\Phi - \Phi_0}{\Phi_c - \Phi_0}; \quad \eta = \frac{h}{\Delta}; \quad F_0 = \frac{\varphi_1^2 \cdot \tau}{\Delta^2}; \quad B = \frac{\sigma_c \cdot \Delta}{\varphi_1^2}, \quad (17)$$

следующим образом

$$\theta_i = -\beta_i \left[1 - \psi \left(\frac{\eta}{2 \cdot \xi_i \cdot \sqrt{Fo}} \right) \right], \quad (18)$$

где $b_1 = -\frac{Bi \cdot \sqrt{\pi \cdot Fo}}{1 + Bi \cdot \sqrt{\pi \cdot Fo}}$; $\beta_i = \beta_{i-1} \frac{1 - \psi \left(\frac{\eta_{i-1}}{2 \cdot \xi_{i-1} \cdot \sqrt{Fo}} \right)}{1 - \psi \left(\frac{\eta_{i-1}}{2 \cdot \xi_i \cdot \sqrt{Fo}} \right)}$, $i = 2, 3$; $\eta_{i-1} = \delta_{i-1} / \Delta$, $i = 2, 3$; $\xi_1 = 1$;

$$\xi_2 = \varphi_2 / \varphi_1; \quad \xi_3 = \varphi_3 / \varphi_1.$$

В результате моделирования поля концентрации различных вредных веществ в оболочке защитного костюма, в соответствии с (18), определена необходимая проводимость её слоёв при заданной концентрации во внешней среде в зависимости от требуемого периода защитного действия и допустимой концентрации в подкостюмном пространстве [6].

В частности получено, что в случае содержания хлорбензола во внешней среде $C_c = 18,0 \text{ г/м}^3$ (шахта «Александр-Запад») и допустимой концентрации $0,05 \text{ г/м}^3$, то есть, превышающей норму в 360 раз, для обеспечения защиты в течение 180 мин, при толщине слоёв, указанных выше, проводимость наружного слоя должна быть величиной порядка $D_1 \approx 10^{-11} \text{ мм}^2/\text{с}$ ($Bi = 0,06$; $Fo = 0,14$).

Динамика концентрации в оболочке костюма в этом случае приведена на рис. 3, где нижняя кривая соответствует моменту времени 20 мин; верхняя – 200 мин, а промежуточные значения рассчитаны и кривые построены с интервалом 20 мин.

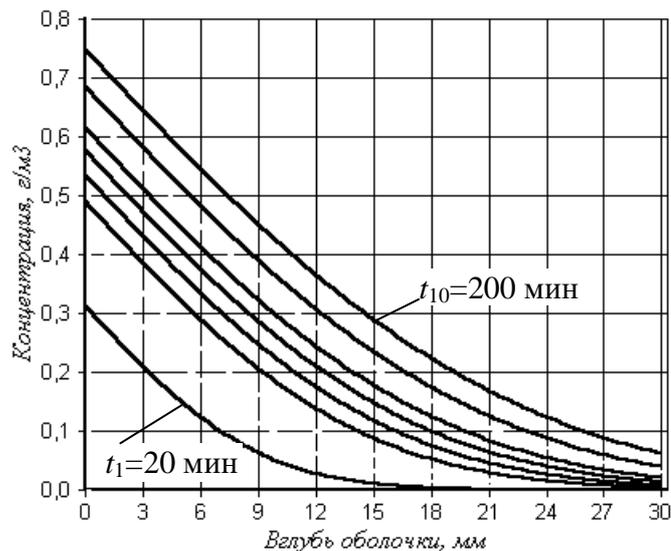


Рис. 3. Динамика концентрации хлорбензола в слоях оболочки с интервалом 20 мин

Разработанная математическая модель и полученные результаты использованы при проектировании защитных свойств противотеплогазового костюма с известными проводимостью и толщиной оболочки, а также для решения обратной задачи – определения физико-химических и геометрических параметров слоёв и прослоек оболочки, при которых обеспечивается требуемая защита.

Библиографический список

1. **Чумак А.С., Грядущий Б.А., Недавний А.Г.** Загазирование шахт Центрального района Донбасса продуктами химических производств // Уголь Украины. – 1991. – № 1. – С. 31-33.
2. **Тихонов А.Н., Самарский А.А.** Уравнения математической физики / Учебное пособие для университетов. – М.: Наука, 1972. – 735 с.
3. **Лыков А.В.** Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.

