DOI: 10.18454/PMI.2017.1.99

Геоэкология и безопасность жизнедеятельности

УДК 622.33.016:622.817.4:622.42/46:519.8

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ АЭРОГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПОДЗЕМНОЙ ДОБЫЧЕ УГЛЯ НА РАЗЛИЧНЫХ СТАДИЯХ ОТРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

М.В.ГРЯЗЕВ, Н.М.КАЧУРИН, С.А.ВОРОБЬЕВ
Тульский государственный университет, Тула, Россия

Установлены новые и уточнены существующие закономерности фильтрационно-диффузионного движения газов в угольных пластах и вмещающих породах, самонагревания угля и переноса газовых примесей вентиляционными струями в действующих угольных шахтах. Обоснованы математические модели аэрогазодинамических и теплофизических процессов на подработанных территориях после ликвидации шахт. Представлены математические модели для подачи на очистные и подготовительные участки аэрогазодинамически обоснованного количества воздуха и разработки геотехнологических решений, обеспечивающих аэрологическую безопасность на всех этапах существования угольных шахт. Показано, что применение высокопроизводительной техники на очистных и подготовительных участках требует уточнения уравнений фильтрации, используемых при оценке метановой опасности шахт. Обоснована математическая модель поля давлений свободного метана в краевой части угольного пласта, которая основывается на одномерном уравнении гиперболического типа и учитывает конечную скорость распространения давления в пласте. Уточнены закономерности газообмена выработанных пространств метанообильных и углекислотообильных шахт с земной поверхностью для обеспечения экологической безопасности подработанных территорий.

***Ключевые слова*:** математическая модель, аэрогазодинамический процесс, угольный пласт, горные породы, выработанные пространства, метан, кислород, углекислый газ, геотехнология.

***Как цитировать эту статью*:** Грязев М.В. Математические модели аэрогазодинамических и теплофизических процессов при подземной добыче угля на различных стадиях отработки месторождений / М.В.Грязев, Н.М.Качурин, С.А.Воробьев // Записки Горного института. 2017. Т. 223. С. 99-108. DOI: 10.18454/PMI.2017.1.99

Оценка аэрологической безопасности подземной добычи угля. Многие шахты Кузбасса, Воркуты и Донбасса – высокогазообильные и, как показывает статистика взрывов метановоздушной смеси (МВС) в угольных шахтах России, до настоящего времени нет эффективной системы предотвращения этого вида аварий. В то же время широко внедряется технология «шахта – лава», при которой добыча из одной лавы может достигать 20-30 тыс.т в сутки [2]. Зарубежный подход к решению задач рудничной аэрогазодинамики чрезвычайно прагматичен: финансовая составляющая фактически связывает между собой удачные технологические решения в наименее затратную во всех отношениях композицию. Тем не менее, необходимо иметь научное обоснование технологий, безопасных по аэрологическому фактору. Например, на типовых высокопроизводительных шахтах США потеря 10 % рабочего времени из-за аварий, связанных с газовым фактором, может привести к убыткам 1 млн долларов, а единичная авария с жертвами дополнительно наносит ущерб в 2-8 млн долларов через потерю продукции, судебные издержки, компенсации и штрафы [2, 3]. Существующие методы прогнозирования аэрогазодинамических процессов, определяющих уровень безопасности подземной угледобычи и экологических последствий на всех этапах существования угольных шахт на территориях горнопромышленных регионов, требуют более глубокого научного обоснования [12, 16].

Высокая метаноносность разрабатываемых угольных пластов является причиной возникновения газового барьера для высокопроизводительных технологий подземной добычи угля. А действующие технологии геоэкологического мониторинга не обеспечивают выполнение требований экологического императива для территорий горных отводов, ликвидированных шахт [5, 11]. Поэтому комплексное изучение аэрогазодинамики подземной угледобычи, обусловленной геотехнологическими и геоэкологическими процессами, весьма актуально.

Интенсивность выделения газа из того или иного источника является переменной во времени [18]. Доля в общем балансе, определяемая тем или иным источником, зависит как от потенциальной газовой активности источника, так и от времени, прошедшего с момента его включения в процесс газовыделения. Основные источники газовыделений известны, и в настоящее время имеется обширный фактический материал о динамике истечения газа из этих источников [13]. Газовыделение из разрабатываемого угольного пласта определяется интенсивностью газоотдачи с поверхности обнажения и из отбитого угля. Газовыделение из выработанных пространств скла-

DOI: 10.18454/PMI.2017.1.99

дывается из количества газа, поступающего из пластов-спутников, подработанных и надработанных пород, выделяющегося из зон беспорядочного обрушения или же тупиковых выработок, изолированных от выработанного пространства перемычкой. Статистический анализ аварий в угольных шахтах по аэрогазодинамическому фактору показывает, что эффективность существующих методов для прогнозирования риска взрывов метановоздушной смеси в горных выработках угольных шахт, физическая модель и математическое описание угрозы возникновения взрывоопасных газовых ситуаций в горных выработках угольных шахт являются неудовлетворительными [9].

Поэтому необходимо развивать системные принципы технологии снижения риска техногенных аварий в угольных шахтах, которые основываются на моделировании риска по аэрологическому и газовому факторам, а также моделировании газовой ситуации при появлении предвестников взрывоопасного состояния шахтного воздуха. Анализ структуры риска взрыва метановоздушной смеси позволяет записать концептуальную формулу в следующем виде:

Риск взрыва МВС = Вероятность взрыва МВС × Ущерб от взрыва МВС.

При определении эффективности защитных мероприятий от конкретного вида аварий в технологическом процессе добычи угля (ТПДУ) подземным способом, оценке опасности производственных ситуаций, разработке планов ликвидации аварий следует принимать во внимание основные показатели аварийности и безопасности шахт.

