

БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Издается с января 2001 г.

12(144)
2012

Редакционный совет:

АКИМОВ В. А.
БАЛЫХИН Г. А.
БЕЛОВ С. В.
ГРИГОРЬЕВ С. Н.
ЗАЛИХАНОВ М. Ч.
(председатель)
КОТЕЛЬНИКОВ В. С.
ПАВЛИХИН Г. П.
СОКОЛОВ Э. М.
СОРОКИН Ю. Г.
ТЕТЕРИН И. М.
ТИШКОВ К. Н.
УШАКОВ И. Б.
ФЕДОРОВ М. П.
ЧЕРЕШНЕВ В. А.
АНТОНОВ Б. И.
(директор издательства)

Главный редактор
РУСАК О. Н.

Зам. главного редактора
ПОЧТАРЕВА А. В.

Ответственный секретарь
ПРОНИН И. С.

Редакционная коллегия:

БЕЛИНСКИЙ С. О.
ИВАНОВ Н. И.
КАЛЕДИНА Н. О.
КАЧАНОВ С. А.
КАЧУРИН Н. М.
КЛЕЙМЕНОВ А. В.
КРАСНОГОРСКАЯ Н. Н.
КСЕНОФОНТОВ Б. С.
КУКУШКИН Ю. А.
МАЛАЯН К. Р.
МАСТРЮКОВ Б. С.
МИНЬКО В. М.
МИРМОВИЧ Э. Г.
ПАНАРИН В. М.
ПОЛАНДОВ Ю. Х.
ТОПОЛЬСКИЙ Н. Г.
ФРИДЛАНД С. В.
ХАБАРОВА Е. И.
ШВАРЦБУРГ Л. Э.

СОДЕРЖАНИЕ

Соколов Э. М., Качурин Н. М. Техносферная безопасность — важное направление деятельности Тульского регионального отделения Академии горных наук. 2

ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Соколов Э. М., Качурин Н. М., Стась Г. В., Карначев И. П. Прогноз безопасности горных работ на угольных шахтах 3

Качурин Н. М., Каледина Н. О., Качурин А. Н. Выделения метана с поверхности обнажения угольного пласта при высокой скорости подвигания подготовительного забоя 8

Качурин Н. М., Борщевич А. М., Белая Л. А., Бухтияров А. А. Метановыделение в очистной забой из вмещающих пород 11

Соколов Э. М., Качурин Н. М., Агеев И. И. Методические аспекты прогноза выделений углекислого газа в угольных шахтах 14

Качурин Н. М., Поздеев А. А., Стась Г. В. Выделения радона в атмосферу угольных шахт 20

Дударь Е. С., Качурин Н. М., Власов Д. В. Исследование процессов тепломассопереноса в калийных рудниках и конденсации влаги в шахтной вентиляционной сети 24

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Качурин Н. М., Комиссаров М. С., Королева О. С. Прогноз загрязнения приземного слоя атмосферы горнодобывающими предприятиями 28

Потапенко В. А. Экологические последствия ликвидации угольных шахт в Тульской области 34

Качурин Н. М., Комиссаров М. С., Дианов Ю. Ю. Экологическая логистика транспортирования полезных ископаемых при открытом способе добычи 38

Соколов Э. М., Свиридова Т. С. Миграция радионуклидов в почвах при радиоактивном загрязнении горнопромышленного региона 41

Левкин Н. Д., Комиссаров М. С., Мухина Н. Е. Сорбционная очистка сточных вод гальванического производства 45

Левкин Н. Д., Комиссаров М. С., Рыбак В. Л. Защита территорий от загрязнения стоками полигонов твердых бытовых отходов 48

ОБРАЗОВАНИЕ

Шайденко Н. А., Жаркова Н. А. Дидактический анализ учебно-методических комплексов и коррекция профессиональной компетенции преподавателя инженерных специальностей высшей школы 51

Приложение: Иванов Н. И., Куклин Д. А., Матвеев П. В., Бугорина М. В. Снижение шума железнодорожного транспорта

Журнал входит в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук, и включен в систему Российского индекса научного цитирования.

Э. М. Соколов, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой аэрологии, охраны труда и окружающей среды, Н. М. Качурин, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой геотехнологий и строительства подземных сооружений, М. М. Щеголевский, д-р техн. наук, Тульский государственный университет
E-mail: ecology@tsu.tula.ru

Техносферная безопасность — важное направление деятельности Тульского регионального отделения Академии горных наук

Кратко охарактеризованы направления деятельности Тульского регионального отделения Академии горных наук в области техносферной безопасности.

Ключевые слова: Тульское региональное отделение Академии горных наук, направления деятельности

Sokolov E. M., Kachurin N. M. Technosphere safety — important direction of work in Tula regional department of the Academy of mining sciences solves during

The basic directions have been presented as well as some of the results of the scientific research and development work carried out in Tula Regional Department of Mine Sciences both independently and in cooperation with some enterprises in the field of mining machine-building.

Keywords: Tula Regional Department of the Academy of Mining Sciences, directions of work

Тульское региональное отделение Академии горных наук (АГН) было организовано в 1996 г. в условиях, когда сокращались объемы горного производства, свертывались научные и проектно-конструкторские разработки.

С самого начала были определены основные направления деятельности отделения АГН, расставлены приоритеты. Вокруг академии объединились ведущие специалисты горного производства, образовательные структуры, научные лаборатории.

Сегодня в академии успешно работает восемь секций, курирующих работу по направлениям, осуществляющих процесс внедрения собственных разработок в производство, участвующих в деловой жизни Тулы, Тульской области и страны в целом. Эта работа оказалась особенно востребованной сейчас, когда действует долгосрочная программа развития угольной промышленности России, нацеленная на реализацию потенциальных конкурентных преимуществ российских угольных компаний и переход к инновационному социально ориентированному типу экономического развития страны. Планируется увеличение

производительности труда в 5 раз к 2030 г. Прогнозный диапазон рациональных объемов добычи угля в 2030 г. должен составить 380...430 млн т. При этом предполагается обеспечить высокий уровень промышленной безопасности в угольной отрасли. Между тем общеизвестно, что увеличение объемов добычи угля чревато увеличением вероятности возникновения аварий. Следовательно, основные технические направления модернизации в угольном производстве в перспективе должны разрабатываться с учетом ужесточения нормативных требований к производственным процессам, тем более, что и сейчас положение с аварийностью и травматизмом в угольной промышленности далеко не идеально. Не менее важной проблемой является пока еще значительное загрязнение окружающей среды горными предприятиями, рациональное использование недр (указанные направления и составляют понятие "Техносферная безопасность"). Именно в этих направлениях ведутся комплексные работы секции "Безопасность горных работ, экология и рациональное природопользование". Отдельные разработки, выполненные в рамках деятельности секции, представлены в настоящем номере.

Сегодня Тульское региональное отделение АГН — это развивающаяся профессиональная, научно-техническая организация. Она объединяет ведущих ученых и специалистов в областях: геологии; техники и технологии добычи и переработки твердых, жидких и газообразных полезных ископаемых; подъемно-транспортных и строительных и дорожных машин; безопасности жизнедеятельности, геоэкологии, горного права, экономики и организации управления, работающих или проживающих в Центральном регионе России.

Тульское региональное отделение АГН всегда готово к сотрудничеству с различными организациями и предприятиями с любой формой собственности и радо помочь в решении научно-исследовательских задач, опытно-конструкторских работ, производственных проблем и совместно с заказчиком найти приемлемый для него вариант.

УДК 622.8:005.521

Э. М. Соколов¹, д-р техн. наук, проф., Н. М. Качурин¹, д-р техн. наук, проф.,
Г. В. Стась¹, канд. техн. наук, доц., И. П. Карначев², канд. техн. наук, доц.

¹ Тульский государственный университет

² Научно-исследовательская лаборатория Северо-западного научного центра гигиены и общественного здоровья Роспотребнадзора, г. Киров, Мурманская область
E-mail: ecology@tsu.tula.ru

Прогноз безопасности горных работ на угольных шахтах

По данным многолетней статистики аварийности на угольных шахтах определены основные виды крупных аварий: эндогенные и экзогенные пожары, загазирование горных выработок, обрушение пород кровли, прорывы подземных вод в горные выработки. Показано, что на метанообильных шахтах особую опасность представляют взрывы метана и угольной пыли, а также внезапные выбросы угля и газа. Разработана математическая модель, позволяющая в качестве цели управления использовать максимум вероятности безаварийной работы шахты.

Ключевые слова: авария, отказ, пожар, загазирование, взрыв, метан, угольная пыль, выброс, математическая модель

Sokolov E. M., Kachurin N. M., Stas G. V., Karnachov I. P. Forecasting safety of mining activity at coal mines

Mining accident rate statistics of many years' shows that basic types of very dangerous accidents are exogenous and endogenous fires, rock failures and water intrusions into underground workings. Explosions of methane and coal dust, blows of coal and gas are large dangerous at methane abundant coal mines. Mathematical model, which allowing using maximum probability of accident-free activity as management goal, was created.

Keywords: accident, failure, fire, gassed, gas contamination, explosion, methane, coal dust, blow, mathematical model

Об общем состоянии производственной безопасности правомерно судить по наиболее опасным отраслям промышленности, к числу которых в первую очередь следует отнести горнодобывающую. Рост количества опасностей, обусловленных промышленной деятельностью, крупные аварии с многочисленными человеческими жертвами, серь-

езным материальным и экологическим ущербом, другими негативными последствиями определяют необходимость прогнозирования и регулирования технологической безопасности.

Технологический процесс добычи угля (ТПДУ) подземным способом сопровождается возникновением состояний, которые принято называть авариями. Аварийные состояния реализуются как случайные события, определенным образом распределенные во времени. Работоспособность ТПДУ, с точки зрения безопасности, можно характеризовать величиной риска, под которым понимается вероятность человеческих и материальных потерь или повреждений при аварийных состояниях ТПДУ. Риск связан с бесконтрольным проявлением энергомассообмена и изменением газового состава воздуха в горных выработках. Обычно одни горные выработки шахты представляют большую опасность, чем другие, поэтому целесообразно все предприятие разбить на подсистемы для того, чтобы выявить объекты или его компоненты, которые являются вероятным источником аварийных состояний ТПДУ.

Главной целью при изучении опасностей, свойственных той или иной подсистеме, является определение причинных взаимосвязей между исходными аварийными событиями, относящимися к оборудованию, персоналу, горному массиву, шахтному воздуху и приводящими к аварийным состояниям ТПДУ. При таком подходе целесообразно рассматривать ТПДУ как совместное и взаимозависимое функционирование двух подсистем — технологической и системы обеспечения жизнедеятельности, включающей совокупность вспомогательных технологических процессов, позволяющих эксплуатировать основную технологическую подсистему на заданном уровне безопасности.

Многолетняя статистика аварийности на угольных шахтах свидетельствует, что основными видами крупных аварий являются эндогенные и экзогенные пожары, загазирование горных выработок,



Таблица 1

Статистические показатели аварийности угольной промышленности России стран СНГ до распада СССР

Вид аварии	Статистические показатели аварийности			
	λ^* , 1/год	D^* , 1/год ²	σ^* , 1/год	τ^* , сут
Внезапные выбросы угля и газа	45,2	823,8	28,7	8,1
Внезапные выбросы породы и газа	20,6	477,1	21,8	17,7
Горные удары	5,7	28,5	5,3	64,0
Взрывы пыли	1,4	2,9	1,7	260,7
Взрывы метана	6,1	6,0	2,4	59,8
Обрушения и завалы горных выработок	8038,9	$8,5 \cdot 10^7$	9220,0	0,04
Прорывы подземных вод и пульпы	123,6	$1,9 \cdot 10^4$	137,8	2,9
Эндогенные пожары	94,3	167,0	12,9	3,9
Экзогенные пожары	56,0	465,8	21,6	6,5

Примечание. Расшифровка обозначений: λ^* — статистическая оценка интенсивности аварий в шахтах; τ^* , D^* , σ^* — статистическая оценка средней длительности безаварийной работы шахты, дисперсия и среднее квадратическое отклонение, соответственно; * — звездочка означает среднее значение по территории бывшего СССР.

обрушение пород кровли, прорывы подземных вод в горные выработки.

Проведенный анализ аварийности на предприятиях угольной промышленности России, а также изучение механизмов развития различных видов аварийных процессов позволили установить многофакторную связь аварийности с горно-геологическими, технологическими, физико-химическими, социально-экономическими параметрами.

Установлено, что в качестве показателя аварийности может быть использована функция распределения количества аварий, а уровень безопасности определяется вероятностью случайного события, за-

ключающегося в том, что продолжительность функционирования технологического объекта без аварий меньше некоторого заранее заданного периода времени [1]. В качестве вспомогательных показателей уровня безопасности шахт рассматривают дисперсию и среднее квадратическое отклонение времени безаварийной работы.

Наряду с функциями распределения аварий и безопасности для характеристики состояния аварийности предлагается использовать количественную характеристику интенсивности возникновения аварий, которая рассматривается как условная плотность вероятности возникновения аварии того или иного вида в момент t (при условии, что до этого времени аварии не возникали) [2]. В практическом использовании величина интенсивности аварий определяется как число аварий, происходящих в год на одну шахту.

Статистические показатели аварийности угольной промышленности России и стран СНГ до распада СССР приведены в табл. 1 [1]. Детальные исследования аварийности при подземной добыче угля были проведены для шахт Подмосковского угольного бассейна. Статистические оценки, характеризующие интенсивность возникновения аварий в шахтах Подмосковского угольного бассейна, приведены в табл. 2.

Наибольший интерес представляют законы распределения интенсивности аварий, проверка адекватности которых исходным данным осуществлялась по критерию согласия Колмогорова-Смирнова при уровне значимости от 1 до 5 %.

Результаты сравнения эмпирических и теоретических распределений интенсивности аварий представлены на рисунке. Выполненный анализ аварийности в шахтах Подмосковского бассейна позволил установить, что интенсивность возникновения аварий меняется во времени. В связи с этим выявлены тренды интенсивности аварий раз-

Таблица 2

Статистические оценки интенсивности аварий в шахтах Подмосковского бассейна

Статистические характеристики	Вид аварии					
	Эндогенные пожары	Экзогенные пожары	Обрушения горных выработок	Загазирование горных выработок	Прорывы воды в горные выработки	Общая аварийность
Математическое ожидание	0,083	0,066	0,038	0,032	0,009	0,217
Максимальное значение	0,236	0,276	0,127	0,34	0,069	0,506
Минимальное значение	0,021	0	0	0	0	0,089
Год, соответствующий максимуму	1971	1992	1976	1991	1992	1971
Год, соответствующий минимуму	1982	1988	1994	1994	1994	1983
Медиана	0,0755	0,056	0,03	0,016	0	0,187
Дисперсия	0,003	0,004	0,001	0,005	0,0003	0,012
Критерий Колмогорова-Смирнова	0,109	0,163	0,132	—	0,346	0,117

Таблица 3

Модели временных трендов интенсивности аварий, зафиксированных в период функционирования шахт Подмосковского бассейна

Вид аварии	Модель тренда	Коэффициент корреляции
Эндогенные пожары	$\lambda(t) = 12,164 - 0,0061t$	0,788
	$\lambda(t) = 1834,94 - 1,845t + 0,00046t^2$	0,871
	$\lambda(t) = 0,045 + \exp(415,67 - 0,212t)$	0,893
	$\lambda(t) = 0,439(t - 1969)^{-0,729}$	0,904
	$\lambda(t) = 0,188 - 0,049\ln(t - 1971)$	0,903
Экзогенные пожары	$\lambda(t) = -3,24 + 0,0017t$	0,182
	$\lambda(t) = 3383,31 - 3,415t - 0,00086t^2$	0,608
	$\lambda(t) = -9,698 + \exp(1,94 + 0,00017t)$	0,182
	$\lambda(t) = -24,91 + 3,29\ln(t + 0,0077)$	0,180
Обрушения горных выработок	$\lambda(t) = 5,81 - 0,0029t$	0,65
	$\lambda(t) = -376,91 + 0,383t - 0,000097t^2$	0,669
	$\lambda(t) = -4,285 + \exp(2,8 - 0,00067t)$	0,654
	$\lambda(t) = 1\,479\,221(t - 1913)^{-4,146}$	0,598
	$\lambda(t) = 43,82 - 5,77\ln(t + 0,0046)$	0,655
Загазирование горных выработок	$\lambda(t) = -5,035 + 0,0026t$	0,265
	$\lambda(t) = 900,61 - 0,911t + 0,00023t^2$	0,303
	$\lambda(t) = -9,957 + \exp(1,747 + 0,00026t)$	0,265
	$\lambda(t) = -38,41 + 5,063\ln(t + 0,0096)$	0,265
Прорывы воды в горные выработки	$\lambda(t) = -0,092 + 0,000051t$	0,023
	$\lambda(t) = 223,19 - 0,225t + 0,000057t^2$	0,156
	$\lambda(t) = -9,957 + \exp(2,29 + 0,000005t)$	0,022
	$\lambda(t) = -0,755 + 0,101\ln(t + 0,0099)$	0,022
Общая аварийность	$\lambda(t) = 14,018 - 0,007t$	0,456
	$\lambda(t) = 5314,41 - 5,35t + 0,00135t^2$	0,707
	$\lambda(t) = -9,964 + \exp(3,684 - 0,00069t)$	0,457
	$\lambda(t) = 404192,1(t - 1908)^{-3,367}$	0,545
	$\lambda(t) = 0,33 - 0,056\ln(t - 1971)$	0,71

личного вида. Тренд следует рассматривать как систематическую составляющую временного ряда, на которую накладываются компоненты, характеризующие воздействие случайных факторов. При выделении трендов использовался метод наименьших квадратов. Теснота связи оценивалась по величине коэффициента корреляции. Результаты исследований приведены в табл. 3.

Выбор тренда, наиболее удачно аппроксимирующего фактические данные, осуществлялся ис-

ходя из условия: $R_{opt_i} = \max\{R_j\}$, $j = 1, \dots, 24$, где R_{opt_i} — коэффициент корреляции для наиболее достоверной модели тренда; R_j — выборочные коэффициенты корреляции для j -го тренда, описывающего динамику интенсивности аварий i -го вида.

Данные табл. 3 позволяют сделать вывод, что наилучшее совпадение для динамики интенсивности экзогенных пожаров, обрушений кровли, загазирования, прорывов воды в горные выработки можно получить, используя полиномиальный тренд вида $\lambda(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2$, для эндогенных пожаров — степенной тренд вида $\lambda(t) = a_1(a_2 + t)^{a_3}$, для описания общей аварийности предпочтительнее логарифмическая зависимость $\lambda(t) = a_0 + a_1\ln(t + a_2)$, где a_0, a_1, a_2, a_3 — параметры моделей временных трендов, определяемые методом наименьших квадратов. Рассмотренные модели трендов предлагается использовать для осуществления ориентировочной прогнозной оценки вероятности возникновения аварий в шахтах, основанной на неоднородном пуассоновском распределении потоков отказов [3]:

$$P_i(t) = 1 - \exp\left(-\int_t^{t+\Delta t} \lambda_i(\tau) d\tau\right), \quad (1)$$

где $P_i(t)$, $\lambda_i(\tau)$ — вероятность и интенсивность возникновения аварий i -го вида соответственно.

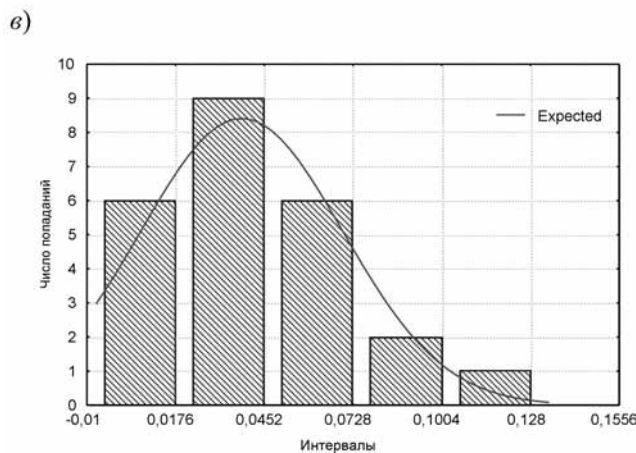
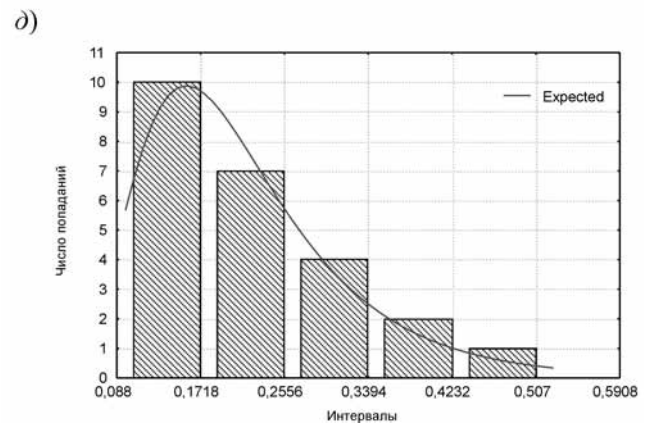
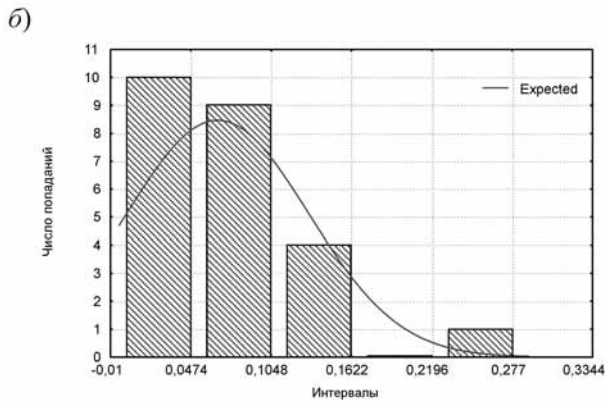
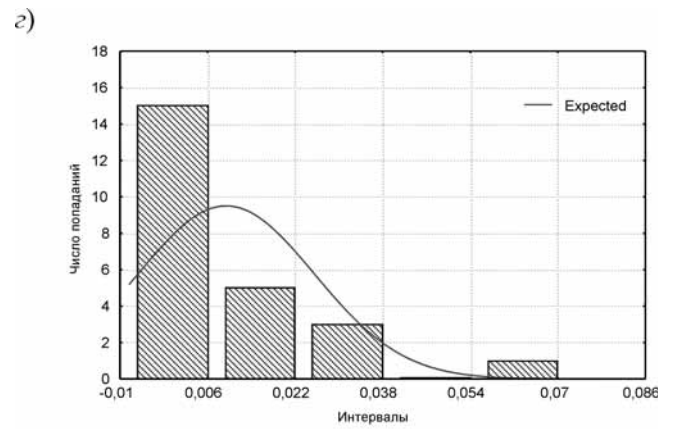
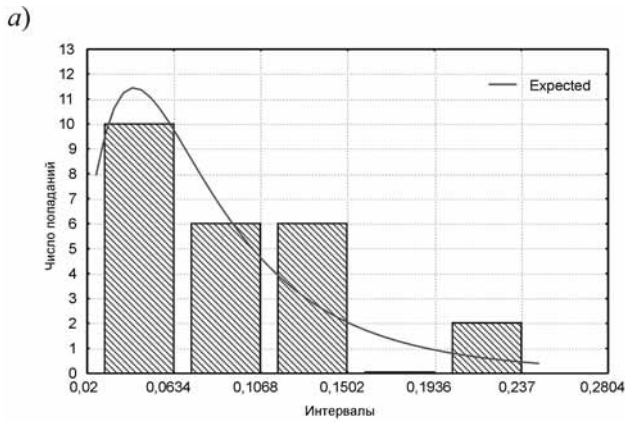
Достоинством данного метода прогноза является простота его практической реализации, а также возможность использования при отсутствии информации о технико-экономических показателях работы шахты.

Более точным является прогноз, основывающийся на представлении прогнозного среднего значения интенсивности аварий в виде многомерной модели, учитывающей совокупность технико-экономических показателей работы шахт, влияющих на аварийность [4], в качестве которых выбраны: $L_{уд.пр}$ — протяженность проводимых подготовительных горных выработок в расчете на 1000 т добытого угля, м; $L_{год.пр}$ — годовая проходка подготовительных горных выработок, м; $C_{себ}$ — себестоимость добываемого угля, руб/т; $P_{тр}$ — средняя производительность труда, т/чел; $A_{год}$ — годовая до-

Таблица 4

Оценка надежности технологии защиты от взрывов МВС на угольных шахтах России

Оценка интенсивности отказов системы защиты, 1/год				Оценка длительности работы угольной промышленности, сутки			
от взрывов МВС		от поражающих факторов		без взрывов МВС		без гибели людей	
1985—1991	1992—2007	1985—1991	1992—2007	1985—1991	1992—2007	1985—1991	1992—2007
9,43	9,38	7,14	34,44	31,2	31,2	40,8	8,4



Гистограммы и кривые теоретического закона распределения интенсивности эндогенных пожаров (а); экзогенных пожаров (б); обрушения горных выработок (в); прорывов воды (з) и общая аварийность (д) на шахтах Подмосковского бассейна

быча по производственному объединению (ПО), т; $N_{\text{ш}}$ — количество действующих шахт в ПО; $A_{\text{сут}}$ — среднесуточная добыча по ПО.

Получены следующие зависимости для расчета прогнозного значения интенсивности различных видов аварий $\langle \lambda_i \rangle$ (1/год):

— эндогенные пожары

$$\langle \lambda_1 \rangle = 1,201 \cdot 10^{-5} L_{\text{год.пр}} + 1,915 \cdot 10^{-4} C_{\text{себ}} - 3,481 \cdot 10^{-3} P_{\text{тр}} + 7,783 \cdot 10^{-6} A_{\text{год}} + 2,487 \cdot 10^{-3} N_{\text{ш}} - 3,393 \cdot 10^{-5} A_{\text{сут}} - 0,0379; \quad (2)$$

— общая аварийность

$$\langle \lambda_6 \rangle = 1,626 \langle \lambda_1 \rangle - 9,163 \cdot 10^{-5} A_{\text{год}} + 2,487 \cdot 10^{-4} A_{\text{сут}} - 2,229 \cdot 10^{-3} C_{\text{себ}} - 1,137 \cdot 10^{-5} L_{\text{год.пр}} + 4,988 \cdot 10^{-3} N_{\text{ш}} - 3,413 \cdot 10^{-3} P_{\text{тр}} + 1,023; \quad (3)$$

— загазирование горных выработок

$$\langle \lambda_4 \rangle = 0,3098 \langle \lambda_6 \rangle - 0,726 \langle \lambda_1 \rangle + 5,915 \cdot 10^{-5} A_{\text{год}} - 4,926 \cdot 10^{-5} A_{\text{сут}} + 3,181 \cdot 10^{-4} C_{\text{себ}} + 1,156 \cdot 10^{-5} L_{\text{год.пр}} + 1,098 \cdot 10^{-3} N_{\text{ш}} - 2,201 \cdot 10^{-4} P_{\text{тр}}(t_i) - 0,164; \quad (4)$$

— экзогенные пожары

$$\langle \lambda_2 \rangle = 0,7342 \langle \lambda_6 \rangle - 0,7207 \langle \lambda_4 \rangle - 1,2988 \langle \lambda_1 \rangle + 4,604 \cdot 10^{-5} A_{\text{год}} - 9,457 \cdot 10^{-5} A_{\text{сут}} + 1,8 \cdot 10^{-3} C_{\text{себ}} + 1,913 \cdot 10^{-5} L_{\text{год.пр}} - 6,822 \cdot 10^{-3} N_{\text{ш}} - 5,912 \cdot 10^{-3} P_{\text{тр}} - 0,164; \quad (5)$$

— обрушения горных выработок

$$\langle \lambda_3 \rangle = 0,9458 \langle \lambda_6 \rangle - 0,788 \langle \lambda_4 \rangle - 0,792 \langle \lambda_2 \rangle - 0,924 \langle \lambda_1 \rangle + 2,865 \cdot 10^{-5} A_{\text{год}} - 4,959 \cdot 10^{-5} A_{\text{сут}} - 4,011 \cdot 10^{-4} C_{\text{себ}} - 1,293 \cdot 10^{-6} L_{\text{год.пр}} - 5,115 \cdot 10^{-3} N_{\text{ш}}(t_i) - 1,594 \cdot 10^{-4} P_{\text{тр}}(t_i) - 0,0523; \quad (6)$$

— прорывы воды в горные выработки

$$\langle \lambda_5 \rangle = 1,0121 \langle \lambda_6 \rangle - 1,007 \langle \lambda_4 \rangle - 0,969 \langle \lambda_3 \rangle - 0,993 \langle \lambda_2 \rangle - 0,051 \langle \lambda_1 \rangle + 4,209 \cdot 10^{-6} A_{\text{год}} - 1,304 \cdot 10^{-5} A_{\text{сут}} + 1,772 \cdot 10^{-4} C_{\text{себ}} + 7,098 \cdot 10^{-7} L_{\text{год.пр}} + 1,914 \cdot 10^{-4} N_{\text{ш}} - 1,214 \cdot 10^{-4} P_{\text{тр}} - 0,056 \text{ 1/год.} \quad (7)$$

Вероятность безаварийной работы по каждому виду аварий определяется как $Q_i(t_i) = 1 - P_i(t_i)$, а время безаварийной работы по каждому виду аварий рассчитывается с помощью выражения $T_i = 365 \langle \lambda_i \rangle^{-1}$. Разработанная математическая модель позволяет в качестве цели управления использовать максимум вероятности безаварийной работы шахты, тогда параметрами управления будут технико-экономические показатели. Практическая апробация математической модели показала, что, во-первых, адекватность модели подтверждается удовлетворительным совпадением расчетных значений вероятностно-статистических показателей с фактическими данными, во-вторых, многомерные зависимости значений интенсивности аварий от факториальных признаков позволяют получить достоверные оценки вероятностей аварий. При этом можно использовать единый подход к различным горно-геологическим условиям для угольных шахт, а также оценивать и уровень безопасности рудников.