4. Цой П.В. Методы расчёта задач тепломассопереноса. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 416 с.
5. Шорин С.Н. Теплопередача. – М.: Госстройиздат, 1952. – 490 с.
6. Метод определения защитной способности изолирующих костюмов / Карпекин В.В., Диденко Н.С., Зрелый Н.Д., Костюкова В.И. // Горноспасательное дело: Сб. науч. трудов / НИИГД. – Донецк, 1991. – С. 10-14.

© Онасенко А.А. 2004

УДК 504:553.499 (477.6)

КОРЧЕМАГИН В.А., ПАНОВ Ю.Б. ГУНЧЕНКО В.В. ШКВАР А.С.

ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ РТУТЬЮ СРЕДЫ НА НИКИТОВСКОМ РУДНОМ ПОЛЕ И В ДОНБАССЕ

В данной статье приведены новые сведения о содержании ртути в углях Донбасса на основании результатов исследований в 2004, проведенных специалистами кафедры "ПИ и ЭГ" совместно с американскими учеными. Полученные выводы указывают на то, что угли вокруг Никитовского рудного поля содержат рассеянные ореолы ртути и, следовательно, их нельзя использовать в промышленных и бытовых целях. В работе представлена 1 таблица и 2 рисунка.

Донбасс является одним из крупнейших горнорудных районов Европы и всего мира, где за более 200 лет промышленной разработки добыто свыше 8 млрд. т каменных углей и антрацитов. Основа существования региона – его минерально-сырьевые ресурсы. Однако всё возрастающее техногенное воздействие на природную среду обитания, связанное с разработкой углей и других полезных ископаемых, развитием металлургической, коксохимической, строительной и иных видов промышленности, работой ТЭЦ, сжигающих каменный уголь, и других производств создало в Донбассе весьма напряжённую экологическую обстановку. Она негативно сказывается не только на природных ландшафтах, водной и воздушной среде, но и здоровье людей, а также продолжительности жизни. Донецкий бассейн является зоной экологического бедствия. В ряде населенных пунктов население явно токсифицировано. В Горловке, где расположен Никитовский ртутный комбинат, отмечена повышенная возбужденность и неаргументированная агрессивность людей. По имеющимся данным в этом районе количество ртути в почвах достигает 15-20 мг/кг, что негативно влияет на здоровье жителей [1].

В данной статье излагаются экологические последствия долговременной добычи ртути на Никитовском рудном поле. На основании полученных результатов опробования угольных пластов, золы растений и почв сделаны соответствующие выводы о загрязнении окружающей среды.

Никитовское рудное поле расположено в центральной части Донецкого бассейна на территории Горловского и Дзержинского районов Донецкой области. Оно вытянуто в северо-западном направлении на расстояние около 20 км вдоль присводового участка Горловской антиклинали, являющейся наиболее разведанной частью Главной антиклинали Донбасса. Породы на крыльях антиклинали падают к северу под углом 55-60°, к югу-65-70°.

Рассматриваемая площадь сложена угленосной толщей среднего (свиты C_2^2 , C_3^2 , C_4^2 , C_5^2 , C_6^2 , C_7^2) и верхнего (C_3^1 и C_3^2) карбона общей мощностью около 5 км. Представлена она чередованием песчаных и глинистых сланцев, песчаников, углей и известняков. Пласты углей достигают рабочей мощности, вместе с известняками они имеют подчиненное значение, но являются надежными маркирующими горизонтами. Наиболее подробно описаны свиты C_2^2 и C_3^2 , включающие основные рудоносные горизонты песчаников – Чегарникских 1-х ($G_3^1 Sg_2$), Софиевских ($h_1 Sh_3$) и Чернобугорских ($h_{10} SI_1$).

Складчатая структура нарушена разломами. Наиболее четко выражены продольные (северо-западные), кососекущие и поперечные нарушения. Никитовское рудное поле ограничено от крыльев Горловской антиклинали, разрабатываемых угольными шахтами, продольными восточнопадающими разрывами: Секущим и Софиевским Новым.