Наиболее перспективным в России является Кузнецкий угольный бассейн. Однако и другие условно нерентабельные угольные бассейны представляют практический интерес. Загазирование выработок в шахтах Кузбасса происходит довольно часто, и создаются ситуации, опасные по газовому фактору. На углекислотообильных шахтах также возникают опасные газовые ситуации, обусловленные выделением «мертвого» воздуха. Это вызвано низкотемпературным окислением угля в выработанном пространстве и падением атмосферного давления [4, 6, 8].

Прогрессивные технологические схемы выемки угля и высокопроизводительные очистные комбайны создают на очистных участках сложные газовые ситуации, которые не позволяют в полной мере обеспечить максимально возможную производительность. Цикл подземной отработки запасов угля в пределах шахтного поля вызывает различные аэрогазодинамические и теплофизические процессы (рис.1). Математическое описание этих процессов можно реализовать уравнениями математической физики в частных производных различных типов [10, 17].

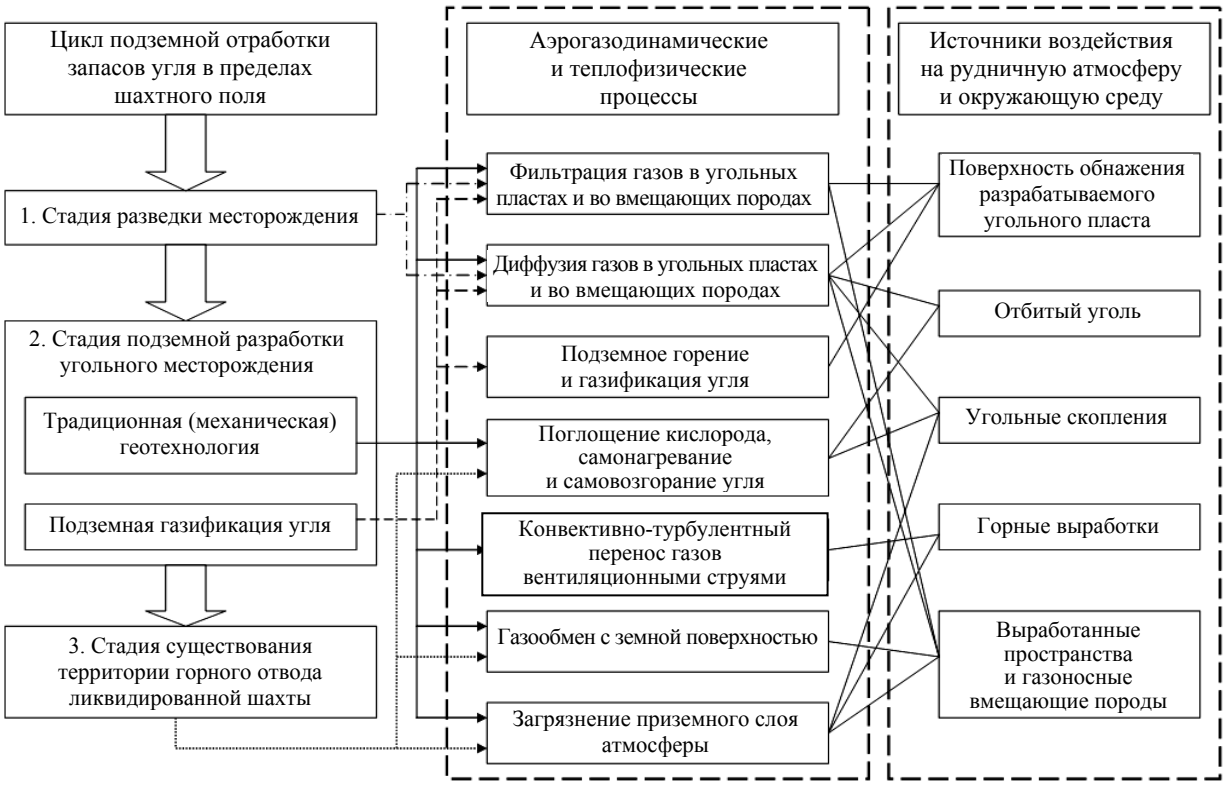


Рис.1. Аэрогазодинамические и теплофизические процессы подземной геотехнологии добычи угля на различных стадиях отработки месторождений

DOI: *10.18454/PMI.2017.1.99*

Математические модели динамики газовыделения на углекислотообильных шахтах. Газовыделение из горных массивов и выработанных пространств, содержащих свободный газ и несорбированные газовые смеси, описывается линеаризованным уравнением фильтрации. Эта математическая модель является базовой для прогноза экстренного газовыделения, вызванного уменьшением статического давления воздуха в горных выработках, т.е. при падении атмосферного давления и при реверсировании вентилятора главного проветривания.

Однако долгое время границы применения линеаризованного уравнения не оценивались. Для получения этих оценок сравнивались численные значения решения нелинейного уравнения фильтрации газа с численными значениями, полученными по линеаризованному уравнению. Результаты вычислительных экспериментов наглядно демонстрируют, что как метод Л.С.Лейбензона, так и метод И.А.Чарного дают хорошее совпадение с точным решением [4]. Погрешность не превышает нескольких процентов.

Процесс газообмена угольного пласта с шахтной атмосферой на негазовых шахтах обусловлен поглощением кислорода и выделением углекислого газа. Процесс протекает в режиме кнудсеновской диффузии. Получены теоретические зависимости и формулы для инженерных расчетов. Объем кислорода, проникающего через единицу поверхности обнажения угольного пласта в единицу времени, определяется по формуле

$$I_{\text{уд.к}} = c_{\text{в}} D_{\text{к}}^{0,5} [(\pi t)^{-0,5} \exp(-K_{\text{O}} t) + K_{\text{O}}^{0,5} \operatorname{erf}(\sqrt{K_{\text{O}} t})], \quad (1)$$

где $c_{\text{в}}$ – концентрация кислорода в шахтном воздухе; $D_{\text{к}}$ – коэффициент диффузии кислорода в угле; K_{O} – константа скорости низкотемпературного окисления угля.