Например, предполагая, что справедлив экспоненциальный закон распределения отказов системы защиты от взрывов метановоздушной смеси (МВС), можно получить количественные статистические оценки по данному виду аварий. Анализ показывает, что по своим характеристикам система защиты от взрывов МВС в угольных шахтах России остается на уровне угольной промышленности СССР (табл. 4). При этом система защиты от поражающих факторов ухудшилась в несколько раз.

Снижение риска и последствий взрывов МВС целесообразно осуществлять геотехнологическими методами. В целом же прогноз уровня безопасности по газовому фактору в угольных шахтах позволяет сформулировать комплекс научных и практических мероприятий.

- Обоснование алгоритмов и разработка комплекса программных средств моделирования воздухораспределения в выработках угольных шахт в реальном масштабе времени при нормальных и аварийных режимах эксплуатации.
- Совершенствование технологии обследования шахтных вентиляционных систем (ШВС) и подготовки исходных данных для моделей ШВС.
- Обоснование алгоритмов и разработка комплекса программных средств для моделирования систем дегазации угольных шахт в реальном масштабе времени при нормальных и аварийных режимах эксплуатации шахты.
- Совершенствование технологии определения метаноемкости и природной метаносности, а также коллекторских свойств угольных пластов и вмещающих пород.
- Обоснование моделей динамики метановыделения из различных источников, разработка алгоритмов и комплекса программных средств моделирования абсолютной метанообильности выработок высокопроизводительных угольных шахт.
- Обоснование моделей динамики концентрации метана в горных выработках угольных шахт.
- Обоснование алгоритмов и разработка комплекса программных средств решения задач сетевой газовой динамики угольных шахт в реальном масштабе времени при нормальных и аварийных режимах эксплуатации угольных шахт.

Список литературы

1. Соколов Э. М., Качурин Н. М., Невзоров Б. М., Саламатин А. П. Показатели уровня аварийности и безопасности шахт / Под ред. Э. М. Соколова // Изв. Тул. гос. техн. ун-та. Сер. "Экология и безопасность жизнедеятельности". — Тула, 1994. — С. 245—254.
2. Гнеденко Б. В., Беляев Ю. К., Соловьев А. Д. Математические методы в теории надежности. — М.: Наука, 1965. — 523 с.
3. Соколов Э. М., Качурин Н. М., Невзоров Б. М., Саламатин А. П. Методические положения оценки вероятности возникновения аварий на угольных шахтах / Под ред. Э. М. Соколова // Изв. Тул. гос. техн. ун-та. Сер. "Экология и безопасность жизнедеятельности". — Тула, 1994. — С. 254—259.
4. Соколов Э. М., Качурин Н. М., Невзоров Б. М., Саламатин А. П. Математическая модель угольной шахты Подмосковского бассейна как объекта АСУ по фактору безопасности / Под ред. Э. М. Соколова // Изв. Тул. гос. техн. ун-та. Сер. "Экология и безопасность жизнедеятельности". — Тула, 1994. — С. 259—262.



УДК 622.411.33:622.244.5:622.016.63

Н. М. Качурин¹, д-р техн. наук, проф., **Н. О. Каледина**², д-р техн. наук, проф.,
А. Н. Качурин²

¹ Тульский государственный университет

² Московский государственный горный университет

E-mail: ecology@tsu.tula.ru

Выделения метана с поверхности обнажения угольного пласта при высокой скорости подвигания подготовительного забоя

Представлены результаты теоретического анализа и обоснования базовой закономерности для прогноза выделения метана с поверхности угольного пласта в подготовительные выработки. Обоснована физическая модель и представлено математическое описание для прогноза выделения метана с поверхности обнажения угольного пласта при высокой скорости подвигания подготовительного забоя, а также приведены результаты вычислительных экспериментов.

Ключевые слова: подготовительная выработка, метан, фильтрация, угольный пласт, газовыделение, математическая модель, прогноз

Kachurin N. M., Kaledina N. O., Kachurin A. N. Methane emanation from coal seam side face by the high advance rate of development face

The results of theoretical analysis and foundation on basic regularity for forecasting methane emanation from coal seam side face into development workings were represented. The physical model of the process was based and mathematical description for forecasting methane emanation from coal seam side face by the high advance rate of development face was shown and results of calculation experiments were shown too.

Keywords: development gallery, methane, filtration, coal seam, gas emanation, mathematical model, forecasting

Современные технологии и технические средства обработки угольных пластов обеспечивают увеличение производительности очистных участков на порядок, что приводит к увеличению в несколько раз скорости подвигания подготовительных забоев. Такая ситуация требует уточнения существующих теоретических зависимостей метановыделения с поверхности обнажения угольного пласта. Рассматривая метановыделения угольных пластов, которые обрабатывают по технологии "шахта—лава",

процесс фильтрационного движения метана будем считать ламинарным и одномерным [1]. Расчетная схема выделения метана с поверхности обнажения разрабатываемого угольного пласта в подготовительную выработку для таких условий представлена на рисунке.

Учитывая высокую скорость подвигания подготовительного забоя, необходимо использовать уравнение фильтрации гиперболического типа [2]. В этом случае математическое описание поля давлений свободного метана в краевой части угольного пласта имеет следующий вид:

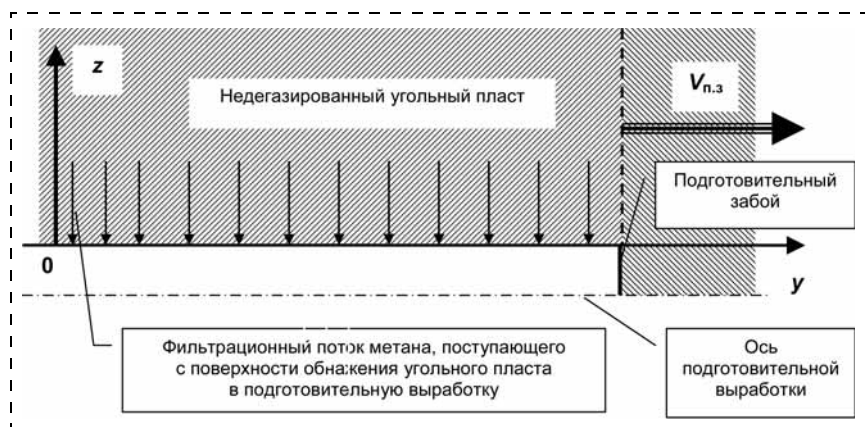
$$\frac{\partial p^2}{\partial t} + t_r \frac{\partial^2 p^2}{\partial t^2} = \chi_{y.p} \frac{\partial^2 p^2}{\partial z^2}, \quad (1)$$

где p — давление свободного метана в трещиновато-пористой структуре угля; z — пространственная координата; t — время; t_r — период релаксации процесса ламинарной фильтрации метана в угольном пласте; $\chi_{y.p}$ — пьезопроводность угольного пласта, зависящая от фильтрационных и сорбционных свойств угля.

Проектная длина подготовительной выработки на 1...2 порядка превышает мощность разрабатываемого угольного пласта и размеры зоны естественного газового дренирования, поэтому физически обоснованно можно рассматривать одномерное полубесконечное пространство, что позволяет записать начальные и граничные условия в следующем виде:

$$\begin{aligned} p(z, 0) = p_0 = \text{const}, \quad \frac{\partial}{\partial t} p(z, 0) = 0, \\ p(0, t) = p_c = \text{const}, \quad \lim_{z \rightarrow \infty} p \neq \infty, \end{aligned} \quad (2)$$

где p_0 — давление свободного метана в угольном пласте; p_c — давление свободного метана на контакте поверхности обнажения пласта с атмосферой подготовительной выработки.



Расчетная схема выделения метана в подготовительную выработку с поверхности обнажения угольного пласта

Решение уравнения (1) для условий (2) имеет следующий вид [3]:

$$\frac{p^2 - p_0^2}{p_c^2 - p_0^2} = \left\{ \exp[-0,5z(t_r \chi_{y.п})^{-0,5}] + 0,5z(t_r \chi_{y.п})^{-0,5} \int_{z(t_r \chi_{y.п})^{-1}}^t (\tau^2 - z^2 t_r \chi_{y.п}^{-1})^{-0,5} \times \exp(-0,5\tau t_r^{-1}) I_1 \left[0,5 t_r^{-1} (\tau^2 - z^2 t_r \chi_{y.п}^{-1})^{0,5} \right] d\tau \right\} \times \sigma_0 \left[t - z(t_r \chi_{y.п}^{-1})^{0,5} \right], \quad (3)$$

где $I_1 \left[0,5 t_r^{-1} (\tau^2 - z^2 t_r \chi_{y.п}^{-1})^{0,5} \right]$ — модифицированная функция Бесселя первого порядка для аргумента, записанного в квадратных скобках; $\sigma_0 \left[t - z(t_r \chi_{y.п}^{-1})^{0,5} \right]$ — функция Хевисайда;

$$\sigma_0 \left[t - z(t_r \chi_{y.п}^{-1})^{0,5} \right] = \begin{cases} 0 & \text{при } t < z(t_r \chi_{y.п}^{-1})^{0,5}, \\ 1 & \text{при } t \geq z(t_r \chi_{y.п}^{-1})^{0,5}; \end{cases}$$

τ — переменная интегрирования.

Массовая скорость фильтрации метана определяется из уравнения баланса массы газа [3]:

$$\rho v = \frac{\rho_a}{2p_a} \sqrt{\frac{\langle k \rangle m \alpha_p}{\mu t_r}} \times \exp\left(-\frac{0,5t}{t_r}\right) I_0 \left(\frac{0,5}{t_r} \sqrt{t^2 - \frac{z^2 t_r}{\chi_{y.п}}} \right), \quad (4)$$

где ρ — плотность метана при давлении p ; v — скорость фильтрации метана; ρv — массовая скорость фильтрации метана; ρ_a — плотность метана при атмосферном давлении p_a ; μ — динамическая вязкость метана; $\langle k \rangle$, m — средние значения газовой проницаемости и пористости угля соответственно; α_p — параметр линейаризации, определяемый по формуле

$$\alpha_p = (p_c - p_0) \ln p_c p_0^{-1}; I_0 \left(\frac{0,5}{t_r} \sqrt{t^2 - \frac{z^2 t_r}{\chi_{y.п}}} \right) — \text{модифицированная функция Бесселя нулевого порядка для аргумента, записанного в круглых скобках.}$$

Из соотношения (4) следует аналитическая зависимость для расчета скорости метановыделения с единичной площади поверхности обнажения угольного пласта [4]:

$$I_{уд.п} = I_{уд.н} \exp(-0,5t/t_r) I_0(0,5t/t_r), \quad (5)$$

где $I_{уд.н}$ — начальная скорость газовыделения, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{мин})$.

При больших значениях аргумента для модифицированной функции Бесселя справедливо асимптотическое разложение: $I_0(0,5t/t_r) \approx \exp(0,5t/t_r) \sqrt{t_r/(\pi t)}$, поэтому для больших периодов времени, которые превышают длительность проведения подготовительной выработки, зависимость (5) примет следующий вид:

$$I_{уд.п} = 0,564 I_{уд.н} \sqrt{\frac{t_r}{t}}. \quad (6)$$

Дебит метана в подготовительную выработку $I_{п.в}$ с элементарной поверхности обнажения угольного пласта dS , учитывая зависимость (5), можно определить как $dI_{п.в} = n I_{уд.п} dS = m_{y.п} V_{п.з} I_{уд.н} \times \exp(-0,5t/t_r) I_0(0,5t/t_r) dt$, где n — количество поверхностей обнажения угольного пласта, контактирующих с атмосферой подготовительной выработки; $m_{y.п}$ и $V_{п.з}$ — мощность разрабатываемого угольного пласта и скорость подвигания подготовительного забоя соответственно.

Тогда, представляя модифицированную функцию Бесселя нулевого порядка в интегральном виде, метановыделение в подготовительную выработку



со всей поверхности обнажения угольного пласта можно определить по формуле:

$$I_{п.в} = \begin{cases} 0,318nm_{у.п}t_rV_{п.з}I_{уд.н} \int_0^{t/2t_r} \exp(-\tau) \times \\ \times \left\{ \int_0^\pi [\exp(\tau \cos \theta) + \exp(-\tau \cos \theta)] d\theta \right\} d\tau \\ n\pi u t m T_{п.в}, & (7) \\ 0,564nm_{у.п}L_{п.в}I_{уд.н} \sqrt{\frac{t_r}{T_{п.в} + t}} \\ n\pi u t > T_{п.в}, \end{cases}$$

где $T_{п.в}$, $L_{п.в}$ — значения проектной длительности проведения подготовительной выработки и ее проектная длина.

Формула (7) справедлива для всего периода времени существования подготовительной выработки. Верхний предел внешнего интеграла представляет собой безразмерное время, прошедшее с начала проведения подготовительной выработки $\tau_{п.в}$.

Введем следующие обозначения: $\overline{I}_{п.в}(\tau_{п.в}) = \pi I_{п.в} (nm_{у.п}t_rV_{п.з}I_{уд.н})^{-1}$ при $t m T_{п.в}$; $\overline{I}_{п.в}^*(\tau_{п.в}) = 1,254 I_{п.в} (nm_{у.п}L_{п.в}I_{уд.н})^{-1}$ при $t > T_{п.в}$; $\tau_{п.в} = t/2t_r$; $\Theta_{п.в} = T_{п.в}/2t_r$, где $\overline{I}_{п.в}$ — безразмерное значение метановыделения в подготовительную выработку с поверхности обнажения угольного пласта в период проведения выработки; $\overline{I}_{п.в}^*(\tau_{п.в})$ — безразмерное значение метановыделения в подготовительную выработку с поверхности обнажения угольного пласта в период обособленного проветривания выработки, имеющей проектную длину $L_{п.в}$.

Вычислительный эксперимент проводился с использованием зависимости соотношения (7) средствами пакетов прикладных программ Microsoft-Office MATHEMATICS 2.2 и STATISTICA для возможных интервалов изменения исходных данных, отражающих условия проведения подготовительных выработок в шахтах Кузбасса. Результаты вычислительного эксперимента показали, что в инженерных расчетах могут применяться следующие формулы:

при $\tau_{п.в} m \Theta_{п.в}$

$$\overline{I}_{п.в}(\tau_{п.в}) =$$

$$= \begin{cases} 3,73\tau_{п.в}^{0,68} & \text{при } 0 m \tau_{п.в} < 3, \\ 4,571 + 1,143\tau_{п.в} & \text{при } 3 m \tau_{п.в} < 10, \\ 10 + 0,5\tau_{п.в} & \text{при } 10 m \tau_{п.в} < 50, \\ 25 + 0,26\tau_{п.в} & \text{при } 50 m \tau_{п.в} < 100; \end{cases} \quad (8)$$

при $\tau_{п.в} > \Theta_{п.в}$

$$\overline{I}_{п.в}^*(\tau_{п.в}) = (\Theta_{п.в} + \tau_{п.в})^{-0,5}. \quad (9)$$

Аппроксимации, заданные соотношением (8), характеризуются значениями коэффициентов кор-

реляции от 0,92 до 0,94. Погрешность аппроксимации не превышает 3 %. Из формул (8)—(9) следует, что интенсивность метановыделения непосредственно связана со скоростью подвигания подготовительного забоя и проектной длиной подготовительной выработки. Анализ этих зависимостей показывает, что в процессе проведения выработки метановыделение нарастает за счет увеличения площади газоотдающей поверхности. Газоотдающая поверхность вначале находится под перепадом давления, приблизительно равным значению $p_0^2 - p_c^2$. Затем происходит дегазация краевой части угольного пласта, контактирующей с атмосферой подготовительной выработки, по гиперболическому закону.

Рассмотрим практический пример инженерного прогноза метанообильности подготовительной выработки при следующих исходных данных: проектные значения длины и длительности проходки — $L_{п.в} = 1500$ м, $T_{п.в} = 250$ сут; средняя скорость подвигания подготовительного забоя $V_{п.з} = 3$ м/сут; период релаксации $t_r = 2,5$ сут; начальная скорость газовыделения $I_{уд.н} = 0,02$ м³/(м² · мин); мощность разрабатываемого угольного пласта $m_{у.п} = 3$ м; количество поверхностей обнажения угольного пласта $n = 2$.

Требуется определить абсолютную метанообильность в момент времени $t = 100$ сут. Так как $t m T_{п.в}$, то воспользуемся формулой (8). Для рассматриваемых исходных данных $\tau_{п.в} = 20$, $\Theta_{п.в} = 50$, следовательно, формула (8) примет вид $\overline{I}_{п.в}(\tau_{п.в}) = 10 + 0,5\tau_{п.в} = 20$. Выразим абсолютную метанообильность через безразмерное значение метановыделения в подготовительную выработку с поверхности обнажения угольного пласта в период проведения выработки $I_{п.в} = \pi^{-1} \overline{I}_{п.в}(\tau_{п.в})(nm_{у.п}t_rV_{п.з}I_{уд.н})$. Тогда, подставив исходные данные и результаты промежуточных вычислений, получим, $I_{п.в} = 5,73$ м³/мин. Полученный результат хорошо согласуется с результатами натурных наблюдений для рассмотренных условий.

Установленные теоретические закономерности позволяют, во-первых, повысить достоверность прогноза абсолютной метанообильности подготовительных выработок при высоких скоростях подвигания подготовительного забоя и, во-вторых, оценить прогнозное значение эффективности системы дегазации.

Список литературы

1. **Аэрогазодинамика** углекислообоильных шахт / Н. М. Качурин, Р. А. Ковалев, В. И. Ефимов, А. Л. Бобовников. — М.: Изд-во МГТУ, 2005. — 345 с.
2. **Качурин Н. М.** Перенос газа в породугольном массиве // Известия вузов. Горный журнал. — 1991. — № 1. — С. 43—47.
3. **Лыков А. В.** Теплообмен: Справочник. — М.: Энергия, 1978. — 480 с.
4. **Качурин Н. М., Борщевич А. М., Бухтияров А. А.** Прогноз выделения метана с поверхности обнажения разрабатываемого угольного пласта и нагрузка на лаву при интенсивной выемке угля // Безопасность жизнедеятельности. — 2010. — № 5. — С. 19—24.

Н. М. Качурин¹, д-р техн. наук, проф., **А. М. Борщевич**², канд. техн. наук,
Л. А. Белая¹, канд. техн. наук, доц., **А. А. Бухтияров**¹

¹ Тульский государственный университет

² ОАО "ОУК "Южкузбассуголь"

E-mail: ecology@tsu.tula.ru

Метановыделение в очистной забой из вмещающих пород

Обоснована целесообразность рассмотрения движения газа в подработанной толще с позиций фильтрационного переноса в трещиновато-пористой среде. Показано, что наличие трещин технологического происхождения, даже при их незначительном объеме в пустотах твердого скелета, может оказывать определяющее влияние на интенсивность газовыделения. Математическое описание процесса метановыделения для надработанных пород получено как частный случай математической модели газовыделения из подработанных пород.

Ключевые слова: вмещающие породы, газоносность, трещиновато-пористая среда, метан, математическая модель

Kachurin N. M., Borschevich A. M., Belay L. A., Buhtiyrov A. A. Methane emission into production face from enclosing strata

It's substantiated than gas motion through undermine rocks have to be considered from positions of filtration motion in cracked-porous environment. Presence of technological origin cracks can have main influence to intensity of gas emission even by insignificant interstice in rocks. Mathematical description process of gas emission from seam floor rocks is special case of gas emission from undermine rocks mathematical model.

Keywords: enclosing strata, gas content, cracked-porous environment, methane, mathematical model

Физическая модель движения газа в подработанных и надработанных породах в соответствии с полученной информацией о структуре нарушенного массива должна формироваться на основании физических положений фильтрационного массопереноса для случая малого значения масштаба корреляции процесса. Это связано с тем, что вмещающие породы, как правило, имеют слабо выраженные сорбционные свойства, и процесс релаксации давления свободного газа определяется интенсивностью диссипации его энергии, обусловленной сопротивлением трения.

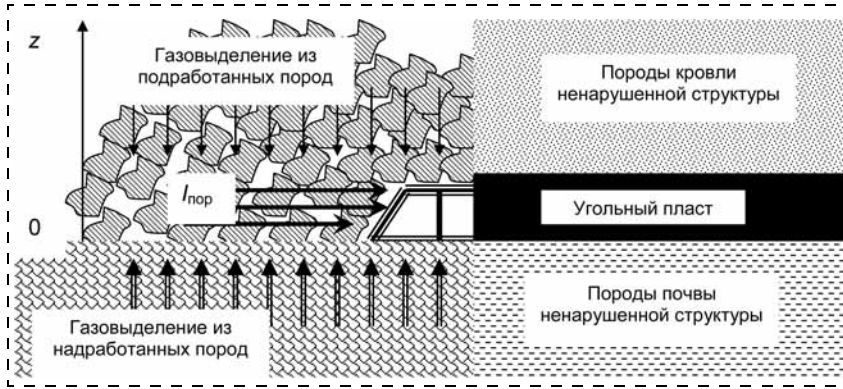
Движение газа в подработанной толще следует рассматривать с позиций фильтрационного переноса в трещиновато-пористой среде. Наличие трещин технологического происхождения, даже при их незначительном объеме в пустотах твердого скелета, может оказывать определяющее влияние на интенсивность газовыделения. Подработанная толща представляет собой куски породы, имеющие пористость и проницаемость, близкие к их значениям, существовавшим до подработки. Газовая проводимость системы трещин во много раз больше, чем проводимость породных блоков. Поэтому в пористых блоках находится газ, который выделяется в трещины, являющиеся транспортными каналами.

Зона беспорядочного обрушения состоит из породных блоков произвольной формы, нерегулярно располагающихся в выработанном пространстве. Зона газового дренирования основной кровли отличается большими размерами блоков и менее развитой системой транспортных каналов. Характерной особенностью движения газа в такой среде является повышенная проницаемость трещин при содержании основных запасов газа в малопроницаемых породных блоках. В начальный момент процесса давление в трещинах падает до значения p , а в блоках равно природному давлению p_0 . При этом возникает перепад давления между газом, находящимся в трещинах, и газом в блоках, что приводит к возникновению локальных градиентов давления в блоках $(p_0 - p)L^{-1}$, где L — характерный размер блока. Градиенты давления в блоках существенно превышают градиент давления в трещинах. Этим обусловлены фильтрационные потоки газа из блоков в трещины (см. рисунок).

Система уравнений баланса газа в транспортных трещинах и блоках имеет следующий вид [1–2]:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t}(m_1\rho) + \operatorname{div}(\rho V) - Q = 0, \\ \frac{\partial}{\partial t}(m_0\rho) + Q = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где ρ — плотность газа; V — вектор скорости фильтрации; Q — удельный дебит газа, поступающего из породных блоков в транспортные трещи-



Расчетная схема к математическим моделям метановыделения из вмещающих пород

ны; m_0, m_1 — пористость породных блоков и трещиноватость вмещающих пород соответственно; t — время.

Используя закон Дарси (в силу малости масштаба корреляции процесса фильтрации) и зависимость удельного дебита газа Q от перепада давлений между блоками и трещинами, полученную Г. И. Баренблаттом [1], систему (1) можно свести к уравнению:

$$\frac{\partial p}{\partial t} - \eta \frac{\partial}{\partial t} \sum_{i=1}^{16(3)} \frac{\partial^2 p}{\partial x_i^2} = \varphi \sum_{i=1}^3 \frac{\partial^2 p}{\partial x_i^2}, \quad (2)$$

где $\varphi = k_T(\mu m_0 \beta)^{-1}$; $\eta = k_6^{-1} k_T l^2$; p — давление газа в трещинах; x_i — пространственные координаты; k_T, k_6 — газовая проницаемость трещин и породных блоков соответственно; μ — динамическая вязкость газа; β — коэффициент сжимаемости метана; l — среднее значение характерного размера породных блоков.

Движение метана в подработанной толще можно принять одномерным, т. е. $x_1 = z$, где z — аппликата декартовой системы координат с началом отсчета, расположенным на почве разрабатываемого угольного пласта. С учетом этого уравнение (2) примет вид:

$$\frac{\partial p}{\partial t} - \eta \frac{\partial^3 p}{\partial t \partial z^2} = \varphi \frac{\partial^2 p}{\partial z^2}. \quad (3)$$

Выделение метана из подработанных пород описывается уравнением (3) при следующих условиях: $p(z, 0) = p_0 = \text{const}$; $p(+0, t) = p_0 - (p_0 - p_c) \times \exp(-\eta^{-1} \varphi t)$; $\lim_{z \rightarrow 0} p(z, t) = \text{const}$, где p_0 — начальное давление метана во вмещающих породах; p_c — начальное давление метана в выработанном пространстве в точке $z = 0$.

Следует отметить, что газовая проницаемость k_T в общем случае является переменной величиной, зависящей от координаты z . Для того чтобы вос-

пользоваться уравнением (3) будем считать, что подработанные породы являются трещиновато-пористой средой с общим сопротивлением, равным суммарному сопротивлению зон беспорядочного обрушения и газового дренирования основной кровли. В этом случае k_T можно рассматривать как эффективную проницаемость такой среды. Следовательно, можно записать

$$k_T = k_1 - (k_1 - k_2) H_2 (2H_1 + H_2)^{-1}, \quad (4)$$

где k_1, k_2 — газовая проницаемость зон беспорядочного обрушения и газового дренирования основной кровли соответственно; H_1, H_2 — мощность зон беспорядочного обрушения и газового дренирования основной кровли соответственно.

Тогда удельную массу газа, поступающего в выработанное пространство в единицу времени можно определить по формуле [3]:

$$\rho V|_{z=0} = \frac{\rho_a k_T (p_0 - p_c) p(+0, t)}{2\pi \mu p_a} \times \int_{\sigma - i\infty}^{\sigma + i\infty} \frac{\partial}{\partial z} u(0, s) \exp(st) dt, \quad (5)$$

где i — мнимая единица; ρ_a — плотность метана при атмосферном давлении p_a ; s — комплексный параметр; u — изображение по Лапласу функции $[p(z, t) - p_0]/(p_0 - p_c)$;

$$u(0, s) = \eta(\eta + \varphi s)^{-1} \exp\left\{-z \left[s(s + \eta)^{-1}\right]^{0,5}\right\}. \quad (6)$$

Вычисляя производную от функции (6) и подставляя ее в формулу (5) получим объем метана, выделившегося в единицу времени с единичной площади подработанных пород:

$$I_{\text{П.П}} = (\mu p_a l)^{-1} (k_T k_6)^{0,5} (p_0 - p_c) \times \{p_0 - (p_0 - p_c) [1 - \exp(-\xi)]\} f(\xi), \quad (7)$$

где $f(\xi) = \exp(-\xi) \int_0^\xi \exp(0,5\tau) I_0(0,5\tau) d\tau$; $\xi = \eta^{-1} \varphi t$; $I_0(0,5\tau)$ — модифицированная функция Бесселя нулевого порядка.

Движение метана в надрработанных породах описывается уравнением

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \kappa_H \frac{\partial^2 p}{\partial z^2}, \quad (8)$$

при следующих условиях: $p(z, 0) = p_H = \text{const}$, $p(0, t) = p_c = \text{const}$, где κ_H — пьезопроводность

наработанных пород; p_H — начальное давление газа в породах почвы угольного пласта. Решение этой краевой задачи известно

$$p(z, t) = \left\{ p_H^2 - (p_H^2 - p_C^2) \left[1 - \operatorname{erf} \frac{z}{2\sqrt{k_{21} m_H t}} \right] \right\}^{0,5} \quad (9)$$

Тогда дифференцируя эту зависимость и учитывая, что фильтрация газа идет по закону Дарси, получим метановыделение с единицы площади наработанных пород

$$I_{H.П} = 0,282 p_H^{-1} (p_H^2 - p_C^2) \sqrt{\frac{k_H m_H}{\mu \beta t}}, \quad (10)$$

где k_H , m_H — проницаемость и пористость наработанных пород соответственно.

Вычислительные эксперименты показали, что дебит метана с единицы площади подработанных пород достигает максимального значения при $\xi \approx 1$. В дальнейшем наблюдается его снижение и, начиная со значений $\xi = 4 \dots 10$, газовый поток существенно во времени не изменяется. Вид кривой свидетельствует о том, что трещиновато-пористая среда обладает определенной инерционностью, и газодинамический процесс в такой среде имеет экстремальные параметры, что хорошо согласуется с качественной картиной, наблюдаемой в реальных условиях.

При вычислительных экспериментах для изучения газовой выделенности из наработанных пород было принято следующее обозначение: $\xi_1 = (\mu \beta t) (k_H m_H)^{-1}$. Удельное газовой выделение из наработанных пород имеет вид монотонно убывающей кривой, которая начиная с $\xi_1 = 4$ изменяется несущественно, так при $\xi_1 = 8$ газовой выделение уменьшается на 20...25 %. Общими для газовой выделенности из вмещающих пород являются два периода — это период резкого увеличения метановой выделенности сразу после обрушения и период сравнительно стабильного во времени дебита метана на достаточно продолжительном временном интервале.

Метан, выделяющийся из подработанных и наработанных пород, выносится утечками воздуха из проветриваемой части зоны беспорядочного обрушения. Средняя концентрация метана в этой зоне приближенно описывается следующим уравнением:

$$\frac{dC_{B.П}}{dt} + \frac{Q_{УТ}}{V_{3.0}} C_{B.П} = \frac{I_{ПОР}}{V_{3.0}}, \quad (11)$$

где $C_{B.П}$ — концентрация метана в газовой смеси, поступающей из выработанного пространства; $Q_{УТ}$ — средние утечки воздуха через проветриваемую часть зоны обрушения объемом $V_{3.0}$; $I_{ПОР}$ — среднесуточное метановыделение из пород в вырабо-

танное пространство; $V_{3.0}$ — объем проветриваемой части зоны беспорядочного обрушения.