Анализ зависимости (1) показывает, что в практических расчетах целесообразно использовать предельную величину $I_{k\infty} = \lim\limits_{t\to\infty} I_{\text{уд.к}}$, которая определяется по формуле $I_{k\infty} = c_{\text{в}} \sqrt{D_{\text{к}} K_{\text{O}}}$. Тогда скорость выделения углекислого газа, обусловленная процессом низкотемпературного окисления угля, рассчитывается по формуле $I_{\text{у.г}}^{\text{уд}} = I_{k\infty} K_{\text{р}}$, где $K_{\text{р}}$ – респираторный коэффициент.

Математические модели динамики газовыделения на метанообильных шахтах. Применение высокопроизводительной техники на очистных и подготовительных участках требует уточнения уравнений фильтрации, применяемых при оценке метановой опасности шахт. Обоснована математическая модель поля давлений свободного метана в краевой части угольного пласта, которая основывается на одномерном уравнении гиперболического типа и учитывает конечную скорость распространения давления в пласте. Метановыделение с единичной поверхности обнажения разрабатываемого угольного пласта определяется по формуле $I_{\text{уд.п}} = I_{\text{уд.н}} \exp(-0,5t/t_r) I_0(0,5t/t_r)$, где $I_{\text{уд.н}}$ – начальная скорость газовыделения; t_r – период релаксации; $I_0(0,5t/t_r)$ – модифицированная функция Бесселя нулевого порядка для аргумента, записанного в скобках.

Для моделирования динамики абсолютной газообильности получены следующие зависимости [7, 14]: метановыделение в подготовительную выработку

$$I_{\text{п.о}}(t) = \begin{cases} 0,318\, n m_{\text{у.п}} t_r V_{\text{п.з}} I_{\text{уд.н}} \Theta_1(\tau) \text{ при } \tau \le \tau_{\text{п.в}}, \\ I_{\text{п.о}}^{\max} \Theta_2(\tau - \tau_{\text{п.в}}) \text{ при } \tau \ge \tau_{\text{п.в}}; \end{cases} \quad (2)$$

метановыделение в подготовительный забой

$$I_{\text{п.з}}(t) = I_{\text{п.з}}^{\max} = 0,318\, m_{\text{у.п}} t_r V_{\text{п.з}} I_{\text{уд.н}} \Theta_1(\tau_m); \quad (3)$$

метановыделение в очистной забой

$$I_{\text{о.з}}^{\max}(t) = 0,637\, n\, m_{\text{у.п}} t_r V_{\text{о.з}} I_{\text{уд.з}} \Theta_1(\tau_{\text{о.з}}), \quad (4)$$

где

$$I_{\text{п.о}}^{\max}(T_{\text{п.в}}) = 0,318\, n m_{\text{у.п}} t_r V_{\text{п.з}} I_{\text{уд.н}} \Theta_1(\tau_{\text{п.в}});$$

DOI: 10.18454/PMI.2017.1.99

$$\Theta_1(\xi) = \int_0^{\xi} \exp(-\zeta) \int_0^{\pi} \left[\exp(\zeta\cos\theta) + \exp(-\zeta\cos\theta)\right] d\theta d\zeta;$$

$$\Theta_2(\xi) = 0{,}159 \exp\left[-(\xi - \tau_{\text{п.в}})\right] \int_0^{\pi} \left\{\exp\left[(\xi - \tau_{\text{п.в}})\cos\theta\right] + \exp\left[-(\xi - \tau_{\text{п.в}})\cos\theta\right]\right\} d\theta;$$

$\Theta_1(\xi)$, $\Theta_2(\xi)$ – функции безразмерного метановыделения; n – количество поверхностей обнажения угольного пласта; $m_{\text{у.п}}$ – мощность разрабатываемого угольного пласта; $V_{\text{п.з}}$, $V_{\text{о.з}}$ – скорость подвигания соответственно подготовительного и очистного забоя; $T_{\text{п.в}}$ – проектная длительность проведения подготовительной выработки; $\tau_{\text{п.в}}$, τ_m и $\tau_{\text{о.з}}$ – безразмерные значения соответственно времени проведения подготовительной выработки, максимального отхода проходческого комбайна от крепи и прохождения очистным комбайном всей лавы.

Зависимости (2)-(4) позволяют прогнозировать динамику метановыделения с поверхности обнажения разрабатываемого угольного пласта. Результаты вычислительных экспериментов позволили установить вид функций безразмерного метановыделения $\Theta_1(\xi)$ и $\Theta_2(\xi)$. Аппроксимация этих функций осуществлена кубичными и квадратичными многочленами. Следует отметить, что коэффициент корреляции у этих аппроксимаций близок к единице.

Максимальное значение дебита метана в подготовительную выработку из отбитого угля имеет вид $I_{\text{о.у}}^{\infty} = 2{,}083 \cdot 10^{-3}\, S_{\text{ч}} V_{\text{п.з}} \gamma_{\text{у}} (x_{\text{з}} - x_{\infty})$, где $S_{\text{ч}}$ – площадь поперечного сечения выработки вчерне; $\gamma_{\text{у}}$ – плотность угля; $x_{\text{з}}$, x_{∞} – газоносность угля в забое и остаточная газоносность отбитого угля при атмосферном давлении.

Метановыделение из отбитого угля в очистной забой определяется следующей зависимостью:

$$I_{\text{о.у}}^{\text{о.з}} = 0{,}304 \gamma_{\text{у}} m_{\text{у.п}} b_{\text{з}} v_{\text{п}} (x_{\text{з}} - x_{\infty}) \times$$
$$\times \left\{ \exp\left[-9{,}87 \frac{D}{R^2} \left(t_{\text{в.ц}} - \frac{l_{\text{оч}}}{v_{\text{к}} + v_{\text{п}}} \right) \right] - \exp\left(-9{,}87 \frac{D}{R^2} t_{\text{в.ц}} \right) \right\}, \quad (5)$$

где $b_{\text{з}}$, $v_{\text{п}}$ и $v_{\text{к}}$ – ширина захвата, скорость подачи очистного комбайна и скорость скребкового конвейера соответственно; D и R – коэффициент диффузии метана в отбитом угле и средний радиус куска отбитого угля; $t_{\text{в.ц}}$ – продолжительность выемочного цикла; $l_{\text{оч}}$ – длина лавы.

В соответствии с формулой (5), метановыделение из отбитого угля в очистной забой зависит от режимных параметров работы выемочного комбайна и скребкового конвейера.

Метановыделение в очистной забой из подработанных вмещающих пород целесообразно определять с учетом газообмена породных блоков с транспортными трещинами:

$$I_R = \frac{2 I_r(t) p_{\text{a}} \mu l}{L_l l_f \sqrt{\alpha k_b k_c} (p_0^2 - p_1^2)}, \quad (6)$$

где $I_r(t) = (0{,}5 L_l l_{\text{оч}} \sqrt{\alpha k_b k_c} / p_{\text{a}} \mu l)(p_0^2 - p_1^2) \exp(-0{,}5\beta t) I_0(0{,}5\beta t)$; $\beta = \chi\eta^{-1}$; $\eta = k_b^{-1} k_c l^2$; $I_R(\tau) = \exp(-\tau) I_0(\tau)$; p_a и α – атмосферное давление и параметр геометрии пористо-трещиноватой среды выработанного пространства очистного забоя соответственно; μ и l – динамическая вязкость газа и характерный размер породных блоков; L_l – шаг обрушения основной кровли; k_b и k_c – газовая проницаемость породных блоков и зоны обрушения соответственно; p_1 – давление газовой смеси в выработанном пространстве очистного забоя на уровне почвы разрабатываемого угольного пласта.

Вычислительные эксперименты с использованием зависимости (6) показывают, что максимальное метановыделение должно возникать через некоторое время после обрушения пород основной кровли. Это хорошо согласуется с данными натурных наблюдений.

Безразмерное значение метановыделения в очистной забой из подработанного смежного угольного пласта определяется по следующей формуле: $J(\text{Fo}_f) = \text{Fo}_f^{-0,5} \exp(-\text{Fo}_f)$, где Fo_f –

DOI: *10.18454/PMI.2017.1.99*

фильтрационный критерий Фурье. Для прогнозирования метановыделения в очистной забой из надработанного смежного угольного пласта получена зависимость

$$I_{\text{н.п}}(t) = 0{,}564\frac{k_{\text{н.п}} l_{\text{оч}} V_{\text{о.з}} (p_0^2 - p_{\text{а}}^2)}{\mu p_0 H}\int\limits_0^{\text{Fo}_f} \frac{\exp(-0{,}25/\tau)}{\sqrt{\tau}}\,\text{d}\tau, \tag{7}$$

где $k_{\text{н.п}}$ и H – соответственно газовая проницаемость надработанных пород и мощность пород почвы разрабатываемого угольного пласта.

Расчеты по формуле (7) показали, что метановыделение в очистной забой из надработанного смежного угольного пласта происходит не так интенсивно, как из подработанного смежного угольного пласта.

Математические модели аэрогазодинамики горных выработок. Для обеспечения аэрологической безопасности горных предприятий исключительно актуальным является вопрос моделирования движения воздуха в горных выработках угольных шахт и рудников. Моделирование движения воздуха основывается в общем случае на системе уравнений О.Рейнольдса, которая состоит из основных уравнений сохранения:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho u_j\right) = 0; \tag{8}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho u_i\right) + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho u_j^* u_i^*\right) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + S_{ui} +$$
$$+ \frac{\partial}{\partial x_j}\left\{\mu_{eff}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) - \frac{2}{3}\mu_{eff}\frac{\partial u_l}{\partial x_l}\delta_{ij} - \frac{2}{3}\rho\delta_{ij}\kappa\right\}; \tag{9}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho H_1\right) - \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho u_j H_1\right) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial x_j} + \frac{\mu_t}{\text{Pr}_{\text{t}}}\frac{\partial h}{\partial x_j}\right) + S_E +$$
$$+ \frac{\partial}{\partial x_j}\left\{u_i\left[\mu_{eff}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) - \frac{2}{3}\mu_{eff}\frac{\partial u_l}{\partial x_l}\delta_{ij} - \frac{2}{3}\rho\delta_{ij}\kappa\right] + \mu\frac{\partial\kappa}{\partial x_j}\right\}, \tag{10}$$

уравнения кинетической энергии турбулентности

$$\frac{\partial(\rho\kappa)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j\kappa)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left\{\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\kappa}\right)\frac{\partial\kappa}{\partial x_j}\right\} + S_\kappa +$$
$$+ \mu_t\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3}\left(\rho\kappa + \mu_t\frac{\partial u_l}{\partial x_l}\right)\frac{\partial u_k}{\partial x_k} - \rho\varepsilon, \tag{11}$$

уравнения скорости диссипации кинетической энергии турбулентности

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j\varepsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left\{\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j}\right\} + S_\varepsilon +$$
$$+ \frac{\varepsilon}{\kappa}\left\{c_{\varepsilon 1}\left[\mu_t\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3}\left(\rho\kappa + \mu_t\frac{\partial u_l}{\partial x_l}\right)\frac{\partial u_k}{\partial x_k}\right] - \rho c_{\varepsilon 2}\varepsilon\right\}, \tag{12}$$

где ρ и u_j – плотность воздуха и компоненты средней скорости воздуха (j = 1, 2, 3) соответственно; u_i^*, S и p – пульсационные скорости (i = 1, 2, 3), энтропия и статическое давление воздуха соответственно; μ_{eff}, μ и μ_t – эффективная, динамическая и турбулентная вязкость воздуха соот-