Из уравнения (11) следует, что

$$C_{B.П} = \frac{I_{ПОР}}{Q_{УТ}} \left[1 - \exp \left(-\frac{Q_{УТ} t}{V_{3.0}} \right) \right]. \quad (12)$$

Показатель степени в зависимости (12) возрастает с увеличением времени t , соответственно увеличивается и концентрация метана $C_{B.П}$, стремясь

к асимптотическому значению, $C_{B.П} = I_{ПОР} Q_{УТ}^{-1}$, поэтому для достаточно больших периодов времени абсолютное газовой выделение можно определить по формуле: $I_{ПОР} = I_{ПОР.П} + I_{ПОР.Н}$, где $I_{ПОР.П}$, $I_{ПОР.Н}$ — среднесуточное газовой выделение из подработанных и наработанных пород, $m^3/\text{мин}$. В этой формуле суммируются среднесуточные значения метановой выделенности из подработанных и наработанных пород, которые определяются по формулам, являющимся следствием закономерностей (7) и (10),

$$I_{ПОР.П} = 4,18 \cdot 10^{-6} l_{ОЧ} l_2 \gamma_{ПОР.П} f_2(\xi_2^*) \sqrt{\frac{k_T}{k_6}} x_{П.П}, \quad (13)$$

$$I_{ПОР.Н} = 7 \cdot 10^4 l_{ОЧ} l_2 \gamma_{ПОР.Н} \sqrt{\frac{k_T}{m}} x_{Н.П}, \quad (14)$$

где $l_{ОЧ}$ — длина очистного забоя; l_2 — шаг обрушения пород основной кровли, м; $\gamma_{ПОР.П}$, $\gamma_{ПОР.Н}$ — плотность подработанных и наработанных пород, $\text{т}/\text{м}^3$; $x_{П.П}$, $x_{Н.П}$ — природная газоносность подработанных и наработанных пород, $\text{м}^3/\text{т}$; $\xi_2^* = 4,87 \cdot 10^{18} k_6 m^{-1}$;

$$f_2(\xi_2^*) = \int_0^{\xi_2^*} \exp(-0,5\tau) I_0(-0,5\tau) d\tau - \exp(-\xi_2^*). \quad (15)$$

Функция $f_2(\xi_2^*)$ табулирована. Относительная метанообильность может быть определена по следующим формулам:

$$q_{ПОР.П} = 6 \cdot 10^{-3} \frac{l_2 \gamma_{ПОР.П} x_{П.П} f_2(\xi_2^*)}{v_{ОЧ} m_B \gamma_Y} \sqrt{\frac{k_T}{k_6}}, \quad (16)$$

$$q_{ПОР.Н} = 10^8 \frac{l_2 \gamma_{ПОР.Н} x_{Н.П}}{v_{ОЧ} m_B \gamma_Y} \sqrt{\frac{k_H}{m}}, \quad (17)$$

где $q_{ПОР.П}$, $q_{ПОР.Н}$ — относительное метановыделение из подработанных и наработанных пород соответственно, $\text{м}^3/\text{т}$; $v_{ОЧ}$ — скорость подвигания очистного забоя, м/сут; m_B — вынимаемая мощность разрабатываемого угольного пласта, м; γ_Y — плотность угля, $\text{т}/\text{м}^3$.

Методика расчета может быть проиллюстрирована на примере прогноза метановой выделенности из вмещающих пород на очистном участке коренной



западной лавы шахты "Суходольская-Восточная". Исходные данные для расчета: $m_b = 1,4$ м; $l_1 = 1,5$ м; $l_2 = 20$ м; $\gamma_{\text{пар.п}} \approx \gamma_{\text{пар.н}} = 2,67$ т/м³; $\gamma_y = 1,4$ т/м³; $l_{\text{оч}} = 210$ м; $m \approx 0,08$; $H = 727$ м; $[\sigma_p]_1 \approx [\sigma_p]_2 \approx 14$ МПа; $x_{\text{п.п}} = 0,8$ м³/т; $x_{\text{н.п}} = 0,57$ м³/т. Газовая проницаемость зон беспорядочного обрушения и газового дренирования пород основной кровли $k_1 = 1,8 \cdot 10^{-17}$ м²; $k_2 = k_6 = 7 \cdot 10^{-18}$ м². Эффективная проницаемость подработанных и надработанных пород $k_T = 1,5 \cdot 10^{-7}$ м²; $k_H = 2,3 \cdot 10^{-19}$ м². Рассчитываем величину параметра ξ_2^* , получаем $\xi_2^* = 14$, после этого по формуле (15) находим $f_2(14) = 4$. Определяем абсолютное газовыделение из подработанных и надработанных пород по формулам (13) и (14): $I_{\text{пор.п}} = 1,21$ м³/мин, $I_{\text{пор.н}} = 0,76$ м³/мин. Рассчитываем относительное газовыделение по формулам (16) и (17): $q_{\text{пор.п}} = 7,9$ м³/т, $q_{\text{пор.н}} = 4,9$ м³/т. Следовательно, расчетные значения абсолютного и относительного газовыделения из вмещающих пород будут равны 1,97 м³/мин (1,21 + 0,76) и 12,8 м³/т

(7,9 + 4,9). По результатам газовых съемок абсолютная и относительная газообильность составляла 2,1 м³/мин и 13,7 м³/т, т. е. отклонение от расчетных величин не превышает 10 %. Таким образом, предлагаемая методика позволяет проводить инженерные прогнозы газообильности с учетом влияния газоносных вмещающих пород. Это представляет исключительный практический интерес для отработки глубоких горизонтов, на которых газоносность вмещающих пород существенно возрастает.

Список литературы

1. Баренблатт Г. И., Ентов В. М., Рыжик В. М. Теория нестационарной фильтрации жидкости и газа. — М.: Недра, 1972. — 288 с.
2. Качурин Н. М. Прогноз метановыделения из вмещающих пород на очистных участках // Подземная разработка тонких и средней мощности угольных пластов: Сб. ст. — Тула: ТулПИ, 1986. — С. 87–92.
3. Качурин Н. М. Выделение метана из подработанных и надработанных пород в выработанное пространство очистного участка // Известия вузов. Горный журнал. — 1987. — № 2. — С. 54–59.

УДК 622.411.9

Э. М. Соколов, д-р техн. наук, проф., Н. М. Качурин, д-р техн. наук, проф.,
И. И. Агеев, Тульский государственный университет
E-mail: ecology@tsu.tula.ru

Методические аспекты прогноза выделений углекислого газа в угольных шахтах

Обобщены установленные ранее закономерности и уточнены существующие закономерности движения углекислого газа в породугольном массиве и вентиляционных потоках для прогнозной оценки газовыделений. Показано, что повышение достоверности прогноза газовыделений достигается адекватным математическим описанием процессов переноса углекислого газа в массиве и вентиляционных струях, отражающим их связь с параметрами атмосферных и технологических процессов.

Ключевые слова: углекислый газ, газовыделение, угольный пласт, выработанное пространство, воздух, атмосферное давление

Sokolov E. M., Kachurin N. M., Ageev I. I. Methodical aspects of forecasting carbonic acid in coal mines

Research goal was generalizing ascertained regularities and specifying existing regularities motion of carbonic acid in rocks and ventilation flows for prognosis evaluating gas emission. It's shown that improving trustworthiness of forecasting gas emission can be gotten with using adequate mathematical description of moving carbonic acid in rocks and ventilation flows. The mathematical description must reflect influencing atmospheric parameters and technological processes.

Keywords: carbonic acid, gas emission, coal seam, mined-out space, air, atmospheric pressure

Углекислотообильность угольных шахт. Углекислый газ является наиболее распространенным углеродсодержащим газом в земной коре. Он содержится в магматических, метаморфических, осадочных породах и подземных водах, а также является основным компонентом вулканических (более 87 %) и фумарольных (около 52 %) газов, а также газов термальных источников (до 95 %). Углекислый газ выделяется в рудничную атмосферу шахт, разрабатывающих угли различной степени метаморфизма (от бурых до антрацитов). В ряде случаев на шахтах с высокой метанообильностью выделения углекислого газа превалируют над выделениями метана.

В настоящее время углекислый газ фиксируется в рудничной атмосфере всех угольных бассейнов стран СНГ и в ряде случаев является основным фактором, по которому определяется количество воздуха, необходимого для проветривания. По интенсивности выделения углекислого газа принимается количество воздуха для шахт Подмосковского бассейна и антрацитовых шахт Восточного Донбасса. Около 48 % шахт Донбасса, разрабатывающих угли различных стадий метаморфизма, и более 25 % очистных и подготовительных участков шахт Кузбасса относятся к категории углекислотообильных. Количество воздуха для них рассчитывается по углекислому газу. На крупных шахтах абсолютная углекислотообильность достигает 12 м³/мин и более.

Особенностью выделения углекислого газа в рудничную атмосферу является то, что он (в отличие от метана) может выделяться из многих источников, различных по своей физико-химической сущности. Поэтому задача прогнозирования выделений углекислого газа и оценки газовой ситуации является достаточно сложной.

Как правило, углекислый газ присутствует в трех верхних газовых зонах (зоны азотно-углекислых, углекисло-азотных и метано-азотных газов). Его содержание либо с глубиной равномерно уменьшается, либо в зоне азотно-углекислых газов вначале нарастает, а затем уменьшается. В зоне метановых газов диоксид углерода встречается в виде примесей. Газовым зонам присущ определенный химический состав подземных вод. К зоне азотно-углекислых газов приурочены гидрокарбонатно-кальциевые воды, к зоне углекисло-азотных газов — гидрокарбонатно-кальциевые и сульфатно-натриевые, к зоне азотно-метановых газов — гидрокарбонатно-натриевые, к зоне метановых газов — гидрокарбонатно-хлоридно-натриевые воды. Подземные воды переносят растворенные газы, снижают сорбционную способность углей и уменьшают их эффективную пористость и газопроницаемость, что отражается на газоносности углей.

Высокая углекислотообильность угольных шахт при низкой углекислотоносности углей, вмещаю-

щих пород и подземных вод в ряде бассейнов страны свидетельствует о выделении в рудничную атмосферу углекислого газа, образовавшегося в результате окисления углей, пород, элементов крепи, жизнедеятельности бактерий. Углекислый газ, образовавшийся в горных выработках, условно может быть назван газом технологического происхождения, т. е. является результатом многочисленных процессов, связанных с реакциями окисления.

В связи с большим разнообразием форм образования углекислого газа в земной коре довольно сложно определить его генезис. Значительные количества углекислого газа образуются при углефикации органического вещества на бурогольной стадии. Кроме того, углекислый газ может привноситься циркулирующими растворами, а в ряде случаев он может быть глубинно-метаморфического происхождения.

Движение углекислого газа и газовоздушных смесей в трещиновато-пористых средах (в угольных пластах, вмещающих породы и выработанном пространстве) определяется их свойствами (структурой, размерами пор и трещин, их распределением и ориентацией относительно потока), свойствами газа, а также взаимодействием среды и газов. Слои угля разбиты системой трещин различного происхождения. Различают эндогенные трещины, образовавшиеся при коллоидно-химических процессах, протекавших в период метаморфизма, и экзогенные трещины, образовавшиеся при тектонических процессах. Среди экзогенных выделяют трещины скалывания, образовавшиеся под действием сил сжатия и отрыва и возникшие под действием сил растяжения. Закрытые трещины скалывания ухудшают фильтрацию, а открытые трещины отрыва улучшают ее.

Ископаемые угли — хорошие естественные сорбенты по отношению к углекислому газу. Поэтому движение газа в углях происходит одновременно по разным законам: в режимах фильтрации и диффузии. Фильтрация является преобладающей формой течения в трещинах и порах, размеры которых значительно больше средней длины свободного пробега молекул. Движущей силой фильтрации является перепад давлений газа в направлении движения. В порах, радиус которых меньше, чем средняя длина свободного пробега молекулы, преимущественным становится соударение молекул со стенками канала, а не между собой. Здесь перенос вещества осуществляется в основном за счет разности концентраций молекул. Таким образом, трещиновато-пористая структура углей образует сложную гидравлическую систему с высокой сорбционной способностью. Газ, находящийся в микро-



структуре угля, движется в режиме диффузии, а в макроструктуре — в режиме фильтрации.

Обострение проблемы взаимоотношений человечества с окружающей природной средой выделяет научные вопросы техногенных выбросов углекислого газа в атмосферу в особую категорию вопросов глобальной экологии. Это обусловлено, во-первых, тем, что углекислый газ является парниковым газом и, во-вторых, угольные шахты в подавляющем большинстве представляют собой источники генерации углекислого газа в результате процессов низкотемпературного окисления. Поэтому естественным продолжением задач газовой динамики рудничной атмосферы стали задачи газообмена угольных шахт с тропосферой.

Выделение углекислого газа в вентиляционные струи шахт из выработанных пространств. В связи с небольшим избыточным давлением газа в выработанном пространстве газообильность очистных и подготовительных участков зависит от колебаний статического воздуха в горных выработках. При трехстороннем примыкании выработанного пространства к очистным выработкам (вентиляционный штрек — лава — конвейерный штрек) дебет углекислого газа в периоды уменьшения атмосферного давления достигает 1,5 м³/мин. Уменьшение статического напора воздуха создает избыточное давление газовой смеси, находящейся в порах и пустотах обрушенных пород. Расчетная схема к процессу газовой выделению представлена на рисунке.

В результате изотермического расширения газозовая смесь фильтруется к поверхности обнажения выработанного пространства, контактирующей с активными вентиляционными струями. Уравнение, начальное и граничное условия, описывающие процесс формирования нестационарного поля давлений фильтра в зоне обрушения, имеют вид:

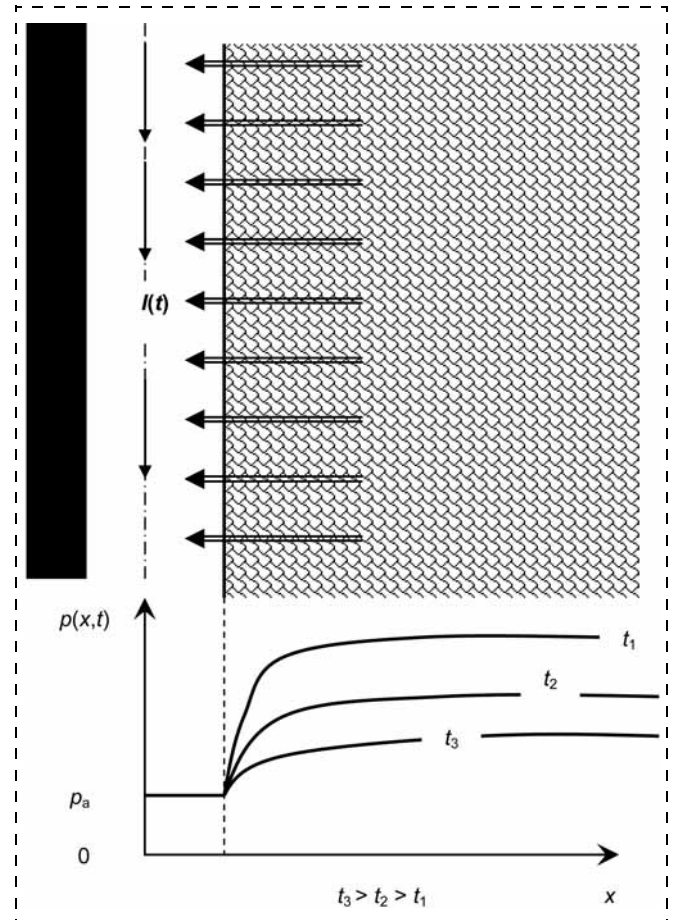
$$\operatorname{div}(\operatorname{grad} p) - \frac{m\mu}{k\rho} \frac{\partial p}{\partial t} = 0, \quad p(0, x) = p_0 = \operatorname{const};$$

$$p(t, 0) = f(t), \quad (1)$$

где p — давление газовой смеси в выработанном пространстве; m и k , μ и ρ — пористость и газовая проницаемость выработанного пространства, динамическая вязкость и плотность газовой смеси; t — время.

Решение уравнения (1) для одномерного случая можно представить следующим образом:

$$p^2(x, t) = p_0^2 \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{\kappa t}}\right) + \frac{x}{2\sqrt{\pi\kappa}} \int_0^t \frac{\varphi(\tau)}{(t-\tau)^{1,5}} \exp\left[-\frac{x^2}{4\kappa(t-\tau)}\right] d\tau, \quad (2)$$



Расчетная схема к процессу газовой выделению из выработанного пространства в горную выработку:

→ — воздушная струя; ⇨ — поток газовой смеси из выработанного пространства

где p_0 — начальное значение атмосферного давления газовой смеси в выработанном пространстве; κ — пьезопроводность выработанного пространства; $\varphi(\tau)$ — функция, характеризующая изменение атмосферного давления; τ — переменная интегрирования.

Тогда, используя полученный результат, абсолютное газовой выделение можно определить по формуле:

$$I(t) = -\frac{ch_0 Lk t}{\mu\varphi(t)} \int_0^t \frac{\varphi(\tau)}{(t-\tau)^{1,5}} d\tau, \quad (3)$$

где h_0 , L — высота и длина поверхности обнажения выработанного пространства соответственно; c — концентрация углекислого газа в мертвом воздухе.

Таким образом, для расчета газовой выделение необходимо определить аналитический вид функции $\varphi(t)$, которая прямо пропорциональна величине $p^2(0, t)$. Изменения давления, имеющие практический интерес, удовлетворительно аппроксимируются линейными функциями. Используя обобщен-

Прогноз газовой выделения в периоды падения атмосферного давления

Шахта	Лава	Газовыделение из выработанного пространства, м ³ /мин		Суммарное газовыделение на очистном участке, м ³ /мин	
		минимальное	максимальное	минимальное	максимальное
Приупская	122 вост.	0,095	1,518	0,171	1,594
Дубовская	103 южн.	0,079	1,255	0,133	1,309
Бельковская	172 ю.-з.	0,110	1,757	0,190	1,836
Васильевская	21	0,095	1,518	0,164	1,586
Подмосковная	38 вост.	0,189	3,013	0,316	3,139
Середейская	401	0,104	1,657	0,163	1,715

ные функции, варианты граничных условий можно представить выражением

$$\varphi(t) = p_0^2 + (2p_0\Delta p \operatorname{sign} h + \Delta p^2)\sigma_0(t - t_p) + 2a_p[p_0 + \Delta p \operatorname{sign} \sigma_0(t - t_p)]t + (a_p t)^2, \quad (4)$$

где $\operatorname{sign} h$ — знаковая функция; $\sigma_0(t - t_p)$ — единичная функция Хевисайда; Δp — перепад давления, возникающий в результате реверсирования вентилятора главного проветривания (ВГП); h — депрессия на очистном участке после изменения режима работы вентилятора главного проветривания; h_d , h_p — избыточное давление и разрежение воздуха в выработках при нагнетательном и всасывающем способах проветривания соответственно, которые определяют величину перепада давлений Δp при реверсе ВГП; t_p — момент времени, в который реверсируется вентилятор; a_p — скорость изменения атмосферного давления.

Выразив величины h_d и h_p через сопротивление выработок очистного участка и количество воздуха, получим $\Delta p = (1 + \xi^2)RQ^2$, где $\xi \approx 0,6$ — коэффициент, учитывающий уменьшение количества воздуха при реверсировании вентилятора главного проветривания (при остановке вентилятора $\xi = 0$); R — аэродинамическое сопротивление выработок очистного участка; Q — количество воздуха. Подставив выражение (4) в равенство (3) и вычислив интеграл, получим формулу для расчета дебита углекислого газа из выработанного пространства

$$I(t) = ch_0L \sqrt{\frac{mk}{\pi\mu p_0}} [s_1 t^{-0,5}\sigma_0(t - t_p) + s_2 t^{0,5} + s_3 \sigma_0(t - t_p)t^{0,5} + s_4 t^{1,5}] \varphi^{-1}(t), \quad (5)$$

где $s_1 = 2p_0\Delta p \operatorname{sign} h + \Delta p^2$; $s_2 = 4a_p p_0$; $s_3 = 4a_p \Delta p \operatorname{sign} h$; $s_4 = 5,333 a_p^2$.

Формула (5) позволяет рассчитывать газовыделение практически для всех случаев изменения давления воздуха в горных выработках. Зависимость (5) легко адаптировать на газодинамическую ситуацию, возникающую при реверсировании вентилятора главного проветривания. При этом

расчет можно проводить как для отдельной выработки, примыкающей к выработанному пространству, так и для крыла или шахты в целом. Сравнение расчетных данных (см. таблицу) с фактическими данными для шахт Подмосковного бассейна свидетельствует об удовлетворительной сходимости результатов (отклонения не превышали 20 %). Вычислительные эксперименты и натурные наблюдения, например, показали, что выделения углекислого газа при переходе на всасывающий способ проветривания на шахтах Подмосковного бассейна протекает интенсивно в начальный период, в дальнейшем уменьшается до уровня, существовавшего при нагнетательном проветривании.

Выделение углекислого газа с поверхности обнажения угольного пласта. При решении задачи определения интенсивности поглощения кислорода и выделения углекислого газа поверхностью обнажения угольного пласта была принята следующая схема газообмена между вентиляционной струей и угольным пластом. Кислород воздуха за счет кнудсеновской диффузии проникает в угольный пласт и сорбируется углем. Взаимодействие кислорода с углем приводит к образованию углекислого газа, который выделяется в горную выработку в режиме молекулярной диффузии, при стабильном атмосферном давлении, или же фильтрации в периоды снижения атмосферного давления. Такая схема процесса моделировалась стохастическим уравнением молекулярной диффузии со стоком, характеризующим взаимодействие кислорода с углем. Решение этого уравнения для полубесконечного пространства при условиях $c_k(x, 0) = 0$, $c_k(0, t) = c_b$, где c_k , c_b — концентрация кислорода в газовой смеси, находящейся в порах угольного пласта и воздухе соответственно, позволило получить зависимость изменения скорости поглощения кислорода во времени.

Анализ этой зависимости показал, что величина скорости поглощения кислорода стремится к асимптотическому значению $I_{уд.к}$, которое определяется по формуле:

$$I_{уд.к} = c_b \sqrt{D_k K_o}, \quad (6)$$

где D_k , K_o — коэффициент кнудсеновской диффузии кислорода в угле и окислительная активность угля.



Определение интенсивности выделения углекислого газа в вентиляционную струю, контактирующую с поверхностью обнажения угольного пласта, осуществляют умножением величины, рассчитанной по формуле (6), на суммарную площадь обнажения угольного пласта и эмпирическое значение респираторного коэффициента.

Методические положения управления выделением углекислого газа в шахтах. Вентиляция является одним из наиболее эффективных средств борьбы с углекислым газом в шахтах. Однако динамизм газовыделений, обусловленных падением атмосферного давления, приводит к тому, что в реальных условиях для обеспечения нормальных санитарно-гигиенических условий требуется рассчитывать количество воздуха по максимально возможному выделению углекислого газа. Это вызывает уменьшение коэффициента использования воздуха и увеличение капитальных и эксплуатационных затрат на вентиляцию.

Поэтому применяют различные способы и средства управления выделением углекислого газа, которые позволяют регулировать поступления газа в вентиляционные струи. Их можно условно разделить на две группы: 1) способы, локализирующие углекислый газ в источниках его выделения; 2) способы, изолирующие источники его выделения. К первой группе относятся такие способы, как поглощение углекислого газа щелочными растворами или твердыми адсорбентами, искусственное повышение давления воздуха в периоды падения атмосферного давления, удаление газа из источника на поверхность, разбавление газа в источниках его образования. Ко второй группе относятся такие способы, как покрытие газоотдающих поверхностей слабопроницаемыми материалами (глина, бетон, гипс, некоторые виды пластмасс), сооружение газонепроницаемых перемычек, аккумуляция мертвого воздуха в гибких емкостях.

Выбор способов управления газовыделением определяется горно-геологическими условиями и технологическими особенностями отработки месторождений. При этом следует помнить, что задача поддержания требуемого состава воздуха в горных выработках углекислотообильных шахт должна решаться с учетом возможного обескислороживания воздуха в результате выделения больших масс азота. Поглощение углекислого газа щелочными растворами и твердыми сорбентами резко снижает, а в определенных условиях и полностью исключает его выделение в выработки. Но при этом не исключается разбавление кислорода мертвым воздухом. Создание искусственного

противодавления, удаление газа из источника или его разбавление в источнике свободны от этого недостатка, однако они более трудоемки.

Практика применения различных способов и средств изоляции источников выделения углекислого газа показала, что в шахтных условиях достигнуть высокого уровня непроницаемости покрытий и перемычек не удается. Дело в том, что изолирующие устройства контактируют непосредственно с угольными целиками и вмещающими породами, и в этих местах, как правило, наблюдается повышенная концентрация напряжений, разрушающая горный массив. Поэтому дальнейшее совершенствование средств управления газовыделением идет по пути создания устройств комбинированного воздействия на выделяющуюся газовую смесь. В настоящее время существует много высокоэффективных средств борьбы с углекислым газом. В связи с этим особую актуальность приобретает вопрос научно обоснованного выбора этих средств в конкретных условиях.

Цель, которую ставит перед собой инженер при решении этого вопроса, можно сформулировать следующим образом: обеспечить требуемый состав воздуха при минимально возможной подаче его в горные выработки. В данном случае требования технологической и экологической безопасности совпадают. Для достижения этих целей необходимо владеть методом динамического прогноза газовыделений и оценки газовой ситуации. В углекислотообильных шахтах экстремальные условия по газовому фактору возникают при резких снижениях статического давления воздуха в горных выработках. Именно для этих периодов следует уменьшить газовыделение настолько, чтобы не потребовалось дополнительного количества воздуха сверх того, который подается для статического разбавления вредных газовых выделений и пыли.

Количественным показателем эффективности применяемых способов и средств управления газовыделением должен являться динамический критерий, позволяющий оценить уменьшение возможного объема выделения газа за период падения статического давления воздуха в горных выработках. В качестве такого критерия принят следующий функционал:

$$I_{п.д}[I_{y,r}(t')] = \int_0^{t'} \left[\sum_1^{n_1} I_{н.к}(t) + \sum_1^{n_2} I_{з.к}(t) - \sum_1^{n_3} q(t) \right] dt, \quad (7)$$

где t' — продолжительность периода падения статического давления воздуха в горных выработках; $I_{y,r}(t')$ — количество углекислого газа, выделяю-

щегося в единицу времени при данном способе управления газовой выделением; n_1 — число источников, газовой выделение из которых зависит от состояния атмосферного давления; n_2 — число источников, газовой выделение из которых зависит от колебаний атмосферного давления; n_3 — число стоков (средств управления), уменьшающих газовой выделение; $I_{3,к}(t)$, $I_{н,к}(t)$ — дебит газа из источников, соответственно зависящих от колебаний атмосферного давления и не зависящих от таких колебаний; $q(t)$ — интенсивность уменьшения газовой выделение в результате применения тех или иных средств управления.

По физическому смыслу функционал $I_{п.д}[I_{y,г}(t')]$ представляет собой общее количество газа, выделившегося за период t' . Поэтому оптимальное управление в этом случае должно удовлетворять условию: $I_{п.д}[I_{y,г}(t')] \rightarrow \min$. Это должно достигаться при следующих ограничениях: $\sum_1^{n_1} I_{н,к}(t) \geq 0$ и $\sum_1^{n_2} I_{3,к}(t) \geq 0$. Эти ограничения означают, что газ движется от источника в горные выработки. Решать данную задачу оптимизации целесообразно методами вариационного исчисления.

Следует отметить, что до настоящего времени общие методы решения динамических задач оптимального управления многосвязными системами до конца не разработаны. В связи с этим изложенный выше подход требует дополнительных исследований и дальнейшей доработки. Однако уже и в таком виде его можно использовать для сравнительной оценки способов и средств в управлении газовой выделением. Для этого следует пользоваться перечисленными ниже методическими положениями.

1. Рассчитывается количество воздуха по условию статического разбавления выделяющихся вредных газов.

2. Принимаются способ проветривания и схема вентиляции шахты, а также очистных и подготовительных участков.

3. Решается линейная задача воздухораспределения для различных этапов эксплуатации угольного месторождения.

4. Осуществляется динамический прогноз газовой выделений по основным видам источников.

5. Для наиболее вероятных физических условий падения атмосферного давления оценивается газовая ситуация. При этом возможны два случая: расчетного количества воздуха достаточно, чтобы обеспечить требуемый правилами безопасности состав, или требуется подача дополнительного количества воздуха. В первом случае обычная вентиляция является достаточным способом борьбы с углекислым газом, а во втором случае необходимо решать вопрос выбора способа и средств управления газовой выделением.

6. Выбираются способ и средства управления газовой выделением исходя из данных практики (главным критерием является экспертная оценка).

7. Рассчитывается объем газа, выделяющегося за время t' и устанавливается уровень необходимого снижения этого объема.

8. Рассчитывается объем газа, выделяющегося за время t' для каждого выбранного способа управления газовой выделением и формируется подгруппа способов, обеспечивающих заданный уровень снижения объема газовой выделение.

9. Технико-экономическим сравнением вариантов выбирается из данной подгруппы наиболее экономичный способ управления газовой выделением.

Следует отметить, что разработка новых видов технологии подземной угледобычи, предусматривающих увеличение производительности труда в 2—3 раза по сравнению с традиционными способами, осложняет практическое решение вопросов нормализации шахтной атмосферы. Уровень технологических требований к способам и средствам управления газовой выделением возрастает на порядок. В этом направлении ведутся комплексные исследования целого ряда отраслевых научно-исследовательских институтов и учебных институтов России.

Список литературы

1. Соколов Э. М., Качурин Н. М. Углекислый газ в угольных шахтах. — М.: Недра, 1987. — 146 с.
2. Аэрогазодинамика углекислитообильных шахт / Н. М. Качурин, Р. А. Ковалев, А. Л. Бобовников и др. — М.: Изд-во МГТУ, 2005. — 302 с.



УДК 622.411.39:546.296

Н. М. Качурин¹, д-р техн. наук, проф., **А. А. Поздеев**², **Г. В. Стась**¹, канд. техн. наук, доц.