DOI: 10.18454/PMI.2017.1.99

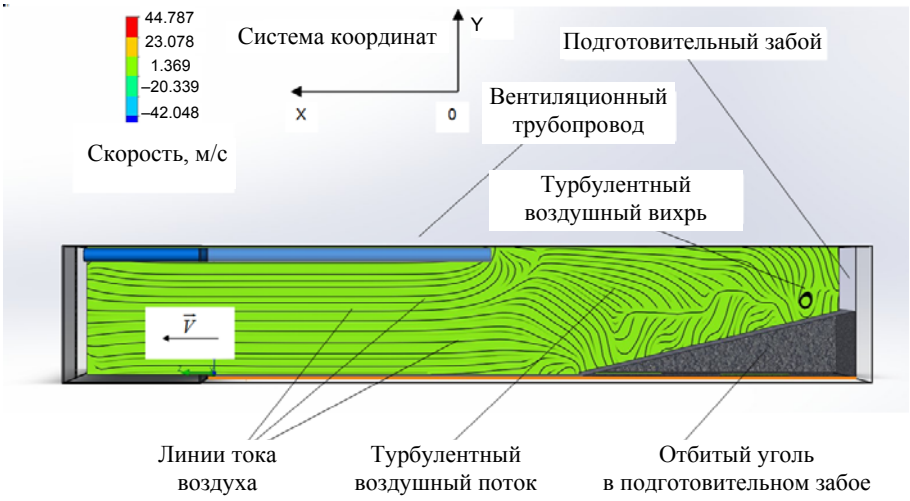


Рис.2. Структура турбулентного потока в призабойном пространстве подготовительной выработки

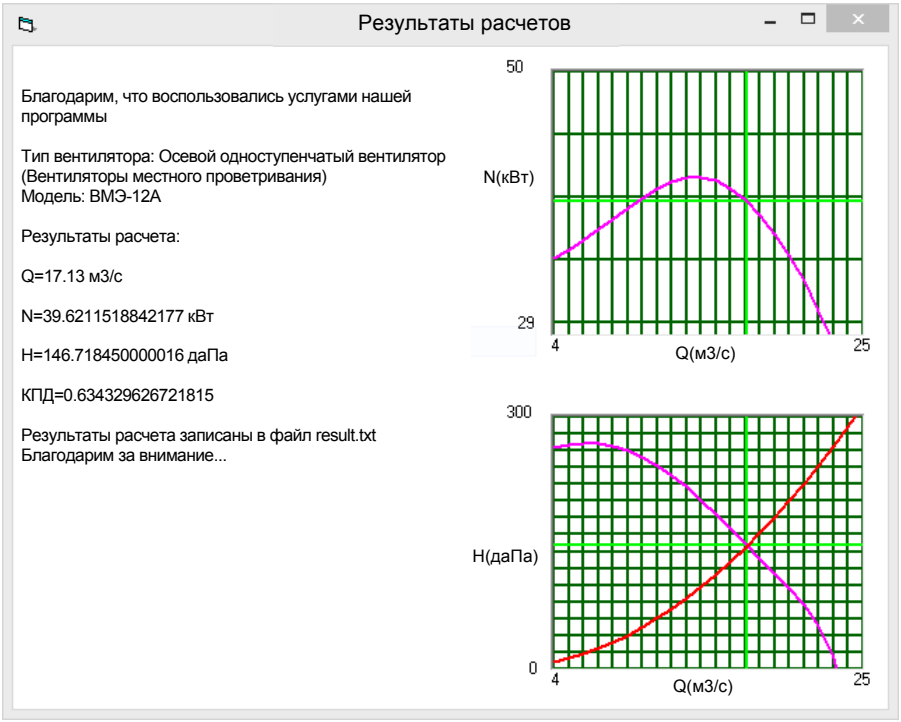


Рис.3. Форма программы для моделирования режимов работы вентиляторов на всех этапах проведения подготовительных выработок

ветственно; δ_{ij} и к – дельта Кронекера и кинетическая энергия турбулентности; H и h – полная и статическая энтальпия соответственно.

Численное решение уравнений О.Рейнольдса осуществлялось методом конечных элементов. Результаты расчета поля скоростей воздуха в подготовительном забое при нагнетательном способе подвода воздуха по центральному вентиляционному трубопроводу хорошо совпадают с известными результатами лабораторных и натурных экспериментов (рис.2).

Разумеется, следующим этапом является инженерный анализ результатов моделирования и разработка технических средств для реализации выбранных схем вентиляции.

Обоснование режимов проветривания, их математическое моделирование для решения практических задач вентилирования на выпускаемых промышленностью образцах шахтных вентиляторов также является одной из важнейших проблем. Эта проблема рассмотрена на примере режимов работы вентиляторов местного проветривания (ВМП) [1].

Математические модели воздухообмена на очистных и подготовительных участках. Основой математического моделирования этих процессов является точная аппроксимация рабочих характеристик вентиляторов. Доказано, что аппроксимация может быть эффективно осуществлена с помощью комплекса программных средств AutoCAD и Eureqa Pro. Получены точные аппроксимации практически всех используемых вентиляторов местного проветривания, выпускаемых в России. Высокая точность аппроксимации позволила разработать компьютерную программу для моделирования режимов работы вентиляторов на всех этапах проведения подготовительных выработок.

Программа позволяет определить режим работы вентилятора для конкретной сети. Изменяя исходные данные, можно проводить вычислительные эксперименты и моделировать режимы работы вентиляторов для различных вентиляционных сетей. Разработанные методические положения могут быть полностью перенесены и на вентиляторы главного проветривания шахт и рудников (рис.3).