¹ Тульский государственный университет

² Западноуральский машиностроительный концерн, г. Пермь

E-mail: ecology@tsu.tula.ru

Выделения радона в атмосферу угольных шахт

Приведены результаты теоретического анализа геологической информации по распределению урана в горных породах на территории Подмосковского буроугольного бассейна. Показано, что основными источниками поступления радона на очистные участки угольных шахт являются надработанные ураносодержащие горные породы, разрабатываемые угольные пласты и подземные воды. Дано теоретическое обоснование математических моделей для прогноза выделения радона в атмосферу угольных шахт.

Ключевые слова: радон, уран, горные породы, угольный пласт, подземные воды, шахта, математическая модель, прогноз

Kachurin N. M., Pozdeev A. A., Stas G. V.
Radon emission into air of coal mines

The results of theoretical analyzing geological information by uranium concentrations in rocks of the Moscow Coal Basin territory were shown. It's shown that basic sources of radon emission into mining face of coal mines are underlying uranium-containing rocks, working coal seams and underground water. Theoretical substantiation of mathematical models for forecasting radon emission into underground air was produced.

Keywords: radon, uranium, rock, coal seam, underground water, mine, mathematical model, forecasting

Источники выделений радона в атмосферу угольных шахт. Изучение радоновой опасности на территории Подмосковского угольного бассейна показало, что Центральный регион России принадлежит к регионам с напряженной экологической обстановкой. Это обусловлено высокой концентрацией промышленности, наличием угледобывающих предприятий, а также загрязнением искусственными радионуклидами в результате катастрофы на Чернобыльской АЭС. До последнего времени недостаточно учитывался еще один фактор — загрязнение, связанное с концентрацией естественных радиоактивных элементов урана и радона, обусловленной природными геологическими процессами.

Повышенные содержания искусственных радионуклидов и естественных радиоактивных элементов в ряде мест определяют активность источников излучения, превышающую предельно допустимые значения. В связи с этим важно рассмотреть закономерности пространственного распределения радионуклидов, что позволит дать геохимическую оценку имеющихся территорий с тревожной радиоэкологической обстановкой и наметить пути вероятной миграции и концентрации радиокомпонентов.

На территории Подмосковского буроугольного бассейна известны скопления урана, радия и радона [1]. Следует выделить две общие особенности распределения радионуклидов, выявленные на территории Тульской области: скрытый характер не выходящих на дневную поверхность урановых аномалий; присутствие аномалий радона в почвах и подземных водах, в том числе источников водоснабжения.

Все рудопроявления и аномальные концентрации урана в Тульской области относятся к одному урано-угольному формационному типу. Такого рода скопления широко распространены в природе. Их образования связаны с геохимическими особенностями поведения урана в зоне гипергенеза, где уран хорошо мигрирует в водной среде в шестивалентной форме. Поэтому в большинстве случаев в зоне активного водообмена преобладают условия рассеивания урана природными водами. Однако возможно наличие геохимических барьеров, на которых уран осаждается.

В гипергенных условиях (т. е. в условиях экзогенных образований, генетически связанных с процессами выветривания) по степени распространенности намечается следующий ряд геохимических барьеров урана: восстановительный; сероводородный (от биогенного или абиогенного сероводорода); восстановительный; резко глеевый (представленный бесструктурным неоднородным почвенным слоем) за счет водорода, главным образом продуцируемого бактериями; сорбционный; термодинамический, включающий барьер нейтрализации ураноносных щелочных или кислых вод растворами, содержащими соединения ванадия, фосфора, молибдена и мышьяка без изменения их

валентности, с которыми уран в форме уранила (UO_2^{2+}) дает твердые фазы; эвапорационный (обусловленный воздействием водяного пара), когда уран выпадает из перенасыщенных растворов; механический, образующийся за счет образования россыпей ураносодержащих минералов. Очень часто несколько геохимических барьеров действуют одновременно, что может обусловить заметные концентрации урана.

Наблюдения свидетельствуют о том, что радиологическая обстановка Центрального региона Российской Федерации существенным образом зависит от наличия в недрах естественных радионуклидов, которые сами по себе создают повышенный радиоактивный фон и оказывают прямое воздействие на людей, связанных по роду своей профессиональной деятельности с добычей угля. Урановое орудение в условиях, характерных для Подмосковского бассейна, обычно сопровождается повышенным скоплением радона. Закономерности пространственного распределения урана и радона в пределах Тульской области показывают, что в целом в угольных шахтах других угольных бассейнов будет присутствовать радон. При этом основными видами миграции радона являются вертикальная миграция в надроточенных породах, диффузия в угольных пластах и подземных водах.

Математическая модель миграции радона в надроточенном горном массиве. Процесс вертикальной диффузии радона в надроточенных породах описывается следующим уравнением [2]:

$$D_{\text{Rn}} \frac{d^2 A_{\text{Rn}}^{\text{B.П}}}{dz^2} - \lambda_{\text{Rn}} A_{\text{Rn}}^{\text{B.П}} = 0, \quad (1)$$

где $A_{\text{Rn}}^{\text{B.П}}$ — удельная активность по радону газовой смеси, находящейся во вмещающих породах; D_{Rn} — коэффициент эффективной диффузии радона; λ_{Rn} — эффективная константа скорости процессов сорбции и радиоактивного распада радона; z — вертикальная координата.

Граничные условия имеют вид: $-D_{\text{Rn}} dA_{\text{Rn}}^{\text{B.П}}/dz|_{z=0} = J_{\text{Rn}}^{\text{B.П}} = \text{const}$, $\lim_{z \rightarrow \infty} A_{\text{Rn}} \neq \infty$, где $J_{\text{Rn}}^{\text{B.П}}$ — интенсивность образования радона в подрабатываемом урановом месторождении. Решение уравнения (1) для данных условий можно записать следующим образом:

$$A_{\text{Rn}}^{\text{B.П}}(z) = 0,5 J_{\text{Rn}}^{\text{B.П}} (D_{\text{Rn}} \lambda_{\text{Rn}})^{-0,5} \exp \left[-z \left(\lambda_{\text{Rn}} D_{\text{Rn}}^{-1} \right)^{0,5} \right].$$

Дифференцируя эту зависимость в точке $z = h$, где h — расстояние от урановой залежи до почвы рассматриваемой выработки, найдем абсолютное ра-

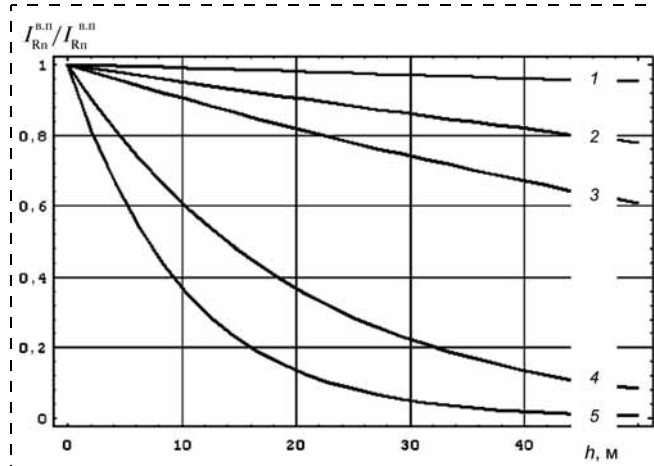


Рис. 1. Графики зависимости отношения величин $I_{\text{Rn}}^{\text{B.П}}/J_{\text{Rn}}^{\text{B.П}}$ от расстояния h при значениях $\sqrt{\lambda_{\text{Rn}}/D_{\text{Rn}}}$, соответственно равных: 1 — 0,001; 2 — 0,005; 3 — 0,01; 4 — 0,05; 5 — 0,1

доновыделение из подрабатываемого уранового месторождения:

$$I_{\text{Rn}}^{\text{B.П}} = J_{\text{Rn}}^{\text{B.П}} \exp \left(-h \sqrt{\frac{\lambda_{\text{Rn}}}{D_{\text{Rn}}}} \right). \quad (2)$$

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. 1. Анализируя профили диффузионного потока радона во вмещающих породах, следует отметить высокий темп снижения скорости миграции радона при уменьшении величины коэффициента эффективной диффузии. Отметим, что такие результаты вычислений совпадают с данными натуральных наблюдений по другим газам, например по метану, поступающему из подрабатываемых угольных пластов. Такое 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 величине интенсивности образования радона в подрабатываемом урановом месторождении.

Выделение радона с поверхности обнажения разрабатываемого угольного пласта. Этот процесс можно описать следующим уравнением [3]:

$$D_{\text{Rn}} \frac{d^2 A_{\text{Rn}}^{\text{Y.П}}}{dx^2} - \lambda_{\text{Rn}} A_{\text{Rn}}^{\text{Y.П}} + J_{\text{Rn}}^{\text{Y.П}} = 0, \quad (3)$$

где $A_{\text{Rn}}^{\text{Y.П}}$ — удельная активность по радону газовой смеси в разрабатываемом угольном пласте; $J_{\text{Rn}}^{\text{Y.П}}$ —



интенсивность образования радона в разрабатываемом угольном пласте.

Граничные условия для поверхности обнажения разрабатываемого угольного пласта имеют вид: $A_{Rn}^{y.п}|_{x=0} = 0$, $\lim_{x \rightarrow \infty} A_{Rn}^{y.п} \neq \infty$. Решение уравнения (3) для этих условий получено в следующем виде:

$$A_{Rn}^{y.п}(x) = J_{Rn}^{y.п} \lambda_{Rn}^{-1} \left\{ 1 - \exp \left[-x \left(\lambda_{Rn} D_{Rn}^{-1} \right)^{0,5} \right] \right\}.$$

Дифференцируя $A_{Rn}^{y.п}(x)$ в точке $x = 0$ найдем абсолютное радоновыделение из разрабатываемого угольного пласта:

$$I_{Rn}^{y.п} = J_{Rn}^{y.п} \sqrt{\frac{D_{Rn}}{\lambda_{Rn}}}. \quad (4)$$

Графики зависимости величины $A_{Rn}^{y.п}(x) = A_{Rn}^{y.п}(x) \lambda_{Rn} / J_{Rn}^{y.п}$ от координаты x для различных значений $\sqrt{\lambda_{Rn} / D_{Rn}}$ представлены на рис. 2. Анализ горизонтального распределения удельной активности радона в плоскости разрабатываемого угольного пласта показывает, что по мере удаления от поверхности обнажения удельная активность радона стабилизируется. Графики зависимости $A_{Rn}^{y.п} = A_{Rn}^{y.п}(x)$ наглядно свидетельствуют о наличии асимптоты при $x \rightarrow \infty$, т. е. $\lim_{x \rightarrow \infty} A_{Rn}^{y.п} = A_{Rn}^{y.п} = 1$.

Следует отметить высокий темп снижения скорости миграции радона при уменьшении величины коэффициента эффективной диффузии. Радоновыделение из разрабатываемого угольного пласта зависит от диффузионных свойств вещества угля,

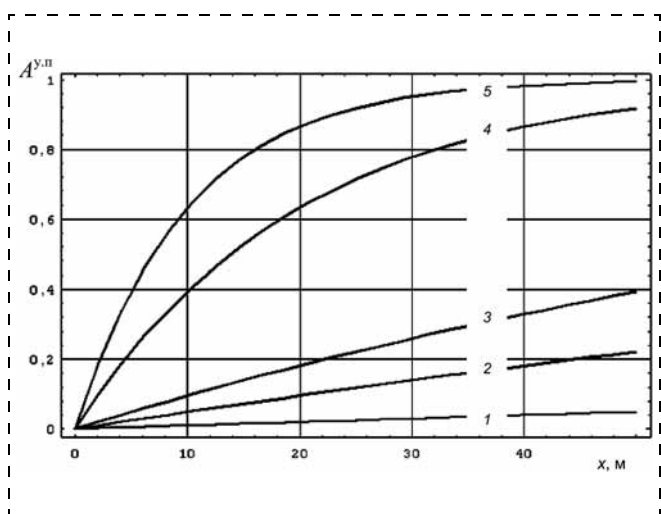


Рис. 2. Графики зависимости величины $A_{Rn}^{y.п}$ от расстояния x при различных значениях $\sqrt{\lambda_{Rn} / D_{Rn}}$, соответственно равных: 1 — 0,001; 2 — 0,005; 3 — 0,01; 4 — 0,05; 5 — 0,1

скорости радиоактивного распада, константы скорости сорбции радона углем и интенсивности образования радона в разрабатываемом угольном пласте. В свою очередь, интенсивность образования радона в угольном пласте зависит от концентрации рассеянного урана.

Выделение радона в горные выработки из подземных вод. В подземных водах, поступающих в горные выработки или удаляемых из водоносных горизонтов через систему водопонижающих скважин, всегда в тех или иных количествах присутствует радон. Радоновыделение из подземных вод проявляется как дегазация подземных вод, текущих по дренажным каналам шахты. Целесообразно рассматривать одномерную стационарную миграцию радона в горные выработки с поверхности водного потока.

Выделения радона с поверхности подземных вод можно описать следующим уравнением [4]:

$$\frac{dA_{Rn}^{п.в}}{dx} = -\frac{\lambda_{Rn} + K_{об}}{u} A_{Rn}^{п.в}, \quad (5)$$

где $A_{Rn}^{п.в}$ — удельная активность подземных вод по радону; $K_{об}$ — коэффициент объемной газоотдачи по радону; u — средняя скорость течения воды в дренажном канале.

Разделяя переменные в уравнении (5) и интегрируя это уравнение, получим, что $A_{Rn}^{п.в}|_{кон} = A_{Rn}^{п.в}|_{нач} \exp[-(\lambda_{Rn} + K_{об})Lu^{-1}]$, где $A_{Rn}^{п.в}|_{нач}$, $A_{Rn}^{п.в}|_{кон}$ — соответственно начальное и конечное значения удельной активности подземных вод по радону в точках $x = 0$ и $x = L$; L — длина дренажного канала. Тогда абсолютное радоновыделение из подземных вод ($I_{Rn}^{п.в}$) можно определить, используя следующую формулу:

$$I_{Rn}^{п.в} = A_{Rn}^{п.в}|_{кон} Q_{п.в} \{1 - \exp[-(\lambda_{Rn} + K_{об})Lu^{-1}]\}, \quad (6)$$

где $Q_{п.в}$ — приток подземных вод на рассматриваемом технологическом объекте.

Графики зависимости величины $I_{Rn}^{п.в}(L) = I_{Rn}^{y.п} / (A_{Rn}^{п.в}|_{нач} Q_{п.в})$ от длины дренажного канала L для различных значений $\alpha = (\lambda_{Rn} + K_{об})u^{-1}$ представлены на рис. 3. Анализ результатов вычислительных экспериментов показывает, что при достаточно больших значениях L величина $I_{Rn}^{п.в}(L \rightarrow \infty)$ стремится к единице. Радоновыделение из подземных вод зависит от скорости радиоактивного распада, скорости десорбции радона из воды и средней скорости течения воды в дренажном канале.

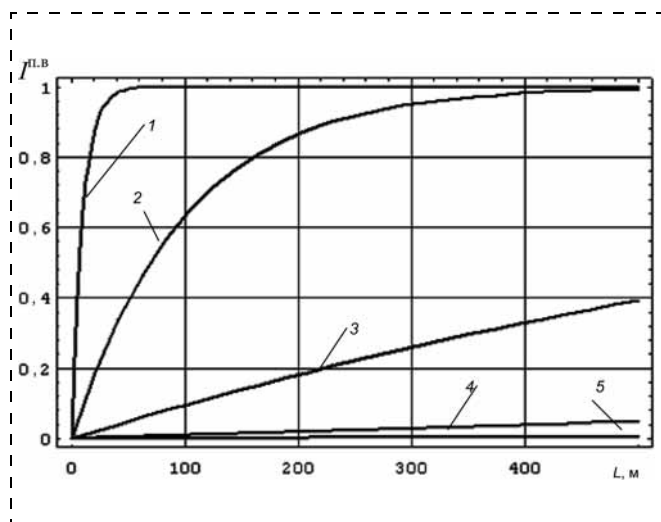


Рис. 3. Графики зависимости величины $I_{Rn}^{п.в}$ от длины дренажного канала L при значениях α соответственно равных:

1 — 10^{-1} ; 2 — 10^{-2} ; 3 — 10^{-3} ; 4 — 10^{-4} ; 5 — 10^{-5}

Прогноз выделений радона на очистных участках угольных шахт. Прогноз абсолютной радонообильности очистных участков осуществляется в соответствии с установленными закономерностями динамики миграции радона в угольных пластах, вмещающих породах и подземных водах.

Ниже приведен алгоритм прогноза абсолютной радонообильности очистных участков.

1. *Формируют информационный блок исходных данных*, включающий следующие параметры: $J_{Rn}^{в.п}$ — интенсивность образования радона в подрабатываемом урановом месторождении; λ_{Rn} — эффективная константа скорости процессов сорбции и радиоактивного распада радона; D_{Rn} — коэффициент эффективной диффузии радона; h — расстояние от урановой залежи до почвы рассматриваемой выработки; L — длина дренажного канала; $Q_{п.в}$ — приток подземных вод на рассматриваемом технологическом объекте; $A_{Rn}^{п.в}|_{кон}$ — конечное значение удельной активности подземных вод по радону в точке $x = L$; $K_{об}$ — коэффициент объемной газоотдачи по радону; u — средняя скорость движения воды в дренажном канале.

2. *Рассчитывают радоновыделение из подрабатываемого уранового месторождения* ($I_{Rn}^{п.в}$) по формуле (2).

3. *Рассчитывают радоновыделение из разрабатываемого угольного пласта* ($I_{Rn}^{у.п}$) по формуле (4).

4. *Рассчитывают радоновыделение из подземных вод* ($I_{Rn}^{п.в}$) по формуле (6).

Средние значения прогнозного радоновыделения на очистном участке и структура баланса радона, поступающего в воздух очистного участка, следующие, Бк/мин/%: угольный пласт 7980/42 %; вмещающие породы 6000/33 %; подземные воды 4250/25 %. Результаты вычислительного эксперимента не противоречат известным эмпирическим данным.

Таким образом, в результате экспериментальных и теоретических исследований были уточнены закономерности влияния физико-химических и геологических факторов на миграцию радона в угольных пластах, вмещающих породах и подземных водах угольных месторождений. В дальнейшем моделирование конвективно-диффузионного переноса радона рудничным воздухом в подземных горных выработках позволит усовершенствовать методику расчета количества воздуха, необходимого для проветривания очистных и подготовительных участков, что существенно повысит уровень безопасности подземных горных работ по аэрологическому фактору.

Список литературы

1. Качурин Н. М., Стась Г. В., Качурина О. Н., Беляева В. Е. Источники выделений радона // Известия Тульского государственного университета. Серия — "Экология и безопасность жизнедеятельности". — Тула: ТулГУ, 2004. — Вып. 7. — С. 176—181.
2. Качурин Н. М., Стась Г. В., Качурина О. Н. Математическая модель миграции радона в надроботанных породах // Известия Тульского государственного университета. Серия — "Экология и безопасность жизнедеятельности". — Тула: ТулГУ, 2004. — Вып. 7. — С. 184—187.
3. Качурин Н. М., Стась Г. В., Качурина О. Н. Математическая модель выделения радона с поверхности обнажения разрабатываемого угольного пласта // Известия Тульского государственного университета. Серия — "Экология и безопасность жизнедеятельности". — Тула: ТулГУ, 2004. — Вып. 7. — С. 187—190.
4. Качурин Н. М., Стась Г. В., Качурина О. Н. Математическая модель выделения радона из подземных вод // Известия Тульского государственного университета. Серия — "Экология и безопасность жизнедеятельности". — Тула: ТулГУ, 2004. — Вып. 7. — С. 190—192.



УДК 622.363.2.012.2:622.413.6

Е. С. Дударь¹, канд. техн. наук, доц., Н. М. Качурин², д-р техн. наук, проф.,
Д. В. Власов²

¹ Пермский государственный технический университет

² Тульский государственный университет

E-mail: ecology@tsu.tula.ru

Исследование процессов тепломассопереноса в калийных рудниках и конденсации влаги в шахтной вентиляционной сети

Представлены результаты теоретических исследований и натурных наблюдений процессов тепломассопереноса в калийных рудниках и конденсации влаги в шахтной вентиляционной сети. Дано обоснование алгоритма расчета параметров микроклимата в рудниках. Приведен порядок определения размеров зон конденсации влаги.

Ключевые слова: калийный рудник, тепломассообмен, конденсация влаги, воздух, математическая модель

Dudar E. S., Kachurin N. M., Vlasov D. V.
Researching processes of heat-and-mass transfer in potassium mines and moisture condensation in mine ventilation network

Results of theoretical researching and full-scale investigation processes of heat-and-mass transfer in potassium mines and moisture condensation in mine ventilation network are submitted. Algorithm of microclimate parameters calculation was substantiated. Sizes of moisture condensation zones were defined.

Keywords: potassium mine, heat-and-mass transfer, moisture condensation, air, mathematical model

Основной особенностью процесса конденсации влаги в шахтных условиях является то, что выпадение влаги из турбулентного потока воздуха происходит в процессе тепло- и массообмена между воздухом и горным массивом. Проблема усложняется тем, что все процессы происходят в шахтной сети сложной топологии. В качестве элементарного исследуемого объекта в шахтной сети была выбрана выработка круглого сечения в однородном бесконечном теле, а движущийся в выработке воздух рассматривался как несжимаемая жидкость. Турбулентное движение воздуха, тепло- и массообмен в потоке считались квазистационарными процессами, а распространение тепла в горных породах рассматривалось как нестационарный процесс. Воздух рассматривался как гомогенная бинарная

смесь двух совершенных газов — сухого воздуха и водяного пара. Предполагалось, что плотность теплового потока, потока массы и свойства парогазовой смеси слабо изменяются вдоль оси выработки, а перепадом температуры по толщине образующейся пленки конденсата можно пренебречь.

Для задачи конвективного теплообмена справедливо решение Лайона, в соответствии с которым безразмерный коэффициент теплоотдачи (число Нуссельта Nu) можно определить из выражения

$$\text{Nu}^{-1} = \frac{\rho C_p a}{2\alpha r_w} = 2 \int_0^1 I_T(R) \frac{w}{\bar{w}} R dR, \quad (1)$$

где $I_T(R)$ — интеграл Лайона;

$$I_T(R) = \int_R^1 \left\{ [1 + a^{-1} \varepsilon_q(R)]^{-1} R^{-1} \int_0^R \frac{w}{\bar{w}} r dr \right\} dR; a, \rho, C_p —$$

температуропроводность, плотность, изобарная теплоемкость воздуха соответственно; α — коэффициент теплоотдачи; r_w — радиус выработки; r — текущая координата; w — продольная компонента вектора скорости воздуха; \bar{w} — средняя скорость по сечению горной выработки; ε_q — кинематический коэффициент турбулентной температуропроводности; $R = rr_w^{-1}$ — безразмерный радиус.

Используя уравнение теплового баланса для выработки круглого сечения, среднемассовую температуру воздуха в произвольном сечении выработки можно определить по формуле:

$$\bar{t}(z) = \frac{\bar{t}_0 + k_T T_w(z)}{1 + k_T}, \quad (2)$$

где \bar{t}_0 — средняя температура воздуха, входящего в горную выработку; T_w — температура стенки выработки; z — продольная цилиндрическая координата, совпадающая с осью рассматриваемой горной выработки; $k_T = \frac{2\alpha z}{\rho C_p \bar{w} r_w}$.

Аналогия процессов теплообмена и массообмена при умеренном отводе массы водяного пара из потока воздуха, обусловленной конденсацией, позволяет распространить решение Лайона на задачу массообмена. Следовательно, можно записать,

$$\text{Nu}_D^{-1} = \frac{\rho D}{2\beta r_w} = 2 \int_0^1 I_D(R) \frac{w}{w} R dR, \quad (3)$$

$$I_D(R) = \int_0^1 \left\{ [1 + D^{-1} \varepsilon_q(R)]^{-1} R^{-1} \int_0^R \frac{w}{w} r dr \right\} dR, \quad (4)$$

$$\bar{c} = \frac{\bar{c}_0 k_D c_{sat}}{1 + k_D}, \quad (5)$$

$$k_D = \frac{2\beta z}{\rho w r_w}, \quad (6)$$

где Nu_D — диффузионное число Нуссельта; $I_D(R)$ — диффузионный интеграл Лайона; D — коэффициент молекулярной диффузии; \bar{c} — среднemasсовая концентрация пара; \bar{c}_0 — начальное значение средней концентрации водяного пара в воздухе, поступающем в горную выработку; c_{sat} — концентрация водяного пара на контакте со стенкой выработки; β — коэффициент массоотдачи.

Концентрация пара в произвольной точке сечения выработки может быть найдена по формуле:

$$c = c_{sat} + (\bar{c} - c_{sat}) \text{Nu}_D I_D(R). \quad (7)$$

Зависимость изменения температуры горного массива для случая произвольного изменения среднemasсовой температуры движущегося воздуха $\bar{t}(\tau)$ получена в результате решения уравнения теплопроводности для распространения тепла в законтурном массиве цилиндрической выработки и теплообмена на контакте горного массива с воздухом, происходящего по закону Ньютона:

$$T(r, \tau) = T_\infty + \frac{2ah}{\pi} \int_0^\tau \frac{N_0(\chi r) J(\chi r_w) - J_0(\chi r) N(\chi r_w)}{J^2(\chi r_w) + N^2(\chi r_w)} \times \left\{ \int_0^\tau \exp[-\alpha \chi^2(\tau - \eta)] [\bar{t}(\eta) - T_\infty] d\eta \right\} \chi d\chi, \quad (8)$$

где $J(\chi r_w) = \chi J_1(\chi r_w) + h J_0(\chi r_w)$, $N(\chi r_w) = \chi N_1(\chi r_w) + h N_0(\chi r_w)$; $h = \alpha_\Sigma \lambda^{-1}$; J_0, J_1, N_0, N_1 — функции Бесселя и Неймана нулевого и первого порядков, соответственно; α_Σ — приведенный коэффициент теплоотдачи, учитывающий теплоту, выделяющуюся при конденсации; λ — теплопроводность горного массива; η и χ — переменные интегрирования.

При $r = r_w$ формула (8) позволяет рассчитать температуру стенки выработки

$$T_w(\tau) = T(r_w, \tau) = T_\infty + \frac{4ah}{\pi^2 r_w} \int_0^\tau \left\{ \int_0^\tau \exp[-\alpha \chi^2(\tau - \eta)] [\bar{t}(\eta) - T_\infty] d\eta \right\} \times \int_0^\infty [J^2(\chi r_w) + N^2(\chi r_w)]^{-1} \chi d\chi. \quad (9)$$

Так как произвольную функцию всегда можно аппроксимировать кусочно-линейной зависимостью, то достаточно рассмотреть лишь два частных случая изменения среднemasсовой температуры воздуха в выработке, когда температура воздуха постоянна и когда температура воздуха изменяется по линейному закону. Для этих законов изменения температуры воздуха стенки выработки можно рассчитать по следующим формулам:

— при постоянной температуре воздуха

$$T_w(\text{Fo}) = t_{a0} + (T_\infty - t_{a0}) \theta_1(\text{Fo}); \quad (10)$$

— при линейном изменении температуры воздуха

$$T_w(\text{Fo}) = t_{a0} + (T_\infty - t_{a0}) \theta_1(\text{Fo}) + \frac{\Delta \bar{t}_a}{\text{Fo}_1} [\text{Fo} - \theta_2(\text{Fo})], \quad (11)$$

где $\text{Fo} = \frac{a\tau}{r_w^2}$, $\text{Fo}_1 = \frac{a\Delta\tau}{r_w^2}$ — числа Фурье, соответствующие периодам времени τ и $\Delta\tau$, t_{a0} — начальное значение температуры рудничной атмосферы.

Выражения для θ -функций, входящих в формулы (10) и (11), имеют вид:

$$\theta_1(\text{Fo}) = 0,405 \text{Bi}^{-1} \int_0^\infty \frac{\exp(-\zeta^2 \text{Fo})}{f(\text{Bi}, \zeta)} d\zeta;$$

$$\theta_2(\text{Fo}) = 0,405 \text{Bi}^{-1} \int_0^\infty \frac{\exp(-\zeta^2 \text{Fo})}{f(\text{Bi}, \zeta) \zeta^2} d\zeta;$$

$$f(\text{Bi}, \zeta) = \zeta \left\{ \left[\frac{\zeta}{\text{Bi}} J_1(\zeta) + J_0(\zeta) \right]^2 + \left[\frac{\zeta}{\text{Bi}} N_1(\zeta) + N_0(\zeta) \right]^2 \right\},$$

где ζ — переменная интегрирования; $\text{Bi} = hr_w$ — число Био.

На основе полученных решений разработан алгоритм совместного решения задачи тепло- и массообмена при конденсации влаги в шахтной сети. Разработанная математическая модель была применена для расчета параметров микроклимата рудника БКПРУ-2 г. Березники Пермского края. Для выполнения расчетов вентиляционная сеть была разбита на 288 элементов и содержала 219 узлов.



Каждая ветвь сети разбивалась на участки длиной 50...250 м, на которых свойства парогазовой смеси (воздуха) не изменялись. Каждый участок "постоянных свойств" разбивался на отрезки длиной 5...10 м, для которых постоянными величинами считались плотности потоков тепла и массы на межфазной границе "воздух — поверхность обнажения горного массива". Рассматривался только теплый период года, который разбивался на 728 интервалов длительностью 6 ч. Для расчета сети был использован метод конечных элементов, который позволяет достаточно просто задавать топологию сети, учитывать режим движения воздуха в отдельных ветвях, изменение свойств жидкости, наличие вентиляторов и естественной тяги. Расчет сети с точностью 0,5 % по узловым давлениям потребовал примерно 16 итераций на одном шаге по времени.