DOI: *10.18454/PMI.2017.1.99*

Прогноз газовых ситуаций на очистных и подготовительных участках следует осуществлять, используя решения уравнения турбулентно-конвективной диффузии газа в воздушном потоке:

$$c(x,t)-c_H=\frac{DI_{\text{п.в}}}{\Omega_{\text{п.в}}}\left\{\left[1-\exp\left(-\frac{u_{\text{ср}}}{L_{\text{п.в}}}t\right)+0{,}5\exp\left(-\frac{u_{\text{ср}}}{L_{\text{п.в}}}t\right)\right]\int_0^t\exp\left(\frac{u_{\text{ср}}}{L_{\text{п.в}}}\tau\right)\times\right.$$

$$\left.\times\left[\exp\left(-K\sqrt{b}\right)\operatorname{erfc}\left(\frac{K}{2\sqrt{\tau}}-\sqrt{b\tau}\right)+\exp\left(K\sqrt{b}\right)\operatorname{erfc}\left(\frac{K}{2\sqrt{\tau}}+\sqrt{b\tau}\right)\right]d\tau\right\},\qquad(13)$$

где c – объемная концентрация рассматриваемой газовой примеси в воздухе выработки (для условий Кузбасса это метан или углекислый газ); c_H – объемная концентрация газовой примеси на свежей струе; D – среднее значение коэффициента турбулентной диффузии газовой примеси в воздухе; $I_{\text{п.в}}, \Omega_{\text{п.в}}$ – абсолютная газообильность и объем подготовительной выработки; $u_{\text{ср}}$ – средняя скорость движения воздуха по подготовительной выработке; $L_{\text{п.в}}$ – проектная длина подготовительной выработки.

Анализ результатов вычислительных экспериментов с использованием зависимости (13) показывает, что, во-первых, поля концентраций газовых примесей в воздухе очистных и подготовительных участков стремятся к некоторому стационарному состоянию и, во-вторых, динамический расчет количества воздуха, необходимого для проветривания очистных и подготовительных участков, целесообразно осуществлять, используя решения уравнений диффузии для стационарных условий. Это позволило разработать методические принципы динамического метода расчета количества воздуха, необходимого для проветривания подготовительных и очистных участков как метано-, так углекислотообильных шахт.

Расчет количества воздуха, необходимого для проветривания подготовительных выработок и очистных забоев в периоды экстренного газовыделения в углекислотообильных шахтах, рекомендуется осуществлять по следующим уравнениям:

$$\frac{Q_{\text{з.п}}c_0+Ic_1}{Q_{\text{з.п}}+I+K_{\text{п}}S_{\text{п.в}}L_{\text{п.в}}}+\left(c_0-\frac{Q_{\text{з.п}}c_0+Ic_1}{Q_{\text{з.п}}+I+K_{\text{п}}S_{\text{п.в}}L_{\text{п.в}}}\right)\times$$

$$\times\exp\left[-\frac{(\beta+K_{\text{п}})S_{\text{п.в}}}{Q_{\text{з.п}}}\int_0^{L_{\text{п.в}}}\eta(x)dx\right]=\text{ПДК};\qquad(14)$$

$$\frac{Q_{\text{к}}^{\text{э}}c_0+Ic_1}{Q_{\text{к}}^{\text{э}}+I+K_{\text{п}}S(l_{\text{в.п}}+l_{\text{оч}})}+\left[c_0-\frac{Q_{\text{к}}^{\text{э}}c_0+Ic_1}{Q_{\text{к}}^{\text{э}}+I+K_{\text{п}}S(l_{\text{в.п}}+l_{\text{оч}})}\right]\times$$

$$\times\exp\left[-\frac{(\beta+K_{\text{п}})S}{Q_{\text{к}}^{\text{э}}}(l_{\text{в.п}}+l_{\text{оч}})\right]=\text{ПДК},\qquad(15)$$

где $Q_{\text{з.п}}$, I – количество воздуха, подаваемого в забой, и дебит «мертвого» воздуха; c_0, c_1 – концентрация кислорода в атмосфере и «мертвом» воздухе соответственно; $S_{\text{п.в}}$, $L_{\text{п.в}}$ – площадь поперечного сечения и длина подготовительной выработки; η, $K_{\text{п}}$ – коэффициент доставки воздуха и константа скорости поглощения кислорода внешними поверхностями угольного пласта; $\beta=\alpha+I/\Omega$; $Q_{\text{к}}^{\text{э}}$, $l_{\text{в.п}}$ – количество воздуха для проветривания очистного забоя по кислородному фактору в периоды экстренного газовыделения и длина воздухоподающей выработки соответственно; $\alpha=Q/\Omega$.

Установленные закономерности позволили разработать комплекс программных средств для практической реализации динамического метода расчета количества воздуха, необходимого для проветривания подготовительных и очистных участков углекислотообильных шахт в периоды экстренного газовыделения.

Аналогично получены методические положения расчета количества воздуха, необходимого для проветривания подготовительной выработки метанообильной шахты. Формула для расчета

DOI: *10.18454/PMI.2017.1.99*

подачи ВМП в подготовительную выработку с учетом конвективного переноса метана имеет следующий вид:

$$Q_{\text{ВМП}} = I_{\text{п.в}}\left[1-\exp\left(-\lambda_1 \ln\lambda_2\right)\right]\times$$

$$\times\left\{\left(1+aL_{\text{п.в}}\right)\left[\text{ПДК}-c_{\text{п.з}}\exp\left(-\lambda_1\ln\lambda_2\right)\right]-c_0\left[1-\exp\left(-\lambda_1\ln\lambda_2\right)\right]\right\}^{-1}, \qquad (16)$$

где c_0, $c_{\text{п.з}}$ – концентрация метана в свежей струе воздуха и призабойном пространстве соответственно; $\lambda_1 = \left(1+aL_{\text{п.в}}\right)/L_{\text{п.в}}$; $\lambda_2 = \left(1-aL_{\text{тр}}\right)^{-1}$; a, $L_{\text{тр}}$ – коэффициент утечек и длина вентиляционного трубопровода.