Расчет производился при атмосферном давлении воздуха 101,3 кПа, графики изменения среднесуточных температуры и упругости водяных паров наружного воздуха были составлены для района г. Березники по данным СНиП 23-01-99 "Строительная климатология и геофизика". Среднегодовое значение температуры 0,7 °С, за начало периода принято 15 апреля. В качестве критического тепло-влажностного состояния воздуха в горных выработках была принята температура точки росы. Результаты вычислительных экспериментов позволили выявить закономерности формирования зоны выпадения влаги. Как показано на рис. 1, длина зоны конденсации увеличивается к середине теплого периода года практически до 2000 м, к концу периода она уменьшается. Точка начала конденсации (здесь температура воздуха становилась ниже температуры точки росы) находится на расстоянии 350 м от начала вентиляционного пути в первой декаде мая, к середине летнего периода она смещается на расстояние 750 м.

Таким образом, процесс конденсации в течение всего теплого периода года начинается в выработках околоствольного двора. Точка конца конденсации (здесь температура воздуха вновь начинала превышать температуру точки росы) перемещается с отметки 400...450 м в первой декаде мая на расстояние 2550 м от начала вентиляционного пути ко второй декаде июля. С третьей декады мая до середины июня происходит резкое увеличение зоны конденсации от 200 до 1800 м. Температура и влажностное содержание поступающего в рудник воздуха возрастают и, следова-

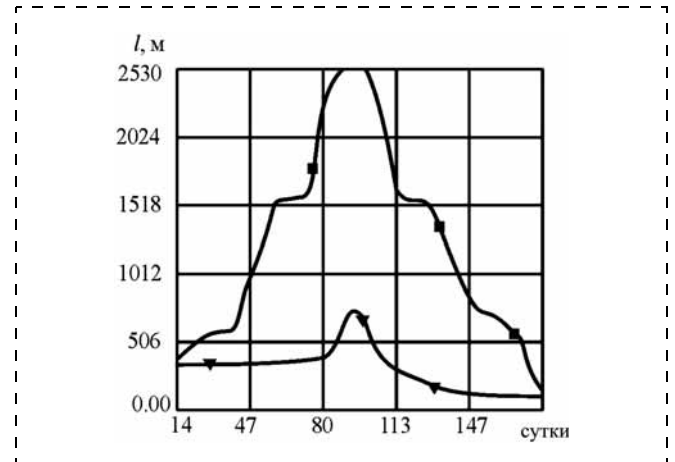


Рис. 1. Зависимость длины участка конденсации влаги в горной выработке от времени (начало отсчета от точки, где температура воздуха становилась ниже температуры точки росы):

▼ — начало конденсации; ■ — завершение конденсации

тельно, теплообмен происходит на более длинном участке вентиляционного пути.

Изменение параметров микроклимата по длине вентиляционного пути в фиксированные моменты времени детально показывает развитие процесса конденсации. На рис. 2 показаны графики изменения среднемассовой температуры воздуха и температура стенки горного массива по длине вентиляционного пути на 30-е сутки (рис. 2, а) и 90-е сутки (рис. 2, б).

При сравнении двух графиков хорошо видно, что наиболее интенсивно процесс теплообмена при конденсации влаги протекает в начале теплого периода года, что характеризуется резким падением температуры поступающего воздуха в воздухоподающем стволе рудника. На рис. 2, а видно, что температура снижается до 2 °С практически на первых 500 м. С течением времени происходит нагрев стенки породного

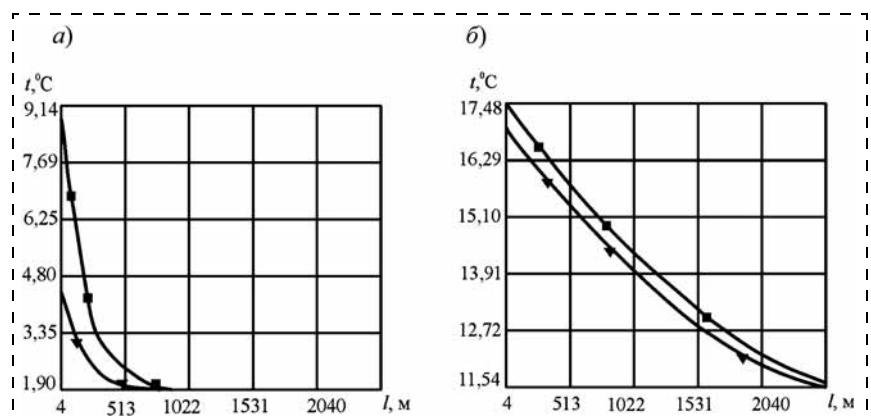


Рис. 2. Изменение среднемассовой температуры воздуха и температуры стенки по длине пути:

а — на 30-е сутки от начала периода (15 мая); б — на 90-е сутки от начала периода (14 июля); ■ — среднемассовая температура смеси; ▼ — температура стенки

массива, если 15 мая температура стенки на входе в рудник равна $4,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, то к середине июля она возрастает до $17,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 2, б). Температура воздуха в середине июля снижается намного медленнее, поэтому выравнивание среднemasсовой температуры воздуха и температуры стенки происходит только после 2000 м, что ведет к затуханию процесса конденсации.

Интенсивность процесса конденсации влаги прежде всего зависит от перепада температур между стенкой выработки и протекающего в ней воздуха. Наибольший перепад температуры характерен для начала теплого периода года, когда прогретый атмосферный воздух соприкасается с поверхностью выработки, охлажденной за зимний период до $2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Однако, как видно из результатов численного эксперимента, что подтверждается натурными наблюдениями, наибольшее количество влаги выпадает в середине июля. Это объясняется тем, что для теплого воздуха характерно более высокое содержание влаги. Поэтому при прочих равных условиях уменьшение на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ температуры теплого воздуха приведет к выпадению из потока большего количества влаги, чем при снижении на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ температуры холодного воздуха.

Изучение изменения параметров микроклимата от времени в фиксированных ветвях показало затухание амплитуды колебания перепада температур и концентраций при движении по вентиляционной сети. Зависимость плотности потока массы от времени для 56-й ветви сети, где наблюдалась конденсация, представлена на рис. 3. Видно, что конденсация в этой ветви происходит только в июле месяце и пик интенсивности конденсации приходится на середину июля.

Применение математической модели для расчета процесса конденсации влаги в руднике

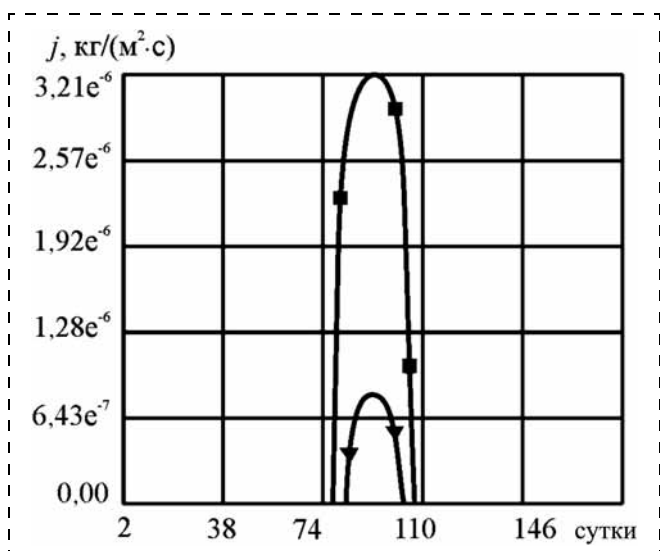


Рис. 3. Зависимость средней интенсивности конденсации от времени для 56-й ветви (2350 м от ствола):

■ — на входе; ▼ — на выходе

БКПРУ-2 позволило подтвердить локальный характер явления конденсации, которая происходит в радиусе 2...2,5 км от околоствольного двора. Установлен эффект "растяжения" зоны конденсации, длина которой увеличивается к середине теплого периода года. Показано, что при незначительной средней интенсивности конденсации $j = 1,7 \cdot 10^{-4}\text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ общее количество выпавшего в теплый период года конденсата составляет 6050 т.

Таким образом, незначительный отток массы из потока воздуха приводит к скоплению большого количества влаги в выработках, что объясняется значительными площадями обнажения массива, гигроскопичностью горных пород и большими объемами подаваемого в рудник воздуха.

Приведенные результаты исследования влияния входных параметров на тепло-влажностный режим выработок показали, что наиболее существенное влияние на процесс конденсации оказывают следующие величины: расход и среднегодовая температура воздуха на входе в сеть; глубина разрабатываемого горизонта и плотность теплового потока, идущего из недр Земли; критическая относительная влажность воздуха, характеризующая гигроскопичность пород. При малых значениях площади поперечного сечения выработок ($S < 20\text{ м}^2$) этот параметр также оказывает существенное влияние на процесс конденсации.

Разработанная математическая модель позволяет прогнозировать количество выпадающей влаги при различных способах обработки рудничного воздуха, оценить эффект таких решений и разработать рекомендации по увеличению эффективности их применения. Изменение параметров на входе в вентиляционную сеть рудника позволяет моделировать различные варианты протекания тепло- и массообменных процессов в горных выработках.

Список литературы

1. Дучев Д. П., Дударь Е. С. Модель процесса конденсации влаги в калийном руднике с учетом турбулентного движения паровоздушной смеси // Математическое моделирование физико-механических процессов: тез. докл. Всерос. конф. молодых ученых. — Пермь, 1999. — С. 64.
2. Дударь Е. С., Мохирев Н. Н. Конденсация влаги при турбулентном движении паровоздушной смеси в вентиляционной сети калийного рудника // VIII Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике 23—28 августа 2001 г. — Пермь, 2001. — С. 240.
3. Дударь О. И., Дударь Е. С., Мохирев Н. Н. Математическая модель процесса конденсации влаги при движении воздуха в вентиляционной сети калийного рудника // Информация, инновации, инвестиции: материалы Всерос. конф. 26—27 ноября. — Пермь, 2003. — С. 163—164.
4. Дударь Е. С., Дударь О. И., Осипенко М. А. К расчету нестационарного конвективного теплообмена на стенках подземных сооружений // Строительство и образование: сб. науч. трудов. — Екатеринбург: Изд-во УГТУ-УПИ, 2009. — Вып. 18. — С. 208—212.
5. Дударь Е. С., Дударь О. И., Качурин Н. М. Влияние аэрологических и геотехнологических параметров на процесс конденсации влаги в вентиляционной сети рудника // Известия ТулГУ. Естественные науки. Серия "Науки о Земле". — Тула, 2010. — Вып. 2. — С. 53—60.

УДК [502.3:005.521]:622.012

Н. М. Качурин¹, д-р техн. наук, проф., **М. С. Комиссаров**², канд. техн. наук, доц.,
О. С. Королева¹

¹ Тульский государственный университет

² Тульский государственный педагогический университет

E-mail: ecology@tsu.tula.ru

Прогноз загрязнения приземного слоя атмосферы горнодобывающими предприятиями

Представлены математические модели диффузии газовых примесей в приземном слое атмосферы от точечных источников пылегазовых выбросов, расположенных на промплощадках горнодобывающих предприятий. Приведены результаты вычислительных экспериментов. Показано, что сравнение результатов вычислительных экспериментов с данными натурных наблюдений свидетельствует об адекватности предложенных математических моделей прогнозирования распространения загрязнителей в атмосфере.

Ключевые слова: атмосфера, пылегазовая примесь, диффузия, математическая модель, горнодобывающее предприятие

Kachurin N. M., Komissarov M. S., Koroleva O. S. Forecasting polluting atmosphere surface layer by mining enterprises

The mathematical models of gas admixtures diffusion at the atmosphere surface layer from point sources located inside mining enterprises industrial area. The results of calculating experiments were shown. It's shown that comparing the results of calculating experiments with field observation data base shows the adequacy of proposed mathematical models for forecasting pollutants diffusion at atmosphere.

Keywords: atmosphere, dust-gas admixture, diffusion, mathematical model, mining enterprise

Загрязнение воздуха приземного слоя атмосферы при добыче и переработке твердых полезных ископаемых происходит в результате пылегазовых выбросов, являющихся следствием различных технологических процессов. При этом аэрологическая модель предприятия минерально-сырьевого комплекса как при открытом, так и при подземном способе разработки месторождения полезных ископаемых представляет собой математическую

модель конвективно-турбулентного диффузионного переноса газовых примесей в атмосфере. Как известно, различают три вида диффузии — молекулярную, конвективную и турбулентную. Интенсивность диффузионного переноса характеризуется величиной диффузионного газового потока. Газовый поток определяют как объем газа, проходящего через единичную площадь в единицу времени: $j = M_T / (St)$, где j — газовый поток; M_T — масса газа, прошедшего через поверхность с площадью S за период времени t . В соответствии с видами диффузии различают и три вида диффузионных газовых потоков — молекулярный, конвективный и турбулентный.

Вектор молекулярного диффузионного потока (j_M) определяют по закону Фика: $j_M = -D_M \text{grad}c$, где D_M — коэффициент молекулярной диффузии примеси; c — концентрация газовой примеси в воздухе, определяемая как масса примеси, содержащейся в единичном объеме загрязненного воздуха. В проекциях на оси координат имеем $j_{Mx} = -D_M \partial c / \partial x$; $j_{My} = -D_M \partial c / \partial y$; $j_{Mz} = -D_M \partial c / \partial z$. Конвективный диффузионный поток (j_K) определяется как $j_K = G_T / S = Gc / S = Vc$, где G_T , G — массовый поток газовой примеси и массовый поток загрязненного воздуха соответственно; V — главный вектор скорости воздушного потока. Проекция конвективного диффузионного потока на оси координат имеют следующий вид: $j_{Kx} = uc$; $j_{Ky} = vc$; $j_{Kz} = wc$, где u , v , w — компоненты вектора V . Турбулентный диффузионный поток определяется также по закону Фика: $j_T = -D_T \text{grad}c$, где D_T — коэффициент турбулентной диффузии примеси, который в общем случае является тензором второго ранга. Следовательно, в проекциях на оси координат можно записать, $j_{Tx} = -D_{Tx} \partial c / \partial x$; $j_{Ty} = -D_{Ty} \partial c / \partial y$; $j_{Tz} = D_{Tz} \partial c / \partial z$, где D_{Tx} , D_{Ty} , D_{Tz} — компоненты тензора D_T . В практических расчетах часто принимают допущение о том, что турбулентная диффузия является однородной и изотропной, тогда $D_T \approx \text{const}$. Задав, таким образом, диффузионные потоки,

можно получить математическую модель загрязнения воздуха в общем виде.

Рассмотрим произвольный объем воздуха Ω , ограниченный с внешней стороны поверхностью S , в котором действует источник с интенсивностью $I = I(x, y, z, t)$. За счет диффузии примесь будет удаляться из объема Ω , проходя через поверхность S . Выделим на этой поверхности малый элемент площади dS (настолько малый, что его кривизну можно пренебречь, а диффузионные потоки в любой его точке можно считать одинаковыми), тогда масса газа, проходящего через этот элемент в единицу времени, будет равна $\mathbf{j}_c dS$, где \mathbf{j}_c — суммарный газовый поток, $\mathbf{j}_c = \mathbf{j}_k + \mathbf{j}_m + \mathbf{j}_t$. Количество газа, прошедшего в единицу времени через всю поверхность S , будет равно $\iint_S \mathbf{j}_c dS$. Разумеется, что внутри объема воздуха Ω количество примеси будет также изменяться. Чтобы определить эти изменения, выделим внутри объема Ω малый объемный элемент $d\Omega$ (настолько малый, что концентрацию примеси в любой его точке можно считать одинаковой и зависящей только от времени). Тогда изменение массы примеси в единицу времени в этом элементарном объеме будет равно $[-\partial c/\partial t + I(x, y, z, t)]d\Omega$, а изменение массы газа в объеме Ω в единицу времени — $\iiint_{\Omega} [-\partial c/\partial t + I(x, y, z, t)]d\Omega$. В соответствии с законом сохранения массы $\iint_S \mathbf{j}_c dS = \iiint_{\Omega} [-\partial c/\partial t + I(x, y, z, t)]d\Omega$. Используя формулу Остроградского-Гаусса, можно записать, что $\iiint_{\Omega} [\partial c/\partial t + \operatorname{div} \mathbf{j}_c - I(x, y, z, t)]d\Omega = 0$. Но этот интеграл может быть равен нулю только в том случае, если подынтегральная функция равна нулю, т. е.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \operatorname{div} \mathbf{j}_c - I(x, y, z, t) = 0. \quad (1)$$

Уравнение (1) представляет собой уравнение неразрывности диффузионного газового потока. Оно выражает в математическом виде закон сохранения массы при диффузии различных примесей. Если представить вектор суммарного диффузионного потока через его составляющие и подставить их в уравнение (1), то получим уравнение:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(c\mathbf{u}) + \frac{\partial}{\partial y}(c\mathbf{v}) + \frac{\partial}{\partial z}(c\mathbf{w}) = \\ & = \frac{\partial}{\partial x}[(D_m + D_{tx})\frac{\partial c}{\partial x}] + \frac{\partial}{\partial y}[(D_m + D_{ty})\frac{\partial c}{\partial y}] + \\ & + \frac{\partial}{\partial z}[(D_m + D_{tz})\frac{\partial c}{\partial z}] + I(x, y, z, t). \end{aligned} \quad (2)$$

Уравнение (2) является основным уравнением диффузии в атмосфере. Решение этого уравнения для конкретных граничных и начальных условий позволяет получить в явном или численном виде

функцию $c = c(x, y, z, t)$, которая описывает поле концентраций примеси в зоне действия источников загрязнений атмосферного воздуха.

Исходными данными для решения задач атмосферной диффузии являются начальные и граничные условия; ортогональные компоненты скорости ветра \mathbf{u} , \mathbf{v} , \mathbf{w} (\mathbf{u} — запад-восток, \mathbf{v} — север-юг, \mathbf{w} — вертикаль); значения коэффициентов турбулентной диффузии; закономерности, описывающие интенсивность выделения вредных примесей из источников.

Начальные условия задают поле концентрации примеси в рассматриваемом пространстве в начальный момент времени, т. е. при $t = 0$. Начальное условие общего вида записывается следующим образом: $c(x, y, z, 0) = f_0(x, y, z)$. Для определения в явном виде функции начального распределения примеси $f_0(x, y, z)$ требуются специальные исследования, в ходе которых измеряются концентрации вредных примесей в различных точках рассматриваемого пространства [1, 2]. Однако в практических расчетах, как правило, принимают $f_0(x, y, z) = \langle c(x, y, z, 0) \rangle = c_\phi = \text{const}$, где $\langle c(x, y, z, 0) \rangle$ — среднее значение концентрации в рассматриваемом пространстве; c_ϕ — среднее содержание вредной примеси в воздухе, называемое фоновым.

Граничные условия задают поле концентрации или газовые потоки на уровне земной поверхности. Если расположить начало отсчета на этом уровне, то можно сказать, что граничными условиями определяются поля концентраций и газовых потоков при $z = 0$. При решении задач атмосферной диффузии используют три вида граничных условий: первого, второго и третьего рода. Граничное условие первого рода задает поле концентраций на уровне земной поверхности: $c(x, y, 0, t) = \varphi_1(x, y, t)$. В частных случаях функция $\varphi_1(x, y, t)$ может быть равна некоторой постоянной величине.

Граничное условие второго рода определяет поле газовых потоков на уровне земной поверхности, т. е. \mathbf{j}_c при $z = 0$. Так как при $z = 0$ скорость ветра равна нулю, то $\mathbf{u} = \mathbf{v} = \mathbf{w} = 0$ и $\mathbf{j}_k = 0$. Молекулярным газовым потоком обычно пренебрегают, принимая $\mathbf{j}_m = 0$, поэтому рассматриваются только значения \mathbf{j}_c , которые будут численно равны значениям турбулентного газового потока \mathbf{j}_t . Следовательно, граничное условие второго рода задает поле $\mathbf{j}_t(x, y, 0, t)$, т. е. можно записать, что $-D_t(\partial c/\partial z)_{z=0} = \varphi_2(x, y, t)$. В частных случаях функция $\varphi_2(x, y, t)$ может быть равна как некоторой постоянной величине, так и нулю. Граничное условие второго рода определяет закономерность газообмена между воздухом и земной поверхностью. Если $\varphi_2(x, y, t) = 0$, то это означает, что газообмена между воздухом и земной поверхностью нет.



Граничное условие третьего рода определяет закономерность газообмена между воздухом и земной поверхностью, если газообмен проходит по закону Ньютона. В соответствии с этим законом выделение примеси (или ее поглощение) с рассматриваемой поверхности пропорционально разности концентраций примеси в воздухе и на уровне этой поверхности, т. е. пропорционально величине $c - c(x, y, 0, t)$. Граничное условие третьего рода имеет следующий вид: $-D_T(\partial c/\partial z)_{z=0} + k_T[c - c(x, y, 0, t)] = \varphi_3(x, y, t)$, где k_T — коэффициент газообмена, определяемый экспериментально. Физический смысл коэффициента газообмена заключается в том, что он показывает, какое количество примеси выделяется (или поглощается) с единичной площади поверхности в единицу времени при разности концентраций, равной единице. Функция $\varphi_3(x, y, t)$ также может равняться некоторой постоянной величине или нулю.

Повторяемость и среднюю скорость ветра по направлениям, а также повторяемость штилей за январь и июль месяцы для различных городов и районов России следует принимать по СНиП 23-01-99 "Строительная климатология и геофизика". Задача определения коэффициентов турбулентной диффузии является достаточно сложной самостоятельной задачей [3]. В соответствии с данными М. Е. Берлянда [3, 4] средние значения горизонтальных коэффициентов турбулентной диффузии вычисляются по формуле: $\langle D_{Tx} \rangle \approx \langle D_{Ty} \rangle = k_0 \langle u \rangle$, где

$\langle u \rangle = \sqrt{u^2 + v^2}$ — горизонтальная составляющая скорости ветра, а величина коэффициента k_0 меняется от 0,1 до 1 м в зависимости от степени устойчивости атмосферы.

При штиле тоже используется зависимость коэффициента горизонтальной турбулентной диффузии от скорости ветра, но при малых значениях $\langle u \rangle$. При этом средние значения горизонтальных коэффициентов вертикальной турбулентной диффузии $\langle D_{Tz} \rangle$ изменяются, как правило, в пределах от 10 до 30 м²/с. Очевидно, что решение уравнения диффузии примеси в атмосфере (2) получить весьма непросто. Поэтому в каждом конкретном случае это уравнение, вводя физически обоснованные допущения, желательно упростить. Такой подход позволяет эффективно использовать численные методы решения уравнений в частных производных.

В ряде случаев можно получить и аналитические решения уравнения (2). Наиболее простой ситуацией является распространение вредной примеси от произвольного источника при постоянных значениях ортогональных компонент скорости ветра и коэффициентов турбулентной диффузии. К этой ситуации можно свести практически любые условия загрязнения атмосферы на промплощадке действующего предприятия минерально-сырьевого комплекса

С учетом этих допущений уравнение (2) примет следующий вид:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} = \\ = \langle D_{Tx} \rangle \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \langle D_{Ty} \rangle \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \langle D_{Tz} \rangle \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} + I(x, y, z, t). \quad (3)$$

Краевые условия в этом случае могут быть представлены следующим образом. Начальное значение концентрации загрязнителя в приземном слое атмосферы целесообразно принять равным нулю, т. е. $c(x, y, z, 0) = 0$. Если в реальных условиях фоновая концентрация отличается от нуля, в дальнейшем фоновая концентрация будет суммироваться с расчетной концентрацией, соответствующей однородному начальному условию. Газообмен между атмосферой и земной поверхностью отсутствует, следовательно, можно задать граничное условие второго рода в следующем виде: $-D_T(\partial c/\partial z)_{z=0} = 0$.

Таким образом, математическое описание предприятия минерально-сырьевого комплекса как объекта загрязнения окружающей среды может быть представлено в виде агрегированной модели, основывающейся на уравнении (3) и однородных краевых условиях. Установление ограничений на выбросы загрязнителей (предельно допустимых выбросов) осуществляется таким образом, чтобы концентрация вредного вещества в любой точке рассматриваемой области не превышала ПДК. Концентрация загрязнителя рассчитывается на основе аналитического решения уравнения диффузии при постоянных значениях ортогональных компонент скорости ветра и коэффициентов турбулентной диффузии.

Такой подход позволяет на первом этапе решить задачи определения предельно допустимых выбросов для всех предприятий, оказывающих воздействие на окружающую среду в регионе, а затем осуществить решение задачи определения оптимальных природоохранных капиталовложений для каждого предприятия. Используя численные реализации обоснованной математической модели загрязнения атмосферы для системы "предприятия минерально-сырьевого комплекса — окружающая среда", сформулируем задачу экономического компромисса и нормы функционирования (так называемый "институт согласия").

Одной из наиболее распространенных ситуаций загрязнения приземного слоя атмосферы является распространение вредной примеси от одиночного точечного источника, расположенного на промплощадке горнодобывающего предприятия. При постоянных значениях ортогональных компонент скорости ветра и коэффициентов турбулентной диффузии, математическая модель диф-

фузии пылегазовых примесей от точечного источника загрязнения воздуха будет иметь следующий вид:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} = \langle D_{Tx} \rangle \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \langle D_{Ty} \rangle \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \langle D_{Tz} \rangle \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} + I_0 \langle D_{Tx} \rangle \langle D_{Ty} \rangle \langle D_{Tz} \rangle^{-0,5} \delta(x) \delta(y) \delta(z - H), \quad (4)$$

$$c(x, y, z, 0) = 0, \quad -\langle D_{Tz} \rangle \left(\frac{\partial c}{\partial z} \right)_{z=0} = 0, \quad (5)$$

где $c(x, y, z, t)$ — концентрация пылегазовой примеси, являющаяся функцией пространственных координат x, y, z и времени t ; u, v, w — компоненты вектора скорости ветра; $\langle D_{Tx} \rangle, \langle D_{Ty} \rangle, \langle D_{Tz} \rangle$ — осредненные значения компонент тензора коэффициента турбулентной диффузии примеси в атмосферном воздухе; I_0 — масса загрязнителя, выделяющегося в единицу времени в точке с координатами $(0, 0, H)$; H — высота расположения точечного источника над поверхностью Земли; $\delta(\dots)$ — дельта-функция Дирака соответствующего аргумента.

Уравнение (1) решалось методом изображений [4, 5]. Решения были получены для различных режимов конвективного переноса, обусловленного скоростью ветра.

Стационарное распределение вредных примесей в воздухе при штиле. Такое поле концентраций наблюдается, если равны значения интенсивности выделения вредных примесей и их турбулентного переноса. В этом случае устанавливается динамическое равновесие, которое характеризуется полем концентрации, не зависящим от времени. Уравнение (1) для таких условий упрощается и его решение для условий (2) имеет следующий вид:

$$c(x, y, z) = 7,96 \cdot 10^{-2} I_0 \langle D_{Tx} \rangle \langle D_{Ty} \rangle \langle D_{Tz} \rangle^{-0,5} (a^{-1} + b^{-1}), \quad (6)$$

где $a = [x^2 \langle D_{Tx} \rangle^{-1} + y^2 \langle D_{Ty} \rangle^{-1} + (z + H)^2 \langle D_{Tz} \rangle^{-1}]^{-0,5}$,
 $b = [x^2 \langle D_{Tx} \rangle^{-1} + y^2 \langle D_{Ty} \rangle^{-1} + (z + H)^2 \langle D_{Tz} \rangle^{-1}]^{-0,5}$.

Нестационарное распределение вредных примесей в атмосфере при штиле. Нестационарное распределение примеси в воздухе при скорости ветра, равной нулю, наблюдается в течение начального периода времени с момента действия источника выделения вредных примесей. Затем поле концентраций стремится к динамическому равновесию, которое является стационарным состоянием поля концентраций (3). Решение краевой задачи (1)–(2) для случая нестационарного распределения

вредных примесей в атмосфере при штиле получено в следующем виде:

$$c(x, y, z, t) = 2,245 \cdot 10^{-2} \langle D_{Tx} \rangle \langle D_{Ty} \rangle \langle D_{Tz} \rangle^{-0,5} \times \int_0^t I_0(\tau) (t - \tau)^{-1,5} \{ \exp[-0,25(t - \tau)^{-1} (x^2 \langle D_{Tx} \rangle^{-1} + y^2 \langle D_{Ty} \rangle^{-1} + (z - H)^2 \langle D_{Tz} \rangle^{-1})] + \exp[-0,25(t - \tau)^{-1} (x^2 \langle D_{Tx} \rangle^{-1} + y^2 \langle D_{Ty} \rangle^{-1} + (z + H)^2 \langle D_{Tz} \rangle^{-1})] \}, \quad (7)$$

где τ — переменная интегрирования.

Если мощность источника не меняется во времени, то формула (7) принимает вид:

$$c(x, y, z) = 8 \cdot 10^{-2} I_0 \langle D_{Tx} \rangle \langle D_{Ty} \rangle \langle D_{Tz} \rangle^{-0,5} \times [a^{-1} + b^{-1} - a^{-1} \operatorname{erf}(0,5at^{-0,5}) - b^{-1} \operatorname{erf}(0,5bt^{-0,5})]. \quad (8)$$

Стационарное распределение вредных примесей в атмосфере при наличии ветра. Как при штиле, так и при наличии ветра может возникать стационарное поле концентраций вредных примесей в атмосфере. В этом случае в уравнении (4) $\partial c / \partial t = 0$, а его решение для условий (5) имеет следующий вид:

$$c(x, y, z) = 8 \cdot 10^{-2} q_1 \times \exp[0,5(ux \langle D_{Tx} \rangle^{-1} + vy \langle D_{Ty} \rangle^{-1} + wz \langle D_{Tz} \rangle^{-1})]^{-0,5} \times \{ a^{-1} \exp(-k_1 a) + b^{-1} \exp(-k_1 b) + 2h \int_0^\infty k_2^{-1} \exp(h\xi) \exp[-k_1 k_2] d\xi \}, \quad (9)$$

где ξ — переменная интегрирования; $h = 0,5w$;

$$q_1 = I_0 \langle D_{Tx} \rangle \langle D_{Ty} \rangle \langle D_{Tz} \rangle^{-0,5} \exp(0,5wH \langle D_{Tz} \rangle);$$

$$k_1 = 0,5(u^2 \langle D_{Tx} \rangle^{-1} + v^2 \langle D_{Ty} \rangle^{-1} + w^2 \langle D_{Tz} \rangle^{-1})^{0,5};$$

$$k_2 = [x^2 \langle D_{Tx} \rangle^{-1} + y^2 \langle D_{Ty} \rangle^{-1} + (z + \xi + H)^2 \langle D_{Tz} \rangle^{-1}]^{0,5}.$$

Нестационарное распределение вредных примесей в атмосфере при наличии ветра. При нестационарном распределении примеси в воздухе ее концентрация зависит не только от пространственных координат, но и от времени. В этом случае необходимо решать уравнение (4) для условий (5) без каких-либо упрощений. Решение уравнения (4) для условий (5) имеет вид:

$$c(x, y, z) = 2,245 \cdot 10^{-2} \exp(-k_1^2 t) \int_0^t q_1(t) (t - \tau)^{-1,5} \exp(k_1^2 \tau) \times \{ \exp[-0,25a^2(t - \tau)^{-1}] + \exp[-0,25b^2(t - \tau)^{-1}] +$$



$$+ 2h \int_0^{\infty} \exp(h\eta) \exp[-0,25(t - \tau)^{-1}(x_1^2 + y_1^2 + (z_1 + H_1 + \eta)^2)] d\eta d\tau, \quad (10)$$

где $x_1 = x \langle D_{Tx} \rangle^{-0,5}$; $y_1 = y \langle D_{Ty} \rangle^{-0,5}$; $z_1 = z \langle D_{Tz} \rangle^{-0,5}$; $H_1 = H \langle D_{Tz} \rangle^{-0,5}$; η — переменная интегрирования.

Упрощенные формулы для практического применения. Зависимости (6)—(10) сравнительно сложны для практических расчетов и содержат несобственные интегралы, что существенно затрудняет их практическое применение. Поэтому целесообразно вести некоторые физически обоснованные допущения для их упрощения. Вертикальную составляющую скорости w примем равной нулю. Следует отметить, что это — общепринятое приближение, обусловленное тем, что вертикальная составляющая скорости на два-три порядка меньше горизонтальной. Полагая, что система координат выбрана таким образом, что ось Ox совпадает с направлением ветра, можно положить, что также $v = 0$.

С учетом этих допущений зависимость (9) примет вид:

$$c(x, y, z) = 7,96 \cdot 10^{-2} I_0 (\langle D_{Tx} \rangle \langle D_{Ty} \rangle \langle D_{Tz} \rangle)^{-0,5} \times \{ a^{-1} \exp[0,5u \langle D_{Tx} \rangle^{-0,5} (x \langle D_{Tx} \rangle^{-0,5} - a)] + b^{-1} \exp[0,5u \langle D_{Tx} \rangle^{-0,5} (x \langle D_{Tx} \rangle^{-0,5} - b)] \}. \quad (11)$$

Очевидно, что при $u = 0$ получим поле концентраций примеси, заданное зависимостью (6). Приняв указанные допущения, поле концентраций примеси в атмосфере (10) можно представить в следующем виде:

$$c(x, y, z, t) = 2,245 \cdot 10^{-2} I_0 (\langle D_{Tx} \rangle \langle D_{Ty} \rangle \langle D_{Tz} \rangle)^{-0,5} \times \exp(-0,25u^2 \langle D_{Tx} \rangle^{-1} t) \int_0^t (t - \tau)^{-1,5} \times \exp(-0,25u^2 \langle D_{Tx} \rangle^{-1} \tau) \{ \exp[-0,25a^2(t - \tau)^{-1}] + \exp[-0,25b^2(t - \tau)^{-1}] \} d\tau. \quad (12)$$

Если принять в формуле (12) $u = 0$, то получим зависимость (7). В случае нескольких источников выбросов концентрация вредной примеси равна суперпозиции концентраций от единичных источников [6]. Пусть $r_i = (x_i, y_i)$ — горизонтальные координаты i -го источника выбросов высотой H_i и мощностью I_i , $i = 1, \dots, n$. Тогда в зависимости для определения концентрации вредного вещества (6)—(10) и в формулы (11) и (12) вместо значений x и y следует подставлять значения $(x - x_i)$ и $(y - y_i)$, а вместо значений H и I , значения H_i и I_i соответственно. Тогда общая концентрация вредных

примесей от n источников будет определяться по формуле:

$$c(x, y, z, t) = \sum_{i=1}^n c_i(x, y, z, t), \quad (13)$$

где $c_i(x, y, z, t) = c(x - x_i, y - y_i, z - z_i, t)$.

Приблизительно исследование особенностей атмосферной диффузии легкой примеси в приземном слое воздуха может быть выполнено на основании приведенного выше решения стационарной задачи при наличии ветра при граничном условии (5). Для этого случая концентрация от точечного источника описывается формулой (11). График концентрации на высоте наблюдения $z = 1$ м для случая точечного источника, расположенного на высоте $H = 100$ м интенсивностью $I = 1$ г/с при $u = 4$ м/с, $k_0 = 0,5$ м, $\langle D_{Tz} \rangle = 20$ м²/с представлен на рис. 1.

Характерной особенностью распределения наземной концентрации $c(x, y, 0)$ по оси x (т. е. при $y = 0$) является наличие максимума ее c_T на расстоянии x_T от источника. Действительно, из формулы (11) следует, что наибольшая концентрация достигается при $y = 0$, т. е. на оси x . От оси x в поперечном направлении y концентрация убывает симметрично по экспоненциальному закону, причем с ростом x это убывание замедляется. Основная часть вредной примеси, таким образом, сосредоточена в сравнительно узкой струе примеси (или факеле), ось которой соответствует $y = 0$.

Характер изменения концентрации примеси с расстоянием x существенно зависит от уровня z , к которому она относится. У земной поверхности на некотором расстоянии x_T от источника отмечается максимальное значение концентрации c_T . С ростом z максимум концентрации примеси смещается к ис-

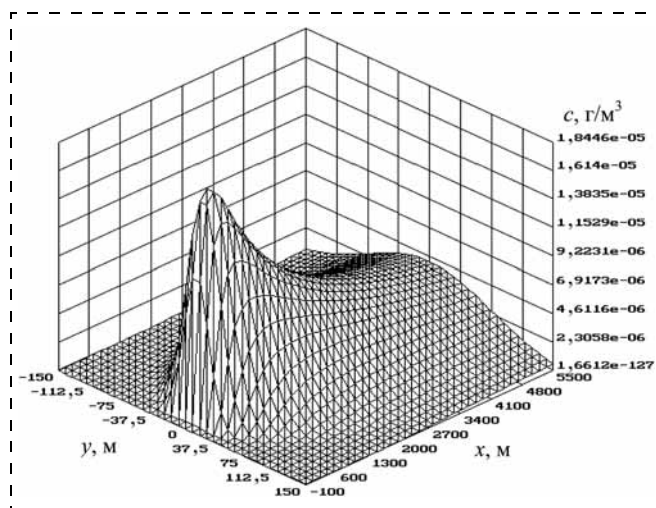


Рис. 1. График концентрации вредной примеси в приземном слое атмосферы от точечного источника

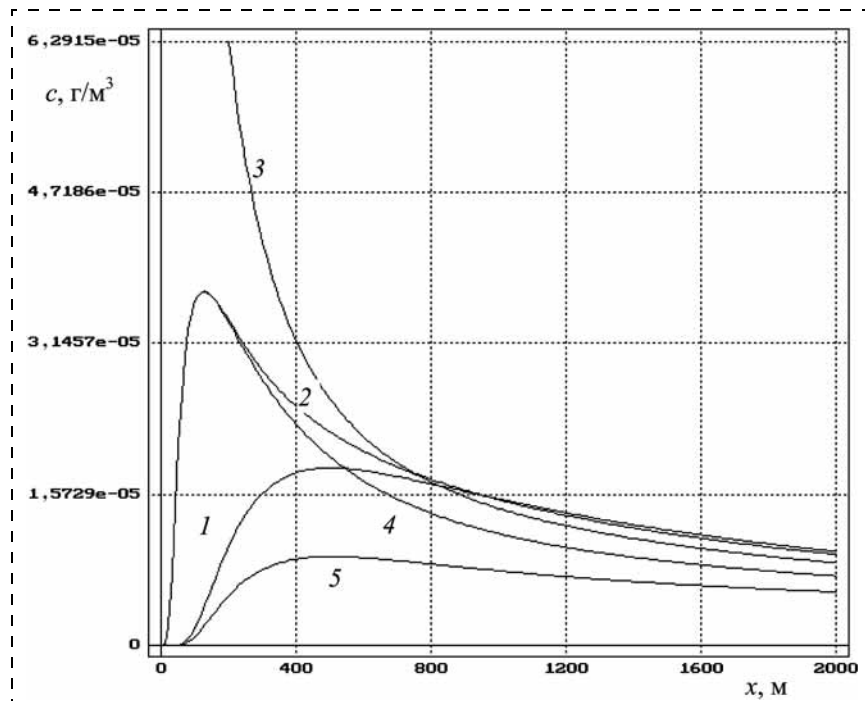


Рис. 2. Зависимость концентрации вредной примеси от расстояния до источника выброса загрязнителя на различной высоте:

1 – $z = 0$ м; 2 – $z = 50$ м; 3 – $z = 100$ м; 4 – $z = 150$ м; 5 – $z = 200$ м

точнику. На уровне выброса примеси $z = H$ ее концентрация монотонно убывает с увеличением x . На более высоких уровнях снова наблюдается максимум концентрации примеси на некотором расстоянии x . На рис. 2 представлены кривые, определяющие зависимость концентрации примесей от x на разных уровнях высоты z в сечении $y = 0$. По

данным этих расчетов можно также проследить за вертикальным профилем концентрации примеси в зависимости от расстояния до источника. На малых расстояниях x максимум по высоте отмечается примерно на уровне источника $z = H$ и профиль концентрации по отношению к этому уровню почти симметричен. Постепенно с увеличением x максимум концентрации примеси (ось факела) снижается, а после некоторого расстояния x он достигается у земной поверхности. Начиная с этого расстояния, концентрация примеси убывает с ростом z , причем в нижнем слое медленнее, а в верхнем — быстрее.

На рис. 3 представлены график и изолинии концентрации примеси на высоте наблюдения $z = 1$ м для случая трех точечных источников, расположенных в точках $r_1 = (0, 0)$, $r_2 = (1000, 0)$, $r_3 = (500, 100)$ на высоте $H_1 = H_2 = H_3 = 100$ м, интенсивностью $I_1 = I_2 = I_3 = 1$ г/с при

$u = 4$ м/с, $k_0 = 0,5$ м, $\langle D_{Tz} \rangle = 20$ м²/с.

Сравнение результатов вычислительных экспериментов с данными натурных наблюдений осуществлено для условий промплощадки рудника "Гипс-Кнауф". В качестве источника выбросов рассматривался одиночный точечный источник — труба котельной. Пробы воздуха отобраны на рас-

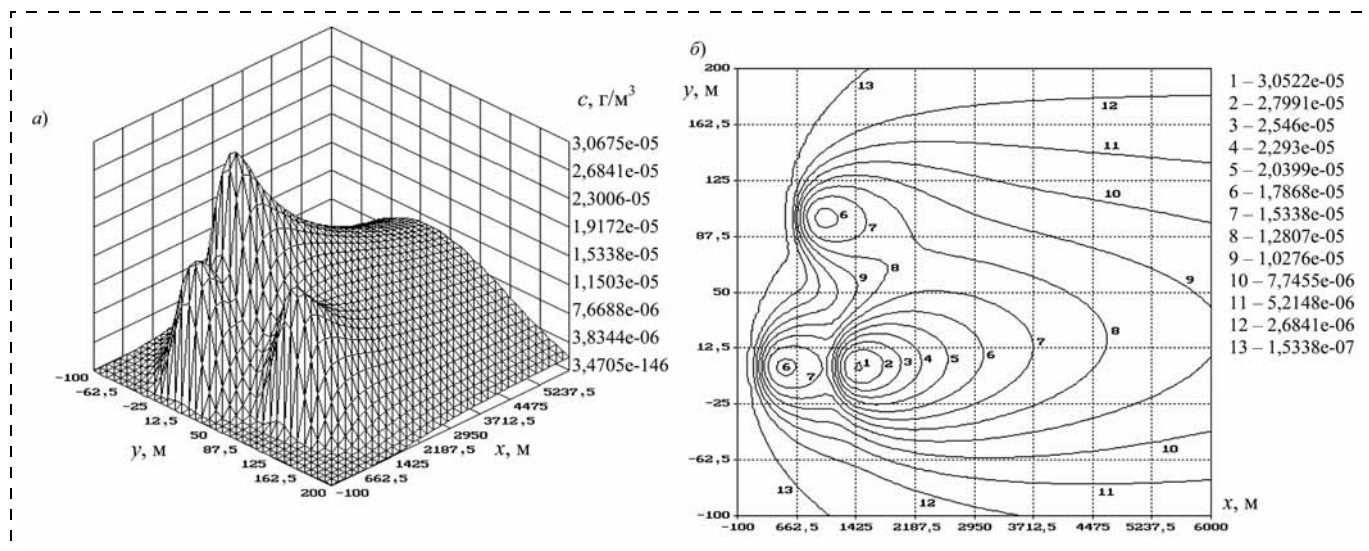


Рис. 3. График (а) и линии уровня (б) концентрации вредной примеси от трех точечных источников в приземном слое атмосферы



стояниях 350...2000 м от источника пылегазовых выбросов. Определялось содержание оксида углерода, оксидов азота и диоксида серы в приземном слое атмосферы. Относительные отклонения составили: 18...22 % — для CO; 14...25 % — для NO₂; 15...31 % — для SO₂. Наибольшие отклонения наблюдались на расстояниях 1700...2000 м от источника. В целом результаты проверки свидетельствуют об удовлетворительной сходимости результатов вычислительных экспериментов с данными натурных наблюдений.

Источник 2 расположен в зоне факела источника 1, и максимум суммарной концентрации примеси в этом случае больше, чем максимум концентрации для одиночного источника с такими же параметрами.

Таким образом, для переноса вредных примесей в атмосфере путем диффузии получены аналитические решения уравнения диффузии для конкретных граничных и начальных условий, что позволяет представить в явном или численном виде функцию, которая описывает поле концентраций примеси в зоне действия источников загрязнений атмосферного воздуха на территории горного отвода действующего горнодобывающего предприятия. Наиболее простой ситуацией является распространение вредной примеси от оди-

ночного точечного источника при постоянных значениях ортогональных компонент скорости ветра и коэффициентов турбулентной диффузии. В этом случае удается получить аналитическое решение уравнения диффузии. В случае нескольких источников выбросов концентрация примеси равна суперпозиции концентраций от единичных источников. Сравнение результатов вычислительных экспериментов с данными натурных наблюдений свидетельствует об адекватности предложенных математических моделей прогнозирования распространения загрязнителей в атмосфере.

Список литературы

1. Внуков А. К. Защита атмосферы от выбросов энерго-объектов. — М.: Энергоатомиздат. — 1992. — 176 с.
2. Тищенко В. Ф. Охрана атмосферного воздуха. — М.: Химия. — 1991. — 362 с.
3. Берлянд М. Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. — Л.: Гидрометеоздат. — 1975. — 448 с.
4. Будак Б. М., Самарский А. А., Тихонов А. Н. Сборник задач по математической физике. — М.: Наука, 1972. — 688 с.
5. Владимиров В. С. Уравнения математической физики. — М.: Наука, 1976. — 528 с.
6. Марчук Г. И. Математическое моделирование в проблеме охраны окружающей среды. — М.: Наука, 1982. — 320 с.

УДК 502.12:[622.012:005.416](470.312)

В. А. Потапенко, д-р техн. наук, проф., ЗАО "Подмосковный научно-исследовательский угольный институт", г. Новомосковск, Тульская область
E-mail: ecology@tsu.tula.ru

Экологические последствия ликвидации угольных шахт в Тульской области

Рассмотрены предварительные результаты экологического мониторинга на ликвидированных шахтах в Тульской области. Выявлено влияние ликвидации горных выработок на геомеханические и гидродинамические процессы в массиве горных пород и качество подземных вод.

Ключевые слова: шахта, ликвидация, экологический мониторинг, подземные воды, техногенные нарушения

Potapenko V. A. Environmental consequences of liquidating coal mines in Tula region

Tentative results of environmental monitoring liquidated mines in Tula Region were discussed. Influencing liquidation of mine workings upon geomechanical and hydromechanical processes in rock massif and underground water was ascertained.

Keywords: mine, liquidation, environmental monitoring, underground water, anthropogenic malfunction

В Тульской области в процессе реструктуризации угольной промышленности были ликвидированы все угольные шахты, кроме шахты "Подмосковная" в Веневском районе.

Добыча угля на этих шахтах производилась на месторождениях со сложными горно-геологическими и гидрогеологическими условиями. К ним относятся, прежде всего, большая изменчивость и непостоянство залегания углевмещающих пород, большая их обводненность при наличии напорных вод с почвы угольного пласта и обводненных песков и известняков, залегающих в его кровле. При этом в большинстве случаев между подугольными и надугольными водоносными горизонтами имеется гидравлическая связь. В этих условиях добыча угля велась при выполнении водозащитных мероприятий. Водоносные горизонты осушались, как правило, с помощью водопонижающих скважин и забивных фильтров до уровней ниже прорывоопасных.

Закрытие угольных шахт осуществлялось с 1993 по 2005 г. Из 22 ликвидированных шахт восемь было закрыто по причине отработки основных запасов, а 14 — как особо убыточные предприятия. В восьми шахтах ликвидация горных выработок производилась традиционными методами: закладкой, обрушением, заиливанием и засыпкой горных выработок. В 14 шахтах горизонтальные выработки ликвидировались способом самозатопления путем прекращения откачки подземных вод водопонижающими скважинами и подземными водоотливами. При этом выработки главных направлений в пределах охранных целиков закрывались горной породой.

В результате прекращения откачки подземных вод восстанавливаются уровни водоносных горизонтов выше отметок залегания угольного пласта, что приводит к естественному затоплению горных выработок. Процесс восстановления уровней может быть длительным в зависимости от горно-геологических и гидрогеологических факторов. При этом возможно загрязнение подземных вод, которые являются единственным источником водоснабжения населения Тульской области.

Анализируя состояние гидрогеологической среды на полях закрывающихся шахт Подмосковного угольного бассейна, их можно разделить на три группы по важности экологических проблем.

I группа. Шахтные поля, на площади которых эксплуатировали водопонижающие скважины и в

непосредственной близости к ним расположены месторождения подземных вод с утвержденными запасами, на которых функционируют водозаборы для обеспечения населения хозяйственно-питьевой водой.

II группа. Шахтные поля, на площади которых эксплуатировали водопонижающие скважины, откачивающие воды по качеству, отвечающему требованиям СанПиН для питьевого водоснабжения. Запасы этих вод не утверждены, но могут быть использованы в целях восполнения возникшего дефицита в хозяйственно-питьевой воде в расположенных рядом шахтерских населенных пунктах.

III группа. Шахтные поля с водоносными горизонтами, имеющими небольшие запасы воды или расположенные вдали от хозяйственных водозаборов.

К I группе шахт относятся:

- Шахта "Западная", расположенная вблизи Троснянского, Воздремковского и Головеньковского водозаборов, обеспечивающих хозяйственно-питьевой водой город Щекино и АО "Щекиназот";
- Шахты "Дубовская", "Майская", "Смородинская", "Россошинская", в непосредственной близости которых расположены Россошинский, Любовский и Люторический водозаборы, обеспечивающие водой город Узловая; водозаборы АО "Кран", поселков Майский, Брусянский и Дубовка;
- Шахта "Владимирская", находящаяся вблизи Оленьковского и Липковского водозаборов, снабжающих водой города Киреевск и Липки.

Ко II группе относятся шахты "Бельковская", "Сеченская", "Приупская", "Васильевская", "Комсомольская", "Липковская".

На шахтах I группы в период эксплуатации складывались разные условия взаимодействия между системой скважин водопонижения и артезианских скважин хозяйственно-питьевого водоснабжения. В результате откачки воды этими разными по назначению скважинами формировались две, а иногда и более локальные депрессионные воронки в естественном, не нарушенном этими системами, потоке подземных вод. После остановки водопонижающих скважин естественный поток восстанавливается.

При расположении артезианских скважин ниже шахтного поля относительно направления движения подземных вод в естественных условиях после прекращения работы водопонижающих сква-



жин происходит загрязнение подземных вод по направлению потока.

Если артезианские скважины расположены выше шахтного поля относительно направления движения подземных вод, то после прекращения действия водопонижающих скважин и восстановления уровней воды на шахтном поле до естественных величин, влияние загрязненных шахтных вод на водозабор хозяйственной воды маловероятно или незначительно.

Кроме того, ликвидация выработок обрушением и затоплением из-за сравнительно неглубокого залегания горных выработок (30...120 м) приводит в сдвигению горных пород, карстообразованию и изменению дневной поверхности за счет суффозионных процессов. Характер и параметры сдвижения зависят от размеров выработок, структурных особенностей массива, физико-механических свойств пород, глубины расположения выработок и напоров воды в водоносных горизонтах. На поверхности они могут проявляться в виде оседания, трещин, провалов. В массиве — перетоком воды из верхних водоносных горизонтов в нижние, что может повлиять на качество воды, используемой для хозяйственно-питьевого водоснабжения населения.

Таким образом, необходимо наблюдение за состоянием геологической и гидрогеологической среды с целью предотвращения загрязнения подземных вод, используемых в первую очередь для водоснабжения населения.

По заданию государственного предприятия по реструктуризации угольной промышленности (ГУРШ) Подмосковным НИУИ в 2001 г. был разработан рабочий проект комплексного экологического мониторинга последствий закрытия угольных шахт в Тульской области. Для его осуществления создано ЗАО "Центрэкомониторинг".

Рабочий проект предусматривал организацию геомеханического и гидродинамического экомониторинга. При геомеханическом мониторинге изучаются техногенные преобразования массива горных пород и деформации дневной поверхности, при гидродинамическом — изменения уровней, потока и химического состава подземных вод.

Наблюдение за геомеханическими процессами в пределах горного отвода всех ликвидированных шахт организовано на маршрутах выработок главных направлений с отходом от них по отработанным площадям на 300...400 м.

При маршрутных исследованиях выявлялись и фиксировались нарушения земной поверхности в пределах горных отводов исследуемых шахт; устанавливались размеры, формы и время появления техногенных нарушений; определялось местоположение техногенных нарушений относительно горных выработок; оценивалась степень опасности выявленных нарушений.

В результате обследований за время наблюдений выявлено следующее.

На поверхности отработанных площадей при охране выработок целиками угля образованы чередующиеся понижения и выступы. При отсутствии стоков поверхностных вод происходит образование заболоченных участков или даже водоемов. С течением времени такие пониженные места зарастают кустарником. Эти площади выведены из сельскохозяйственного оборота.

На участках шахтных полей, отработанных по бесцеликовой технологии, плавное проседание поверхности малозаметно на существующем рельефе местности и она пригодна для ведения сельхозработ.

Выявлено 178 провалов земной поверхности в виде воронок диаметром 7...20 м и глубиной 2...4 м.

За первые 5 лет наблюдений в год образовывалось 5...10 провалов, а в последующие годы ежегодно 15...21. Ликвидировано путем засыпки 117 провалов объемом 32 200 м³. С 2010 г. засыпка воронок прекращена. В настоящее время на шахтных полях имеется 75 воронок объемом около 10 000 м³, представляющих опасность для населения.

Установлено, что на участках шахтного поля, где осуществлялась закладка породой горных выработок, провалов земной поверхности не происходило. Из 5 шахт, где погашение всех выработок осуществлялось путем извлечения крепи и обрушения кровли, на трех шахтах происходило образование провалов над выработками под склонами оврагов, ручьев и рек. Из 14 шахт, ликвидированных методом затопления, на семи шахтах образовывались провалы земной поверхности над горными выработками.

При ликвидации шахт все горные выработки, имеющие выход на поверхность, были засыпаны породой и их устья перекрыты железобетонными плитами. В настоящее время на 13 шахтах они вскрыты до глубины 10...30 м и расчищены от складочного материала с целью извлечения металлических конструкций. Доступ к ним открыт, что также представляет опасность для населения.

Породные отвалы ликвидированных шахт не подвержены горению, так как в них отсутствуют в большом объеме горючие компоненты. Однако для них характерно значительное выделение пыли, что объясняется непрочностью поверхностной корки отвалов, на которую постоянно действуют температурные колебания и атмосферные осадки. Под влиянием атмосферных осадков образуется породная пульпа, которая из-за отсутствия нагорных канав растекается на сельскохозяйственные угодья и лесные массивы. В настоящее время вследствие этого загрязнено 2970 га плодородных земель. Кроме того, образуются растворы серной кислоты, которые закисляют почву и загрязняют поверхностные воды, имеющие сток в реки бассейна реки Оки.

Для наблюдения за гидродинамическим режимом и изменением химического состава подземных вод на шахтах первой и второй групп создана сеть гидронаблюдательных скважин.

Многолетние наблюдения показали, что уровни подземных вод во всех водоносных горизонтах восстановились до статического уровня, несмотря на переоборудование части водопонижительных скважин в артезианские и бурение новых артезианских скважин на шахтах "Западная", "Дубовская", "Комсомольская" для водоснабжения населения городов Щекино и Узловая.

В 2011 г. отмечен подъем уровней воды практически во всех наблюдательных скважинах: в мезозойском, окском и тульском водоносных горизонтах на 0,3...5,5 м, в упинском — на 0,1...0,4 м.

Восстановление уровней и естественного направления движения подземных вод сопровождается подтягиванием загрязненных вод к действующим водозаборам. Анализ качества воды, взятой из гидронаблюдательных скважин, показывает, что загрязнению шахтными водами подвержены воды упинского водоносного горизонта. Главными загрязняющими составляющими являются

сульфаты, железо, тяжелые металлы, продукты разложения остатков древесины и других материалов, оставленных в горных выработках. Содержание железа в отобранных пробах воды превышает ПДК в 10...20 раз, сухой остаток в 1,2...2 раза, общая жесткость в 2—3 раза. В последние 3 года наблюдается стабилизация показателей качества подземных вод в районах ликвидированных шахт.

По результатам наблюдений можно сделать следующие предварительные выводы:

- процесс восстановления уровней подземных вод на шахтных полях происходит в течение 4—6 лет, в зависимости от гидрогеологических условий;

- в настоящее время отмечено повышение уровней подземных вод практически во всех водоносных горизонтах, так как в результате выемки угля и обрушения вышележащих пород до поверхности водоносные горизонты получили дополнительную гидравлическую связь;

- восстановление уровней подземных вод сопровождается подтягиванием загрязненных шахтных вод к действующим водозаборам, что привело к ухудшению качества воды на водозаборах городов Узловая и Щекино;

- под влиянием атмосферных осадков на породных отвалах (терриконах) образуется породная пульпа, которая стекает на сельскохозяйственные земли и служит источником загрязнения поверхностных водоемов;

- отсутствует контроль за ликвидированными горными выработками, имеющими выход на дневную поверхность, в результате чего они вскрываются и становятся опасными для населения;

- провалы (воронки) земной поверхности над горными выработками образуются как при их ликвидации путем извлечения крепи, так и при затоплении, поэтому необходим постоянный мониторинг для их своевременного обнаружения и устранения.



УДК 622.271.324:[502:164]

Н. М. Качурин¹, д-р техн. наук, проф., **М. С. Комиссаров**², канд. техн. наук, доц.,
Ю. Ю. Дианов¹

¹ Тульский государственный университет

² Тульский государственный педагогический университет

E-mail: ecology@tsu.tula.ru

Экологическая логистика транспортирования полезных ископаемых при открытом способе добычи

Показано, что экологическая логистика транспортирования полезных ископаемых при добыче открытым способом отражает основные закономерности влияния на окружающую среду при перемещении горной массы от забоя до пунктов разгрузки и последующей доставки потребителю. Определено, что в этом случае основным логистическим процессом является транспортирование, а базовым компонентом окружающей среды, на который оказывается негативное воздействие, — атмосфера. Решена задача определения периодичности доставки горной массы к пунктам разгрузки.

Ключевые слова: экологическая логистика, логистическая сеть, логистическая функция, требования к полезному ископаемому, математическая модель, карьер

Kachurin N. M., Komissarov M. S., Dianov Ju. Ju. Environmental logistics of transporting minerals by opencast operation

It's shown that environmental logistics of transporting opencast minerals reflects basic dependences of influencing environment during opencast mining by delivering minerals from working faces to loading points and subsequent moving mineral production to a consumer. Consequently, at this case basic logistic operation is transporting and basic environmental component undergoing negative influence is atmosphere. The problem of periodicity of delivering minerals to load points was solved.

Keywords: environmental logistics, logistical net, logistical function, mineral demand, mathematical model, open pit

Экологическая логистика транспортирования полезных ископаемых при открытых горных работах отражает основные закономерности воздействия на компоненты окружающей среды в процессе доставки горной массы от забоев до погрузочных устройств и дальнейшего перемещения продуктов переработки полезных ископаемых к потребителю. Очевидно, что в экологическом отношении наибольший интерес представляет автомобильный

транспорт, используемый на карьерах и угольных разрезах. Следовательно, основной логистической операцией в данном случае будет транспортирование. А основным компонентом окружающей среды, на который будет оказываться негативное воздействие, является атмосфера. Разумеется, что транспортные потоки полезного ископаемого и продуктов первичной переработки, а также транспортные потоки "порожняка" будут характеризоваться соответствующими значениями эколого-логистических издержек. Эколого-логистические издержки обусловлены затратами на израсходованное топливо и платой за выбросы в атмосферу продуктов сгорания используемого топлива.