Сравнение результатов расчета по предлагаемой методике и по действующему руководству по проектированию вентиляции угольных шахт [15] показывает, что учет процессов диффузионного переноса газа позволяет уменьшить расчетное количество воздуха для подготовительных выработок и очистных участков на 30-40 %. Следовательно, динамический метод расчета воздуха для проветривания очистных и подготовительных участков по формулам (14)-(16), во-первых, повышает адекватность моделей воздухообмена в горных выработках и, во-вторых, позволяет существенно снизить затраты на вентиляцию основных технологических объектов шахты.

Уточненные закономерности дегазации отбитого угля и аэрогазодинамических процессов на очистных участках позволили разработать математическую модель оптимизации режимных параметров выемочных машин. Целевая функция, характеризующая энергоемкость процесса разрушения угля резанием, позволяет определить оптимальное сочетание скорости резания угля и скорости подачи очистного комбайна с учетом ограничений по глубине резания, фактору взаимовлияния резцов, установленной мощности электродвигателя и газовому фактору. Для натурных наблюдений использованы технические средства определения начальной скорости газовыделения и оценки природной газоносности угля.

Математические модели аэрологических последствий добычи угля подземным способом. Экологическая модель геотехнологических периодов отработки запасов угля подземным способом показывает, что аэрогазодинамические процессы и вызванные ими тепловые процессы должны быть объектами мониторинга и после закрытия шахт (рис.4), поскольку продолжается отрицательное воздействие породных отвалов и выработанных пространств на атмосферу, водные ресурсы и почву.

Уточнение закономерностей процесса газообмена выработанных пространств метанообильных шахт с земной поверхностью необходимо для обеспечения экологической безопасности подработанных территорий. Фильтрация метана на земную поверхность из подработанных горных пород происходит вследствие избыточного давления метана, находящегося в угленосной толще.



Рис.4. Экологическая модель геотехнологических периодов отработки запасов подземным способом

DOI: 10.18454/PMI.2017.1.99

Метановыделение на земную поверхность из подработанных пород после завершения выемки угля

$$I_{\Sigma}^{(\text{м})}\left(\text{Fo}_f\right)=\frac{0{,}282\langle k\rangle F_{\text{з.п}}}{\mu p_{\text{a}} H_0}\sqrt{\text{Fo}_f}\left\{p_{\text{a}}^2\left[1-\exp\left(-0{,}25\text{Fo}_f\right)\right]+\right.$$
$$+2p_{\text{a}}K_1\left[1+0{,}564\sqrt{\text{Fo}_f}\exp\left(-0{,}25\text{Fo}_f\right)-\text{erf}\left(0{,}5\sqrt{\text{Fo}_f}\right)\right]+$$
$$\left.+2{,}26K_{\text{p}}^2 H_0\text{Fo}_f^{-0{,}5}\left(1+0{,}25\text{Fo}_f\right)\exp\left(-0{,}25\text{Fo}_f\right)\right\}, \qquad (17)$$

где $\langle k\rangle$ – среднее значение газовой проницаемости подработанных пород; $F_{\text{з.п}}$ – площадь подработанной земной поверхности; H_0 – мощность зоны газового выветривания; Fo_f – фильтрационный критерий Фурье; K_1 – коэффициент, учитывающий нарастание давления газа с глубиной.

Зависимость (17) показывает, что метановыделение на земной поверхности из подработанной угленосной толщи представляет собой функцию фильтрационного критерия Фурье. В результате вычислительных экспериментов установлено, что функция (17) стремится к асимптотическому значению:

$$I_{\infty}^{(\text{м})}=\frac{0{,}637\langle k\rangle F_{\text{з.п}}K_1^2}{\mu p_{\text{a}}}. \qquad (18)$$

В соответствии с формулой (18) скорость метановыделения с площади подработанной земной поверхности весьма длительный период времени будет величиной постоянной. Фильтрация «мертвого» воздуха в подработанных горных породах происходит при падении атмосферного давления. Математическая модель этого процесса представлена следующей формулой:

$$I_{\text{уд}}^{\text{ф}}=\frac{2\langle k\rangle}{\mu_{\text{м.в}}H}\left(p_{\text{м.в}}^{(\text{н})}+\alpha_P t\right), \qquad (19)$$

где $\mu_{\text{м.в}}$ – динамическая вязкость «мертвого» воздуха; $p_{\text{м.в}}^{(\text{н})}$ – давление, установившееся в выработанном пространстве в период стабильного состояния атмосферного давления; α_P, H – скорость падения атмосферного давления и мощность толщи подработанных горных пород.

Следует отметить, что структура формулы (19) и результаты вычислительного эксперимента хорошо совпадают с качественной картиной газовыделения из выработанных пространств. Экспериментально доказано, что скорость газовыделения, обусловленная падением атмосферного давления, пропорциональна скорости падения атмосферного давления.

Важным следствием аэрогазодинамических процессов на поверхности шахт являются тепловые процессы самонагревания угольных скоплений. Результаты математического моделирования диффузии кислорода в угольном скоплении позволили обосновать следующую закономерность самонагревания угольного скопления на поверхности породного отвала:

$$\frac{T(x,t)-T_0}{T_{\text{c}}-T_0}=\text{erfc}\frac{x}{2\sqrt{at}}-\frac{w_0}{\lambda k_*^2\left(T_{\text{c}}-T_0\right)}\left[\text{erfc}\frac{x}{2\sqrt{at}}-\exp\left(-k_* x\right)-\frac{1}{2}\exp\left(k_*^2 at-k_* x\right)\times\right.$$
$$\left.\times\,\text{erfc}\left(k\sqrt{at}-\frac{x}{2\sqrt{at}}\right)+\frac{1}{2}\exp\left(k^2 at+kx\right)\text{erfc}\left(k\sqrt{at}+\frac{x}{2\sqrt{at}}\right)\right], \qquad (20)$$

где $T(x,t)$, T_0 и T_{c} – температурное поле в угольном скоплении, начальная температура и температура на внешней поверхности соответственно; a, λ – температуропроводность и теплопроводность угольного скопления; w_0, k_* – мощность источника самонагревания и коэффициент пространственной релаксации концентрации кислорода.