Прогнозная оценка спроса на полезные ископаемые в логистической цепи поставок. Анализ статистических данных конъюнктуры спроса на полезные ископаемые показывает, что спрос, как правило, с течением времени возрастает: сначала медленно, затем быстро и, наконец, замедляется по мере насыщения. Следовательно, скорость увеличения спроса пропорциональна обеспеченности и насыщению рынка товарной продукцией (ТП), по которой проводятся маркетинговые исследования. Расчетная схема формирования обеспеченности потребителя добываемыми полезными ископаемыми представлена на рис. 1.

Формально модель динамики обеспеченности товарной продукцией (при условии платежеспособности субъектов рынка) должна определяться скоростями двух противоположных процессов — увеличения необеспеченности полезными ископаемыми конкретного вида и увеличение обеспеченности ими за счет их реализации на рынке. Эти скорости

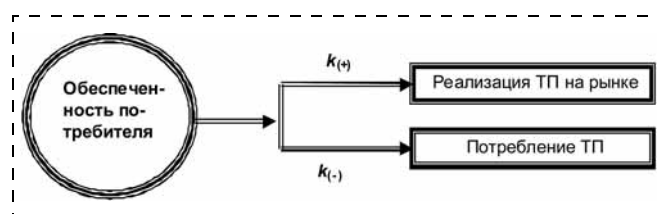


Рис. 1. Расчетная схема формирования обеспеченности потребителя минеральным сырьем

при конкурентной борьбе за материальные и энергетические ресурсы будут иметь следующий вид:

$$W_{(+)} = \frac{dY}{dt} = k_{(+)}(Y_H - Y)Y, \quad (1)$$

$$W_{(-)} = \frac{dY}{dt} = k_{(-)}Y^2, \quad (2)$$

где $W_{(+)}$, $W_{(-)}$ — скорости процессов увеличения необеспеченности полезными ископаемыми конкретного вида и увеличение обеспеченности ими за счет их реализации на рынке соответственно; Y — обеспеченность полезными ископаемыми, представляющая собой долю субъектов рынка, имеющих полезные ископаемые, по которым проводятся маркетинговые исследования; Y_H — начальное значение обеспеченности полезными ископаемыми; $k_{(+)}$, $k_{(-)}$ — константы скоростей процессов увеличения соответственно необеспеченности и обеспеченности полезными ископаемыми конкретного вида.

Очевидно, что существует некое динамическое равновесие, которое проявляется на рынке как стационарное, установившееся состояние спроса на конкретные полезные ископаемые. В этом случае справедливо следующее соотношение: $W_{(+)} = W_{(-)}$. Это позволяет рассчитать предельное значение обеспеченности по формуле:

$$Y_\infty = k_{(+)}Y_H(k_{(+)} + k_{(-)})^{-1}. \quad (3)$$

С учетом соотношений (1) и (2) математическую модель динамики обеспеченности товарной продукцией при конкурентной борьбе за материальные и энергетические ресурсы на внутреннем рынке можно записать в следующем виде:

$$\frac{dY}{dt} = (\varepsilon - \beta Y)Y, \quad (4)$$

где $Y|_{t=0} = Y_H = \text{const}$; $\varepsilon = \beta Y_\infty$, β — параметр модели.

Решая уравнение (4), получим

$$Y(t) = Y_\infty \left[1 + (Y_H Y_\infty^{-1} - 1) \exp(-\varepsilon t) \right]^{-1}. \quad (5)$$

Значения параметров математической модели (5) оценивают путем минимизации модифицированного критерия наименьших квадратов F , который в данном случае имеет следующий вид:

$$F = \sum_{k=1}^N \left\{ Y_k - Y_\infty \left[1 + (Y_H Y_\infty^{-1} - 1) \exp(-\varepsilon t) \right]^{-1} \right\}^2 \lambda_k, \quad (6)$$

где $\lambda_k = \sigma_k^{-2}$, σ_k — среднее квадратическое отклонение.

Параметры математических моделей должны соответствовать условию оптимальности, при котором модифицированный критерий наименьших

квадратов стремится к минимуму, т. е. $F \Rightarrow \min_{\{Y_\infty; \beta\}}$.

Для численной реализации этого условия представим дифференциальное уравнение (4) в разностной форме

$$\frac{\Delta Y_t}{\Delta t} = \varepsilon Y_t - \beta Y_t^2, \quad (7)$$

где ΔY_t — изменение обеспеченности полезными ископаемыми в отчетном периоде t ; Δt — длительность отчетного периода; Y_t — значение обеспеченности полезными ископаемыми, зафиксированное в отчетном периоде t .

Решение задачи оптимизации модифицированного критерия для модели (7) позволило получить следующие расчетные соотношения:

$$\beta = \left(\sum_{t=1}^T Y_t^3 \sum_{t=1}^T Y_t \Delta Y_t - \sum_{t=1}^T Y_t^3 \sum_{t=1}^T Y_t^2 \Delta Y_t \right) \times \left[\left(\sum_{t=1}^T Y_t^3 \right)^2 + \sum_{t=1}^T Y_t^4 \sum_{t=1}^T Y_t^2 \right]^{-1}; \quad (8)$$

$$Y_\infty = \left(\frac{1}{\beta} \sum_{t=1}^T Y_t \Delta Y_t - \sum_{t=1}^T Y_t^3 \right) \left(\beta \sum_{t=1}^T Y_t^2 \right)^{-1}. \quad (9)$$

Формулы (8)—(9) позволяют оценить численные значения параметров математической модели (5). Разработанные математические модели позволяют прогнозировать обеспеченность полезными ископаемыми, для экологически рационального транспортирования которых и планируются те или иные логистические операции. Если принять положение о том, что доля обеспеченности полезными ископаемыми, заданная соотношением (5), будет представлять собой долю транспортируемых полезных ископаемых, то это позволит получить прогнозную информацию, необходимую для оценки эколого-экономической эффективности рассматриваемой логистической функции. Результаты вычислительного эксперимента по оценке динамики спроса полезных ископаемых представлены на рис. 2,

где $\theta = \varepsilon t$, $\omega = \frac{Y_\infty}{Y_H}$.

Обоснование периодичности доставки полезного ископаемого к погрузочным пунктам. Экологически рациональное транспортирование подразумевает эколого-экономическую эффективность этого процесса. Среди технологических характеристик транспортирования существенное влияние на суммарные эколого-логистические издержки оказывает периодичность доставки полезного ископаемого к погрузочным пунктам. Следовательно, эколого-

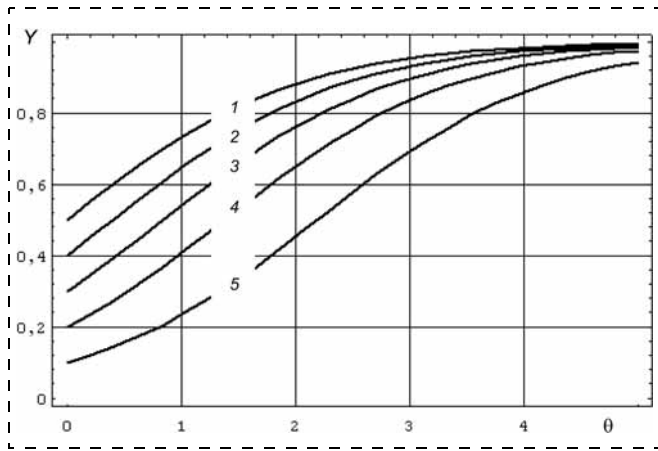


Рис. 2. График зависимости безразмерной функции Y обеспеченности полезным ископаемым от безразмерного времени θ при наличии конкуренции на внутреннем рынке при ω равном: 1 – 0,5; 2 – 0,4; 3 – 0,3; 4 – 0,2; 5 – 0,1

логистическая целесообразность обуславливает необходимость определения оптимального периода, при котором выполняется следующее условие: $\Sigma \text{Cost} \rightarrow \min$, где ΣCost – суммарные затраты на проведение экологических мероприятий, у.е.

Суммарные затраты на проведение экологических мероприятий, которые по существу и являются эколого-экономическими издержками, определяют как плату за загрязнение атмосферы и затраты на мероприятия по снижению выбросов, загрязняющих воздух.

При транспортировании полезного ископаемого действуют две противоположные тенденции. Первая тенденция – это рост стоимости одной транспортной операции при увеличении количества транспортных циклов за счет увеличения затрат на топливо и платы за загрязнение атмосферы. Вторая тенденция проявляется в уменьшении эксплуатационных затрат на одну транспортную операцию, так как увеличивается доход от реализации полезного ископаемого.

Существует оптимальная величина периодичности доставки полезного ископаемого к погруженным пунктам ($T_{\text{тр}}^{\text{opt}}$), как следствие влияния этих противоположных тенденций. Если рассмотреть динамику суммарных удельных затрат на одну транспортную операцию, то, например, изменение удельных доходов, обусловленных увеличением массы перевозимого полезного ископаемого, за время dt будет соответствовать следующему балансовому соотношению: $NdP = Idt - K_c NPdt$, где N – количество транспортных операций; I – интенсивность транспортного потока, количество транспорт-

ных операций/единица времени; K_c – константа скорости получения удельных доходов; P – удельные доходы от одной транспортной операции, у.е./ (транспортная операция · длительность отчетного периода). Из этого балансового соотношения следует дифференциальное уравнение: $dP/dt = IN^{-1} - K_c P$. Введем следующее обозначение: $P_\infty = I/(K_c N)$, тогда дифференциальное уравнение можно записать в виде:

$$\frac{dP}{dt} = K_c(P_\infty - P). \quad (10)$$

Интегрируя уравнение (10) для начального условия $P(0) = P_0$, где $P_0 = \text{const}$ – начальное значение удельных доходов, получим

$$P(t) = P_\infty - (P_\infty - P_0)\exp(-K_c t). \quad (11)$$

Если рассмотреть динамику удельных эксплуатационных затрат, обусловленных увеличением транспортных операций, то за время dt будет наблюдаться следующее изменение этих затрат: $Nd(\text{Cost}) = -K_3 N \text{Cost} dt$, где Cost – удельные эксплуатационные затраты в расчете на одну транспортную операцию, у.е./ (транспортная операция · длительность отчетного периода); K_3 – константа скорости реализации удельных эксплуатационных затрат. Из данного балансового соотношения следует дифференциальное уравнение

$$\frac{d}{dt} \text{Cost} = -K_3 \text{Cost}. \quad (12)$$

Интегрируя уравнение (12) для начального условия $\text{Cost}(0) = \text{Cost}_0$, где $\text{Cost}_0 = \text{const}$ – начальное значение удельных затрат, получим,

$$\text{Cost}(t) = \text{Cost}_0 \exp(-K_3 t). \quad (13)$$

Суммарные затраты можно записать в виде следующей целевой функции: $\Sigma \text{Cost} = P(t) + \text{Cost}(t)$, тогда условие оптимальности будет иметь вид:

$$P_\infty - (P_\infty - P_0)\exp(-K_c t) + \text{Cost}_0 \exp(-K_3 t) \rightarrow \min. \quad (14)$$

Чтобы определить $t = T_{\text{эм}}^{\text{opt}}$, соответствующее условию $\Sigma \text{Cost} = \min$, продифференцируем функцию (14)

$$\frac{d}{dt} \Sigma \text{Cost} = K_c(P_\infty - P_0)\exp(-K_c t) - K_3 \text{Cost}_0 \exp(-K_3 t). \quad (15)$$

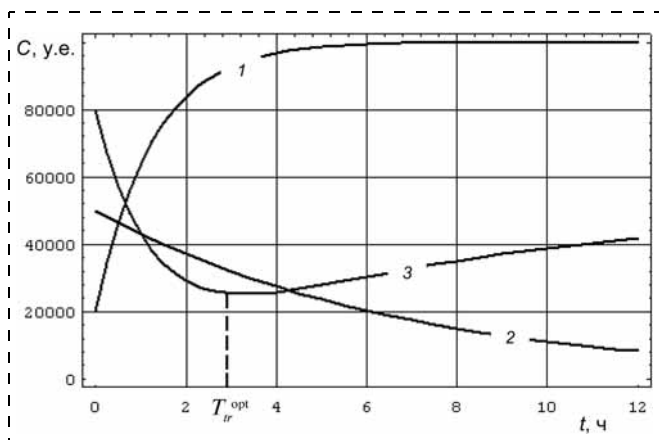


Рис. 3. Экологическая логистическая функция, описывающая динамику формирования суммарных затрат на транспортирование полезного ископаемого к погрузочным пунктам, при $P_{\infty} \cdot 10^{-4} = 10$ у.е., $P_0 \cdot 10^{-4} = 2$ у.е. и $Cost_0 \cdot 10^{-4} = 1,5$ у.е.:

1 – $Cost(t)$; 2 – $P(t)$; 3 – $\Sigma Cost = f(t)$

Условие $\Sigma Cost = \min$ выполняется в точке $t = T_{tr}^{opt}$, где $d\Sigma Cost/dt = 0$, тогда приравняв правую часть соотношения (15) к нулю, получим алгебраи-

ческое уравнение для определения численного значения T_{tr}^{opt} , решая которое получим

$$T_{tr}^{opt} = \frac{1}{K_3 - K_c} \ln \left| \frac{K_3 Cost_0}{K_c (P_{\infty} - P_0)} \right|. \quad (16)$$

Результаты вычислительных экспериментов по оценке динамики экологической логистической функции, описывающей формирование суммарных затрат при транспортировании полезного ископаемого к погрузочным пунктам, представлены на рис. 3.

Рассмотрим конкретный пример. Пусть требуется определить периодичности доставки полезного ископаемого к погрузочным пунктам для следующих исходных данных: $P_{\infty} = 10^5$ у.е.; $P_0 = 2 \cdot 10^4$ у.е.; $Cost_0 = 1,5 \cdot 10^4$ у.е.; $K_3 = 0,06$ 1/ч; $K_c = 0,8$ 1/ч. Расчет по формуле (16) дает следующий результат: $T_{tr}^{opt} = 5,76 = 6$ ч.

Список литературы

1. Миротин Л. Б., Ташбаев Ы. Э., Порошина О. Г. Эффективная логистика. — М.: Экзамен, 2002. — 160 с.
2. Лебедев Ю. Г. Логистика. Теория гармонизированных цепей поставок. — М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. — 448 с.

УДК 502.521:504.5:628.4.047:622.012

Э. М. Соколов, д-р техн. наук, проф., Т. С. Свиридова, канд. техн. наук, доц.,
Тульский государственный университет
E-mail: ecology@tsu.tula.ru

Миграция радионуклидов в почвах при радиоактивном загрязнении горнопромышленного региона

Показана динамика миграции радионуклида в почве, характеризующаяся полем его концентраций, которое моделируется решением одномерного уравнения параболического типа для полубесконечного пространства. Представлен теоретический вертикальный профиль концентраций в виде произведения степенной и экспоненциальной функций для реальных физико-химических условий миграции радионуклидов в почве.

Ключевые слова: радионуклид, цезий-137, авария на ЧАЭС, математическая модель, удельная активность, почва, диффузия

Sokolov E. M., Sviridova T. S. Migrating radionuclide in soils by radioactive polluting mining-industrial region

Dynamic of migrating radionuclide in soil is described by field of their concentration. This field is simulated by solving one-dimensional equation of parabolic type for semi-infinite space, which was getting by zero initial condition and the boundary condition of the third type. Theoretical vertical profile of the concentration can be submitted as multiplying power function by exponential function for real physical-chemical conditions of migrating radionuclide in soil.

Keywords: radionuclide, caesium-137, accident in the Chernobyl Atomic Power Station, mathematical model, specific activity, soil, diffusion



Прогноз радиоэкологической ситуации на территории горнопромышленного региона основывается на двух основных теоретических положениях НКДАР ООН, которые хорошо согласуются со всеми имеющимися данными. Согласно первому положению, не существует никакой пороговой дозы, за которой отсутствует риск заболевания раком. Любая сколь угодно малая доза увеличивает вероятность заболевания раком для человека, получившего эту дозу, и всякая дополнительная доза облучения еще более увеличивает эту вероятность. Второе положение заключается в том, что вероятность, или риск, заболевания возрастает прямо пропорционально дозе облучения. Поэтому знание ожидаемых дозовых нагрузок представляет особый интерес для областей, находящихся в зоне радиоактивного следа аварии на Чернобыльской АЭС. Исходной информацией для количественной оценки дозовой нагрузки населения от внешнего и внутреннего облучения являются закономерности, описывающие явления миграции радионуклидов в почве и трофических цепях. Радионуклиды на загрязненных территориях могут находиться в почве в различных формах. Например, содержание ^{137}Cs в обменной форме составляет 8,2...28,3 %, кислотной растворимой — 2,1...12,6 %, а в фиксированной форме — 61,4...87,2 % [1].

Целью работы являлось установление новых и уточнение существующих закономерностей миграции радионуклидов в почвах и трофических цепях для повышения достоверности прогнозных оценок эффективных среднегодовых доз облучения населения, проживающего в зоне загрязнения аварийным выбросом радиоактивных веществ Чернобыльской АЭС. Основная идея полученных результатов заключается в том, что повышение достоверности прогнозных оценок эффективных среднегодовых доз облучения населения, проживающего в зоне радиоактивного загрязнения, достигается за счет адекватных математических моделей миграции радионуклидов. Модель формирования суммарной дозы облучения должна учитывать динамику вертикального распределения радионуклидов в почве, их миграцию в трофических цепях и динамику выбросов радона при разработке угольных месторождений с высоким содержанием урановых включений. Кинетические параметры математических моделей определяются по данным радиоэкологического мониторинга.

Почва является многофазной полидисперсной системой. Процессы переноса радионуклида в почвенном слое, представляющем собой открытую термодинамическую систему, можно изобразить в виде схемы, показанной на рисунке.

Структурными элементами этой термодинамической системы являются твердая фаза и почвенный раствор. Миграция радионуклида происходит за счет его перемещения в твердой фазе под действием градиента концентраций сорбированного вещества и конвективно-диффузионного переноса в почвенном растворе. На интенсивность процессов переноса оказывают влияние как внешние воздействия, изменяющие температуру системы, фильтрационные, сорбционные и диффузионные свойства ТФ, а также присутствие промышленных загрязнителей (ПЗ) и удобрений (У), наличие которых приводит к нарушению сорбционного равновесия, возникновению процессов конкурентной сорбции ПЗ и У между собой и по отношению к мигрирующему радионуклиду. Важнейшим структурным блоком рассматриваемой термодинамической системы является растительная масса, которая, как правило, выводит радионуклид, ПЗ и У из подсистемы "ТФ — ПР".

Поле удельной активности почвы, содержащей радионуклид и имеющей ненарушенную структуру, описывается уравнением:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + w \frac{\partial A}{\partial z} = D \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} - \lambda A, \quad (1)$$

где A — активность единичной массы почвы, содержащей радиоактивный загрязнитель; t — время; w — вертикальная составляющая конвективного переноса радионуклида в почве; z — аппликата; D —

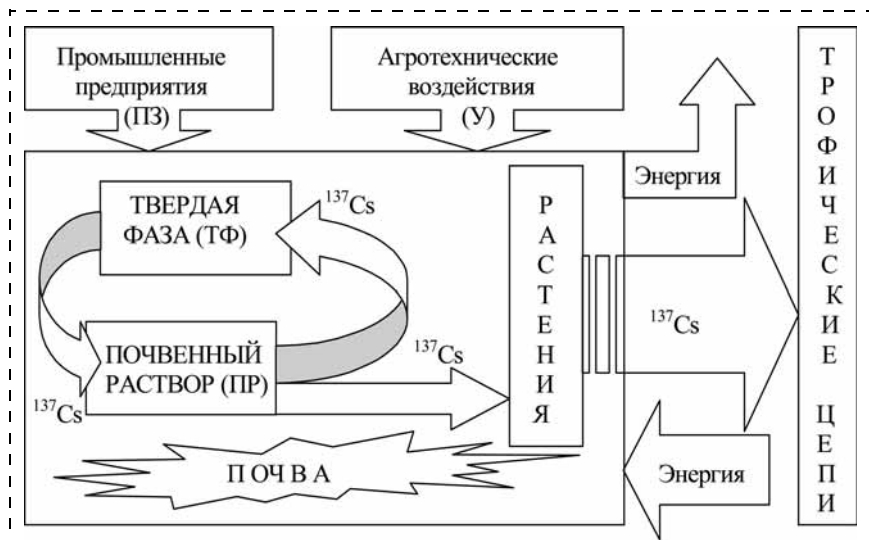


Схема энергомассообмена в почве, загрязненной ^{137}Cs

эффективный коэффициент диффузии радионуклида в почве; λ — константа скорости процессов выведения радионуклида растительной массой и естественного радиоактивного распада.

Начальные и граничные условия, характеризующие аварийный выброс радиоактивного загрязнителя на почву, имеют вид:

$$A(z, 0) = 0; \left(- \left(D \frac{\partial A}{\partial z} + wA \right) \right)_{z=0} = Q\delta(t); \lim_{z \rightarrow \infty} A \neq \infty, \quad (2)$$

где Q — мощность залпового выброса радиоактивного вещества; $\delta(t)$ — дельта функция Дирака.

Решение уравнения (1) для условий (2) можно записать следующим образом:

$$A(Z, Fo) = Q_* \exp(0,5 WZ) \exp[-(0,5 W + \Lambda) Fo] \times \left\langle (\pi Fo)^{0,5} \exp(0,25 Fo - Z) - 0,5 W \times \exp[0,5 W(Z + 0,5 W Fo)] \operatorname{erfc} \times \left[0,5 \left(Z Fo - W Fo^{0,5} \right) \right] \right\rangle, \quad (3)$$

где A , Z , Q_* , W , Λ , — безразмерные значения параметров A , z , Q , w , λ ; Fo — диффузионный критерий Фурье.

Анализ результатов вычислительного эксперимента свидетельствует о том, что теоретический вертикальный профиль удельной активности радионуклида в почве имеет волнообразный вид. Фактический профиль удельной активности почвы, содержащей ^{137}Cs , имеет такой же вид. Исследование влияния функций, входящих в выражение (3), на поле удельной активности почвы показало, что для рассматриваемых периодов времени и интервалов изменения кинетических параметров математической модели интеграл вероятностей можно представить в виде его асимптотического разложения.

Механическое нарушение структуры почвы происходит при ее вспашке, что равносильно периодическому усреднению концентрации радионуклида по глубине обрабатываемого почвенного слоя. Если диффузионная проницаемость подстилающего слоя существенно ниже чем у почвы нарушенной структуры, то подстилающий слой можно в первом приближении считать непроницаемым. На возделываемых посевных площадях, для которых это допущение справедливо, динамика удельной активности $A_{п.с}$ будет описываться следующей зависимостью:

$$A_{п.с}(t) = A_0 \exp(-\lambda t), \quad (4)$$

где A_0 — начальное значение удельной активности $A_{п.с}$.

При переходе к долгосрочному прогнозу накопления и переноса радионуклидов с биомассой удельную активность почвы уже нельзя считать величиной равномерно распределенной по глубине, так как ее значение будет зависеть от диффузии радионуклидов в подстилающий слой. Следовательно, в этом случае необходимо рассматривать двухслойную модель миграции радионуклида, которая имеет вид [2]:

$$\frac{dc_1}{dt} = -(\lambda_1 + \lambda_2)c_1 - \lambda_3(K_d c_1 - a) + \frac{D}{\delta_s} \frac{\partial c_1}{\partial z} \Big|_{z=0}, \quad (5)$$

$$\frac{da}{dt} = -\lambda_1 a + \lambda_3(K_d c_1 - a), \quad (6)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + w \frac{\partial C}{\partial z} = D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - \lambda_1 C, \quad (7)$$

где c_1 , C — значения концентраций радионуклида в почвенных растворах пахотного и подстилающих слоев соответственно; a — сорбция радионуклида почвой; λ_1 , λ_2 , λ_3 — константы скоростей естественного радиоактивного распада, выведения радионуклида растениями и сорбционного обмена соответственно; K_d — коэффициент распределения радионуклида между твердой фазой и почвенным раствором; δ_s — толщина пахотного слоя.

Решение уравнений (5)–(7) для следующих начальных и граничных условий: $c_1(0) = c_0 = \text{const}$, $a(0) = C(z, 0) = 0$, $C(0, t) = c_1(t)$, $\lim_{z \rightarrow \infty} C \neq \infty$ имеет вид

$$c_1(t) = c_0 \exp(-\beta t) \left\{ \int_0^\infty (\pi t)^{0,5} \exp(-0,25 t^{-1} \tau^2) \times \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^m [A_{ki} \tau^{m-1} \exp(A_k \tau)] d\tau \right\}, \quad (8)$$

$$a(t) = \lambda_3 K_d \int_0^t \exp[-\lambda_*(t - \theta)] c_1 d\theta, \quad (9)$$

$$C(z, t) = \omega z \exp(\alpha z) \int_0^t (2\pi\theta)^{-1,5} c_1(t - \theta) \times \exp(-\beta\theta - 0,25\omega^2 z^2 \theta^{-1}) d\theta, \quad (10)$$

где A_{ki} , A_k — коэффициенты, зависящие от изображения функции $c_1(t)$ по Лапласу; α , β , ω , λ_* — коэффициенты, зависящие от параметров конвективно-диффузионного переноса, процесса сорбции и естественного радиоактивного распада; τ , θ — переменные интегрирования; k , i — индексы суммирования; n , m — количество особых точек на интервале интегрирования.

Значения параметров, входящих в математические модели (3), (4) и (8) — (10), определяются с



Таблица 1
Оценки кинетических параметров миграции ^{137}Cs в почвах ненарушенной структуры

Скорость конвективного переноса $w \cdot 10^{10}$, м/с	Эффективный коэффициент диффузии $D \cdot 10^{11}$, м ² /с	Константа скорости обменных процессов $\lambda \cdot 10^9$, 1/с	Мощность выброса ^{137}Cs на почву Q , Бк/с · м ²
1,84	1,76	1,00	4,76
1,40	1,09	35,60	109,00
0,13	0,35	10,50	8,46
0,26	0,10	1,82	0,66
1,62	1,91	11,20	9,29
1,95	1,47	18,20	9,31
0,13	0,35	10,50	8,46
1,33	2,43	8,03	5,80
2,02	1,54	43,00	65,46

Таблица 2
Оценки кинетических параметров двухслойной модели миграции ^{137}Cs в почвах

Параметр	Численные значения параметров модели для различных почв	
	Чернозем	Овражно-балочная
$w \cdot 10^{10}$, м/с	1,093	0,920
$D \cdot 10^{11}$, м ² /с	3,647	1,024
λ_3 , 1/год	1,018	1,339
K_d	$6,99 \cdot 10^{-19}$	0,652
A_0 , Бк/кг	11,057	5,769
Коэффициент корреляции	0,978...0,997	0,980...0,996

использованием вертикальных профилей распределения удельной активности почв. Нелинейный вид зависимостей (3), (4) и (8)–(10) относительно параметров математических моделей приводит к тому, что целевая функция, записанная методом наименьших квадратов, также будет нелинейной в каждом из рассматриваемых случаев. Поэтому оценивание параметров математических моделей осуществлялось или приближенными методами (табл. 1), или с использованием численных методов реализации нелинейного способа наименьших квадратов (табл. 2).

Сравнение результатов вычислительных экспериментов с данными натурных наблюдений подтверждают адекватность модели миграции радионуклида в почве на основе одномерного уравнения параболического типа [3]. Например, динамика миграции ^{137}Cs в почвах ненарушенной структуры является решением этого уравнения, полученным для полубесконечного пространства при нулевом начальном условии и граничном условии третьего рода.

Динамика поля концентраций ^{137}Cs в почвах нарушенной структуры моделируется системой уравнений, описывающих процессы выведения радионуклида из почвы растительной массой, естественного радиоактивного распада и сорбционного обмена между почвенным раствором и твердой фазой. Теоретический профиль концентраций ^{137}Cs в почвах ненарушенной структуры имеет волнообразный вид с точкой, соответствующей максимуму содержания радионуклида, координата которой совпадает с координатой аналогичной точки на эмпирическом профиле. Для значений коэффициента эффективной диффузии ^{137}Cs в почве 0,04...4,0 см²/год, средней скорости конвективного переноса 0,055...1,0 см/год, периодов времени, превышающих 5...10 лет, и глубинах более 1...2 см можно с погрешностью $(0,9...4,98) \cdot 10^{-6}$ представить теоретический вертикальный профиль концентрации в виде произведения трех экспонент:

$$A(z, t) = Q(\pi Dt)^{-0,5} \exp[-(0,5w^2 D^{-1} + \lambda)t] \times \exp[t^{-0,5}(z + 0,5wt)(z + wt)^{-1}] \times \exp[-0,5zD^{-1}(0,5zt^{-1} + w)]. \quad (11)$$

В населенных пунктах, где излучателем, как правило, является ненарушенный почвенный слой, основным источником излучения квантов будет та часть слоя, которая расположена между внешней поверхностью почвы и поверхностью, проходящей через точки максимальной концентрации ^{137}Cs . В почвах нарушенной структуры излучателем является пахотный слой. Плотность радиоактивного поверхностного загрязнения почвы ненарушенной структуры пропорциональна интегралу от вертикального профиля концентраций ^{137}Cs на интервале глубин $(0, z = z_{\max})$, а для почв нарушенной структуры — среднему содержанию ^{137}Cs .

Список литературы

1. Качурин Н. М., Кузнецов А. А., Лебедев А. М. Эмпирические закономерности накопления ^{137}Cs в растительной массе на территории Тульской области // Известия ТулГУ. Серия: "Экология и безопасность жизнедеятельности". — Тула: ТулГУ, 1994. — С. 110–118.
2. Качурин Н. М., Кузнецов А. А., Лебедев А. М. Математическая модель миграции радионуклида в двухслойной среде // Известия ТулГУ. Серия: "Экология и безопасность жизнедеятельности". — Тула: ТулГУ, 1994. — С. 103–106.
3. Качурин Н. М., Лебедев А. М., Свиридова Т. С. Формирование дозы облучения населения, проживающего в зоне радиоактивного загрязнения территории // The 2-nd International Symposium "Mining and Environmental Protection". — Belgrade, 1998. — P. 302–308.