Результаты вычислительных экспериментов с использованием зависимости (20) показывают, что продольный профиль температуры угольного скопления имеет точку экстремума, являющуюся максимальной температурой угля в данный момент времени. Эта точка перемещается вглубь угольного скопления, а максимальная температура угля растет. Таким образом, проводя

вычислительные эксперименты в процессе экологического мониторинга, можно прогнозировать теплофизические процессы в породных отвалах по фактору возникновения эндогенных пожаров.

При этом именно геотехнологические подходы к решению экологических проблем горнопромышленных регионов являются наиболее эффективными. Например, для Подмосковного бассейна весьма перспективны новые технологии Тульского государственного университета, предусматривающие эффективные схемы подземной газификации оставшихся запасов угля (ПГУ). Энергетический газ ПГУ используется на локальных электростанциях, которые обеспечивают электроэнергией предприятия по переработке техногенных месторождений. Эти геотехнологии позволят реализовать комплексное освоение оставшихся запасов угля и техногенных месторождений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аппроксимация аэродинамических характеристик проходческих вентиляторов для автоматизации вентиляционных расчетов / Н.М.Качурин, С.А.Воробьев, А.Д.Левин, П.В.Васильев // Горный журнал. 2015. № 12. С. 76-79.

2. *Воробьев С.А.* Аэрогазодинамические процессы при подземной разработке полезных ископаемых / С.А.Воробьев, А.Ю.Ермаков, Д.Н.Шкуратский. Тула: Изд-во ТулГУ. 2016. 248 с.

3. *Воробьев С.А.* Зарубежный опыт исследования проблем комплексного освоения угольных месторождений подземным способом / С.А.Воробьев, Н.М.Качурин // Горный журнал. 2016. № 5. С. 78-85.

4. Границы применимости линеаризованных уравнений фильтрации газов и прогноз динамики газовыделения из выработанного пространства / Н.М.Качурин, С.А.Воробьев, О.А.Афанасьев, Д.Н.Шкуратский // Известия ТулГУ. Сер. «Технические науки». 2014. Вып. 1. С. 165-172.

5. *Качурин Н.М.* Методика прогнозирования экологических последствий подземной добычи угля в России / Н.М.Качурин, В.И.Ефимов, С.А.Воробьев // Горный журнал. 2014. № 9. С. 138-142.

6. *Качурин Н.М.* Оценка геоэкологических последствий подземной добычи полезных ископаемых / Н.М.Качурин, С.А.Воробьев, В.В.Факторович // Proceedings of the VI International Geomechanics Conference 24-28 June 2014. Varna, Bulgaria. P. 323-331.

7. *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.

8. *Качурин Н.М.* Теоретические положения и прогнозы воздействия на окружающую среду подземной добычи полезных ископаемых / Н.М.Качурин, С.А.Воробьев, В.В.Факторович // Известия ТулГУ. Сер. «Науки о Земле». 2013. Вып. 3. С. 3-18.

9. Математические модели метановыделения в подготовительные и очистные забои из отбитого угля / Н.М.Качурин, С.А.Воробьев, А.Н.Качурин, И.В.Сарычева // Известия ТулГУ. Сер. «Технические науки». 2014. Вып. 1. С. 158-165.

10. Математическое моделирование предельно допустимых пылегазовых выбросов горных предприятий в атмосферу / Н.М.Качурин, В.И.Ефимов, С.А.Воробьев, Л.Л.Рыбак // Известия ТулГУ. Сер. «Науки о Земле». 2014. Вып. 4. С. 10-16.

11. Оценка предельно допустимых пылегазовых выбросов горных предприятий в атмосферу / Н.М.Качурин, Л.Л.Рыбак, В.И.Ефимов, С.А.Воробьев // Безопасность труда в промышленности. 2015. № 3. С. 36-39.

12. Породные отвалы ликвидированных шахт Подмосковного бассейна как источник выбросов пыли в атмосферу / Н.М.Качурин, Н.Д.Левкин, С.А.Воробьев, Я.В.Чистяков // Экология и промышленность России. 2016. № 5. С. 44-48.

13. Прогноз газовых ситуаций в угольных шахтах в периоды падения атмосферного давления / Н.М.Качурин, С.А.Воробьев, О.А.Афанасьев, Д.Н.Шкуратский // Известия ТулГУ. Сер. «Технические науки». 2014. Вып. 1. С. 152-158.

14. 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.

15. Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт. М.: Недра, 1975. 237 с.

16. Экологические последствия закрытия угольных шахт Кузбасса по газодинамическому фактору и опасности эндогенных пожаров на отвалах / Н.М.Качурин, С.А.Воробьев, Я.В.Чистяков, Л.Л.Рыбак // Экология и промышленность России. 2015. № 4. С. 54-58.

17. *Kachurin N.M.* Evaluating polluting atmosphere by mining enterprises and optimizing prophylactic measures resources / N.M.Kachurin, S.A.Vorobev, S.M.Bogdanov // 5th International symposium «Mining and environmental protection» 10-13 June 2015. Vrdnik, Serbia. P. 135-140.

18. *Kachurin N.M.* Generalized mathematical model for gases filtration in coal beds and enclosing strata / N.M.Kachurin, S.A.Vorob'ev, P.V. Vasil'ev // Eurasian Mining. 2015. N 2. P. 33-44.

***Авторы*: М.В.Грязев**, *д-р техн. наук*, *профессор*, *ректор*, *ecology_tsu_tula@mail.ru* (*Тульский государственный университет*, *Тула*, *Россия*), **Н.М.Качурин**, *д-р техн. наук*, *профессор*, *ecology@tsu.tula.ru* (*Тульский государственный университет*, *Тула*, *Россия*), **С.А.Воробьев**, *канд. техн. наук*, *доцент*, *ecology@tsu.tula.ru* (*Тульский государственный университет*, *Тула*, *Россия*).

Статья принята к публикации 11.11.2016.