Н. Д. Левкин¹, д-р техн. наук, доц., **М. С. Комиссаров**², канд. техн. наук, доц.,
Н. Е. Мухина¹

¹ Тульский государственный университет

² Тульский государственный педагогический университет

E-mail: ecology@tsu.tula.ru

Сорбционная очистка сточных вод гальванического производства

Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса сорбционной очистки стоков от тяжелых металлов и других загрязнителей. Обосновано применение изготавливаемых на основе природных сорбентов новых алюмосиликатных фильтрующих материалов с гарантированными техническими характеристиками. Представлена универсальная технологическая схема очистки гальванических стоков сложного, многокомпонентного состава.

Ключевые слова: промышленные стоки, замкнутая система водооборота, реагентная очистка, стадии фильтрации, сорбция, математическая модель, технологическая схема, автоматизированное устройство

Levkin N. D., Komissarov M. S., Muhi-na N. E. Sorption refining wastewater of galvanic production

Results of theoretical and experimental researching a process of sorption refining wastewater from heavy metals and other pollutants were given at this paper. Using filtration materials with guaranteed technical characteristics, which producing at base of nature sorbents was substantiated. Created universal technological scheme of refining galvanic wastewater with complex, multicomponent composition is shown.

Keywords: industrial wastewater, closed water rotation system, reagent refining, stages of filtration, sorption, mathematical models, technological scheme, automated arrangement

В горнопромышленных регионах одним из наиболее опасных геоэкологических процессов является технологически обусловленное неуправляемое увеличение проницаемости горного массива и, как следствие, образование гидравлической связи между поверхностными, грунтовыми и подземными водами [1–2].

Вследствие этого бытовые и промышленные стоки проникают в артезианские горизонты, что

вызывает контаминацию подземных вод, являющихся основным источником питьевого водоснабжения. В этой ситуации практически единственным эффективным способом защиты водоисточников является максимальное снижение концентрации загрязняющих веществ в сточных водах.

Одним из основных источников загрязнения поверхностных и подземных вод тяжелыми металлами служат стоки гальванических производств.

Современный уровень развития техники и технологии очистки сточных вод обеспечивает получение воды практически любой степени очистки [3–4]. Все определяется стоимостью такой очистки. Если принять стоимость 90 %-ной очистки сточных вод за единицу, то очистка на 99 % обойдется примерно в 10 раз дороже, а очистка на 99,9 %, которая часто требуется для достижения ПДК, будет дороже в 100 раз. В результате локальная очистка сточных вод с целью их повторного использования в производстве в большинстве случаев оказывается значительно дешевле их полной очистки в соответствии с требованиями санитарных органов.

При выборе технологической схемы очистки промывных кислотно-щелочных, хромсодержащих и циансодержащих вод гальванического производства предпочтительны методы, при которых достигается минимальный выход тяжелых металлов.

Сточные воды гальванических процессов отличаются многокомпонентностью состава, фазовым состоянием и токсичностью соединений, соотношением и концентрацией гетерогенных и гомогенных составляющих, загрязняющими примесями. Методы очистки от гетерогенных нерастворимых примесей зависят от природы взаимодействия с растворителем и геометрических размеров частиц. Грубодисперсные частицы размерами $10^{-1} \dots 10^{-5}$ см (суспензии, эмульсии) под действием гравитационных сил постепенно самопроизвольно оседают или всплывают. Тонкодисперсные коллоидные частицы размерами $10^{-5} \dots 10^{-7}$ см могут находиться во взвешенном состоянии длительное время, значительно превышающее технологические требования.



Источниками гетерогенных загрязнений являются продукты очистки поверхности деталей до нанесения гальванопокрытия, осадкообразования в ходе процессов химического и электрохимического нанесения металлов и обезвреживания сточных вод.

Проблема обеспечения высококачественной очистки сточных вод гальванического производства должна решаться путем упрощения технологической схемы, конструктивного оформления и эксплуатации водоочистных сооружений при одновременном повышении степени очистки, универсальности, надежности, а также экологической безопасности технологического процесса, возможности максимальной и даже полной его автоматизации.

Поэтому для изучения возможности более глубокой очистки сточных вод от тяжелых металлов были проведены экспериментальные исследования сорбционной способности изготавливаемых на основе природных сорбентов новых алюмосиликатных фильтрующих материалов "Глинт", "С-верад".

Исследования в статических условиях показали, что степень очистки недостаточна для снижения содержания ионов тяжелых металлов до уровня ПДК, поэтому была проведена серия экспериментов в динамических условиях.

Исследования проводились посредством фильтрования реальных промышленных сточных вод. Высота слоя сорбента 0,5 м, скорость фильтрования варьировалась от 5 до 6 м/ч. Анализ содержания ионов тяжелых металлов (ТМ) в фильтрате проводили атомно-абсорбционным методом. В качестве сор-

бентов использовали сорбционные фильтрующие материалы "Глинт" фракции 0,63...2,0 мм, "С-верад" фракции 0,35...0,80 мм. Кроме того, для сравнения исследовалась эффективность широко распространенного сорбента "Уголь СКТ-3".

Результаты исследований представлены в таблице. Из данных таблицы видно, что экспериментально установлена высокая эффективность динамического режима очистки сточных вод методом фильтрования через слой сорбента.

Для теоретического обобщения полученных результатов выполнено математическое моделирование процесса очистки сточных вод от тяжелых металлов. При фильтровании сточных вод наблюдаются три основные стадии процесса: осветление загрязненной воды слоем фильтрующего материала; течение жидкости в области отложения твердых частиц на наружной поверхности фильтрующей среды; сорбция загрязняющих компонентов из стоков, проходящих через слой сорбента.

Эффект осветления воды каждым элементарным слоем загрузки следует рассматривать как суммарный результат двух противоположных процессов: изъятия частиц из воды и их закрепления на зернах сорбента под действием сил прилипания и отрыва ранее сорбированных частиц и обратного поступления их в воду под влиянием гидродинамических сил потока. Динамика концентрации загрязняющего вещества в растворе и концентрации загрязняющего вещества в сорбенте описывается следующими зависимостями:

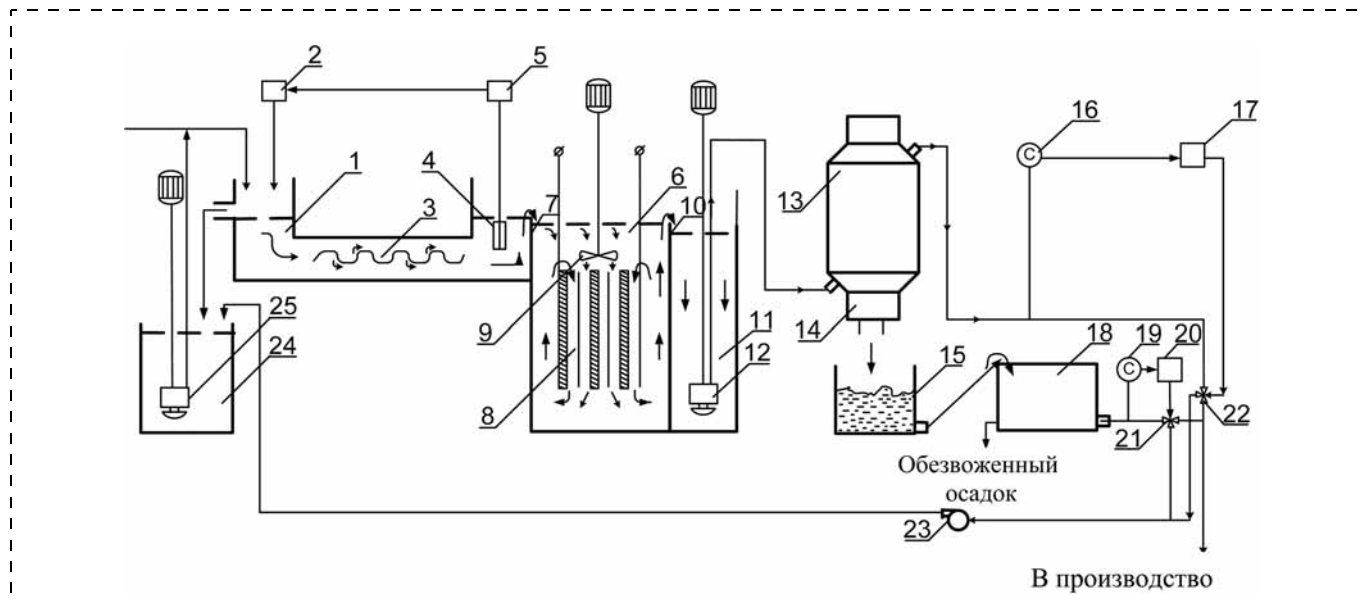
$$c(t, x) = c_0 \exp\left(-\frac{kk_d}{v}x\right) \left[\exp(-kt) I_0\left(2\sqrt{\frac{k^2 k_d}{v}xt}\right) + k \int_0^t \exp[-k(t-\tau)] I_0\left(2\sqrt{\frac{k^2 k_d}{v}x(t-\tau)}\right) d\tau \right], \quad (1)$$

$$a(t, x) = kk_d \int_0^t \exp[-k(t-\tau)] c(\tau, x) d\tau, \quad (2)$$

где $c(t, x)$ — концентрация загрязняющего вещества в растворе, мг/л; c_0 — концентрация взвешенных веществ в воде, поступающей на фильтр, мг/л; k — константа скорости процесса сорбции; k_d — коэффициент распределения загрязняющего вещества между сорбентом и модельным раствором; v — скорость пропускания раствора через слой сорбента, м/ч; x — продольная координата, м; t — время, ч; $a(t, x)$ — концентрация загрязняющего вещества в сорбенте, мг/кг; τ — параметр интегрирования; $I_0(\dots)$ — модифицированная функция Бесселя нулевого порядка.

Эффективность сорбционной очистки сточных вод

Сорбент	Загрязняющий компонент	Концентрация, мг/л		Степень очистки, %
		в исходной неочищенной воде	в фильтрате	
Глинт	Cu ²⁺	1,975	0,0029	99,85
	Pb ²⁺	19,540	0,0580	99,70
	Zn ²⁺	2,130	0,0000	100
	Ni ²⁺	2,088	0,0150	97,28
	Σ _{Cu + Pb + Zn + Ni}	25,733	0,0863	99,66
С-верад	Cu ²⁺	1,85	0,0037	99,80
	Pb ²⁺	19,71	0,0393	99,80
	Zn ²⁺	1,96	0,0042	99,8
	Ni ²⁺	2,06	0,071	96,55
	Σ _{Cu + Pb + Zn + Ni}	25,58	0,1262	99,51
Уголь СКТ-3	Cu ²⁺	1,85	0,0046	99,75
	Pb ²⁺	19,71	0,065	99,67
	Zn ²⁺	1,96	0,0078	99,6
	Ni ²⁺	2,06	0,079	96,17
	Σ _{Cu + Pb + Zn + Ni}	25,58	0,1564	99,4



Технологическая схема очистки стоков

Для численной реализации математической модели процесса сорбции использован комплекс программных средств, который реализуется в прикладном пакете Mathematics 2.2 системы Windows фирмы Microsoft Office. Для написания алгоритма математической модели использовалась программа MathCAD 2001 Professional. Отклонение результатов вычислительного эксперимента от данных натуральных наблюдений не превысило 15 %, что позволяет рекомендовать алюмосиликатные сорбенты для глубокой очистки промышленных сточных вод от ионов тяжелых металлов.

Для реализации сорбционного метода разработана универсальная технологическая схема очистки сложного, многокомпонентного состава (NO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , PO_4^{3-} , Al^{3+} , Cd^{3+} , Cu^{2+} , Ni^{2+} , Pb^{2+} , Zn^{2+} , Cr^{3+}) стоков. Запатентованное автоматизированное устройство [5] реализует эту схему посредством обеспечения замкнутой системы водочистки с 5 %-ной подпиткой чистой водой, что предотвращает загрязнение подземных вод тяжелыми металлами. Принципиальная технологическая схема устройства для очистки стоков приведена на рисунке.

Промывная вода от технологической установки и реагент соединяются в приемной камере 1 и, пройдя через статический смеситель 3, оборудованный датчиком 4 рН-метра 5, измеряющего и регулирующего рН раствора посредством изменения подачи реагента через дозатор 2, поступает через решетку 6 в реактор 7, а затем на электрокоагулятор 8. Активное перемешивание осуществля-

ется мешалкой 9. Образовавшаяся в коагуляторе пульпа через решетку 10 попадает сначала в камеру 11, а затем насосом 12 подается в фильтр 13, где освобождается от взвеси. Осадок из фильтра через устройство 14 выводится в приемную емкость для влажного осадка 15 и далее подается на пресс-фильтр 18. Обработанная вода из фильтра контролируется измерителем концентрации примесей тяжелых металлов 16 и по командам первого микропроцессорного контроллера 17 через регулирующий клапан 22 возвращается в технологический цикл на повторное использование или поступает с помощью насоса 23 в резервуар-накопитель 24.

Вода из пресс-фильтра 18 контролируется измерителем концентрации 19 и по командам второго микропроцессорного контроллера 20 через регулирующий клапан 21 также возвращается в технологический цикл на повторное использование или направляется в резервуар-накопитель 24, из которого некондиционная вода насосом 25 подается на повторный цикл очистки.

Вода, качественный и количественный состав которой соответствует заданным значениям, сбрасывается в городскую канализацию или поверхностный водный источник. Узел обработки влажного осадка обеспечивает удаление 98 % общего количества механически связанной воды и получение значительно меньшего объема твердых отходов.

Устройство выполнено по блочно-модульной схеме, которая позволяет посредством изменения ее конфигурации адаптировать систему очистки к конкретному составу промышленных стоков и качеству подземных вод.



Внедрение предлагаемой технологической схемы очистки сточных вод обеспечивает как повышение экологической безопасности в горнопромышленном регионе, так и снижение экономических затрат на оборудование и платежей за сбросы и загрязнение водных объектов, что имеет существенное значение для развития горной промышленности и сохранения продуктивной природной среды.

Список литературы

1. **Отчет** об оценке состояния эксплуатационных запасов подземных вод по водозаборам Новомосковского про-

мышленного района Тульской области в 2002 году / Министерство природных ресурсов ОАО ППП "Тула-Недра". — Тула, 2002. — 37 с.

2. **Бочевер Ф. М., Лапшин Н. Н., Орадовская А. Е.** Защита подземных вод от загрязнения. — М.: Недра, 1979. — 254 с.
3. **Василенко Л. В.** Методы очистки промышленных сточных вод: Уч. пособие. — Екатеринбург, 2000. — 167 с.
4. **Петров С. А., Крушенко Г. Г.** Безреагентная очистка питьевой воды, сточных вод и промышленных стоков // Вода и Экология. — 2000. — № 4. — С. 29—31.
5. **Пат. 2278824** Российская Федерация. Устройство для очистки промышленных стоков / Э. М. Соколов, В. М. Панарин, Н. Д. Левкин, В. П. Пашков, Е. М. Бурзяева. — Опубл. 27.06.2006, Бюл. № 18.

УДК 504.5:628.4.032

Н. Д. Левкин¹, д-р техн. наук, доц., **М. С. Комиссаров**², канд. техн. наук, доц., **В. Л. Рыбак**³

¹ Тульский государственный университет

² Тульский государственный педагогический университет

³ АО Мир Трэйд АГ, г. Москва

E-mail: ecology@tsu.tula.ru

Защита территорий от загрязнения стоками полигонов твердых бытовых отходов

Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований загрязнения прилегающих к полигонам твердых бытовых отходов (ТБО) территорий тяжелыми металлами и способы снижения деградации окружающей среды фильтратом полигонов ТБО. Представлена технологическая схема сбора, отведения и сорбционной очистки фильтрата полигона бытовых отходов с использованием местных природных сорбентов.

Ключевые слова: полигон ТБО, фильтрат, тяжелые металлы, математическая модель, кинетика сорбции, поверхностные и грунтовые воды, технологическая схема

Levkin N. D., Komissarov M. S., Ribak V. L. Territorial protection for polluting landfills filtrate

Results of theoretical and experimental researches of polluting territories near landfills by heavy metals and methods of decreasing environmental destruction by landfills filtrate are submitted. These results have made possible to create the technological scheme for collection, disposal and sorption cleaning landfills filtrate with using domestic natural sorbents.

Keywords: landfill, filtrate, heavy metals, mathematical model, adsorption kinetics, surface and subterranean water, technological scheme

В промышленных регионах крупными источниками дестабилизирующего воздействия на окружающую среду являются полигоны твердых бытовых отходов [1]. Основным источником загрязнения гидросферы при этом является мигрирующий с полигона на прилегающие территории фильтрат, в котором содержится ряд веществ, вызывающих мутагенные и канцерогенные эффекты.

В результате геохимических исследований прилегающих к полигону территорий установлено превышение ПДК ряда металлов как в почвах, так и в поверхностных водах [2—3]. Поэтому при организации мест захоронения ТБО большое практическое значение имеет оценка вероятности загрязнения подземных вод тяжелыми металлами.

Для разработки эффективных природоохранных мероприятий необходима информация о закономерностях поступления поллютантов в окружающую среду.

Вертикальная миграция компонентов фильтра-та в водоносные горизонты (а это основной путь их поступления) ($x, y = 0$) описывается следующим уравнением:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + W \frac{\partial c}{\partial z} = D_3 \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - kc, \quad (1)$$

где c — концентрация мигрирующего компонента в фильтрате, г/м^3 ; W — составляющая вектора скорости фильтрации по оси z , м/ч ; D_3 — эффективный (эквивалентный) коэффициент диффузии; k — константа скорости сорбции, $1/\text{ч}$.

В результате решения этого уравнения для полуограниченного пространства была получена зависимость, описывающая динамику изменения концентрации загрязняющего вещества в горной породе:

$$\begin{aligned} c(z, t) = & c_H \exp(-kt) + (c_H + c_0) \exp\left(\frac{W}{2D_3} z\right) \times \\ & \times \exp\left(-\left(k + \frac{W^2}{4D_3}\right)t\right) \operatorname{erf}\left(\frac{z}{2\sqrt{D_3 t}}\right) + \exp\left(\frac{W}{2D_3} z\right) \times \\ & \times \int_0^t \left[C_H \frac{W^2}{4D_3} \exp(-k\tau) + C_0 \left(k + \frac{W^2}{4D_3}\right) \exp(-k\tau) \right] \times \\ & \times \exp\left(-\frac{W^2}{4D_3} \tau\right) \operatorname{erf}\left(\frac{z}{2\sqrt{D_3 \tau}}\right) d\tau, \quad (2) \end{aligned}$$

где t — время; τ — параметр интегрирования; $c_0 = c(0, t)$; $c_H = c(z, 0)$.

Для численной реализации полученной модели на основе пакета Mathcad 2000 Professional составлена прикладная программа, позволившая получить теоретическое распределение потока поллютанта G по глубине z (рис. 1).

Полученные результаты свидетельствуют, что миграция поллютантов по профилю пренебрежительно мала, и, следовательно, загрязняющие вещества будут мигрировать на прилегающие к полигону территории с грунтовыми водами и поступать в естественные водостоки, вызывая деструкцию природной среды.

При этом общий поток загрязнителя, г/ч , поступающего в водоносный горизонт, определяется по формуле

$$G_{\text{заг}} = S_{\text{пов}} j_z = H, \quad (3)$$

где $S_{\text{пов}}$ — площадь поверхности верхней границы водоносного горизонта, м^2 ; $j_z = H$ — конвективный поток, $\text{г}/(\text{ч} \cdot \text{м}^2)$.

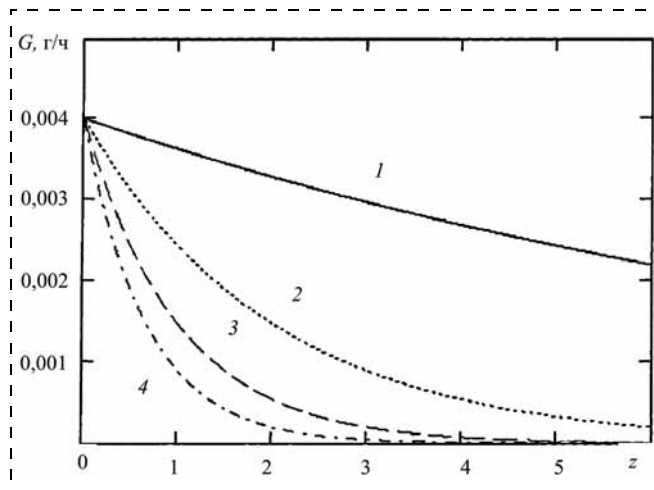


Рис. 1. Распределение потока поллютанта по глубине при концентрации $c_0 = 3 \text{ г/м}^3$, площади $S_{\text{пов}} = 10 \text{ м}^2$, скорости $W = 4 \cdot 10^{-4} \text{ м/ч}$: 1 — $G(t = 0, 1, z)$; 2 — $G(t = 0, 5, z)$; 3 — $G(t = 1, 0, z)$; 4 — $G(t = 1, 5, z)$

На основе решения уравнения (1) получена зависимость для определения общего потока загрязнителя:

$$G_{\text{заг}} = S_{\text{пов}} c_H W \exp\left(-k \frac{H}{W}\right). \quad (4)$$

Исходя из ожидаемых поступлений поллютантов, для разработки экономически оправданных мероприятий по снижению загрязнения окружающей среды стоками полигона проведены исследования эффективности их очистки местными природными сорбентами: известняком и доломитом.

Сравнительный анализ результатов исследования на модельных растворах показал, что сорбционная емкость известняка превышает аналогичную характеристику доломита по всем элементам (рис. 2). Однако из серии экспериментов с реаль-

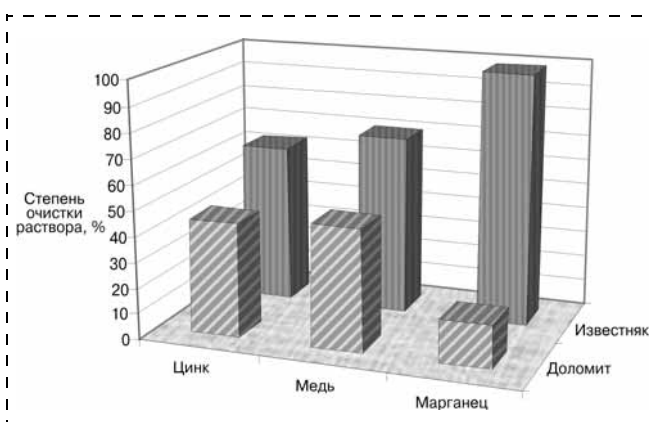


Рис. 2. Эффективность очистки модельных растворов



ными стоками следует, что при определенных условиях некоторые элементы лучше сорбируются доломитом (рис. 3). При этом максимальной адсорбционной емкостью обладает фракция 0,3 мм. Кроме того, установлено, что при одинаковых условиях сорбции природные известковые материалы проявляют различие в поглощении ионов исследуемых тяжелых металлов.

Так, в модельных растворах сорбционная способность известняка располагается в следующем ряду: марганец > медь > цинк; доломит — медь > цинк > марганец. Для реальных стоков полигона сорбционная способность известняка располагается в том же ряду, а вот доломита — в ряду: цинк > медь > марганец.

Полученные результаты позволили разработать технологическую схему сбора, отведения и сорбционной очистки фильтрата полигона ТБО (рис. 4) с использованием местных природных сорбентов, обеспечивающую снижение содержания тяжелых металлов в стоках.

Таким образом, на основе теоретических и экспериментальных исследований установлены и уточнены закономерности распространения тяжелых металлов на территориях, прилегающих к полигону ТБО, и на основе исследования сорбционного поглощения ионов тяжелых металлов природ-

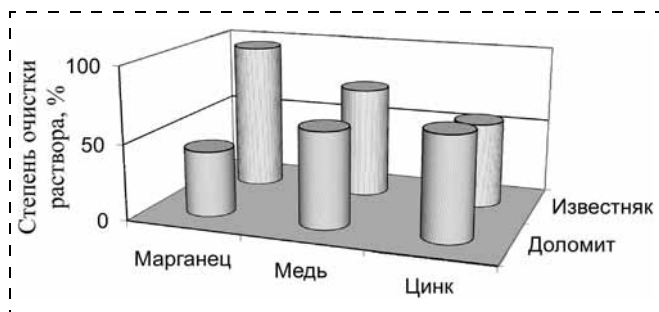


Рис. 3. Эффективность очистки сточных вод полигона ТБО природными сорбентами

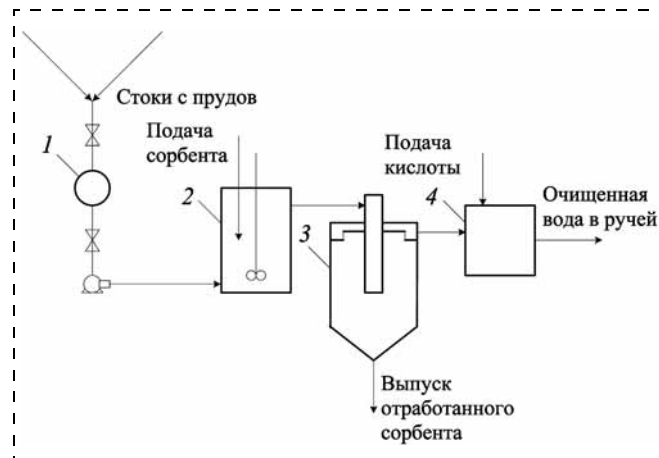


Рис. 4. Технологическая схема очистки сточных вод действующего полигона ТБО г. Тулы:

1 — накопительный колодец; 2 — резервуар с перемешивающим устройством; 3 — отстойник для отделения отработанного сорбента от сточной воды; 4 — нейтрализатор

ными сорбентами разработана технологическая схема очистки жидких стоков.

Список литературы

1. Доклад о состоянии и охране окружающей среды Тульской области в 2003 году / Главное управление природных ресурсов и охраны окружающей среды МПР РФ по Тульской области. — Тула, 2003. — 85 с.
2. Левкин Н. Д., Афанасьева Н. Н., Матюхина Е. А. Загрязнение почв и поверхностных вод тяжелыми металлами, содержащимися в фильтрате полигона ТБО г. Тула // Материалы 1-ой международной геоэкологической конференции "Геоэкологические проблемы загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами". — Тула: ТулГУ, 2003. — С. 5—9.
3. Левкин Н. Д., Афанасьева Н. Н., Лазеба А. В. Исследование загрязнения тяжелыми металлами территории, прилегающей к полигону ТБО г. Тула // Материалы 2-ой международной геоэкологической конференции "Геоэкологические проблемы загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами". — Тула: ТулГУ, 2004. — С. 127—130.

УДК 378.091.3.02:[378-057.175:62]

Н. А. Шайденко¹, д-р пед. наук, проф., **Н. А. Жаркова**²

¹ Комитет Государственной Думы РФ по образованию, г. Москва

² Тульский институт экономики и информатики

E-mail: ecology@tsu.tula.ru

Дидактический анализ учебно-методических комплексов и коррекция профессиональной компетенции преподавателя инженерных специальностей высшей школы

Представлены результаты исследования, которые показали, что педагогическая наука в союзе с желанием и волей преподавателей инженерных специальностей позволяет найти новое качество учебного процесса в вузе путем дидактической коррекции учебно-методических комплексов (УМК) в контексте современных требований государственных образовательных стандартов.

Ключевые слова: учебно-методический комплекс, дидактический аудит, государственный образовательный стандарт, инженерная специальность

Shaidenko N. A., Garkova N. A. Didactic analyzing education-methodological complexes and correcting professional competence of university teacher on engineer specialties

Results of this research show that pedagogical science with wishing and will of university teachers on engineer specialties make be possible to find new quality of education process at a university by means of didactic correcting education-methodological complexes with using State Education Standards demands.

Keywords: education-methodological complex, didactic audit, State Education Standard, engineer specialty

Модернизация российского образования объективно формирует обновленные пути, формы и методы реформирования его ключевых звеньев, включая в первую очередь высшее образование, сориентированное на развитие демократических и гуманистических основ педагогического процесса. Одним из целевых ориентиров такого развития наше государство видит в слиянии с международным

просветительским сообществом через систему процедур, сформулированных в Болонском соглашении. В качестве одного из направлений такой деятельности определен комплекс мер по формированию и внедрению в систему высшего профессионального образования (ВПО) ГОСов 3-го поколения Федеральных государственных образовательных стандартов (ФГОС ВПО-3).

Наряду с вопросами, которые определяют структуру и содержание Федерального государственного образовательного стандарта подготовки будущих инженеров, важной задачей качественной их подготовки является повышение уровня педагогической квалификации профессорско-преподавательского состава. В большинстве случаев преподаватели имеют техническое образование, прекрасно владеют своим предметом, но из-за недостаточного знания основ педагогики испытывают объективные трудности при передаче своих знаний и навыков студентам. Это в равной степени относится как к теоретическому, так и к практическому обучению.

Устранение данного противоречия возможно при тесном сотрудничестве профессорско-преподавательского состава с представителями педагогической науки, владеющими практикой дидактического анализа и методами его осуществления в условиях соблюдения права выбора преподавателем методов и форм обучения. Следуя логике поставленной цели, необходимо четко осознать ролевые функции полноправных участников данного процесса, и в первую очередь, профессорско-преподавательского состава вуза и студентов, осознавая при этом объективную инертность такого рода деятельности.



Поэтому уместно в таком случае говорить и действовать в режиме "мягкой" реформы — режиме коррекции профессиональной компетенции преподавателя высшей школы и как следствие — студентов, понимая под этим *комплекс процедур приведения процесса обучения в высшей школе к заявленным модельным свойствам обновленной системы образования.*

Рассмотрим в качестве примера процесс динамики данного подхода в области подготовки инженеров-специалистов.

1. Выделим с этой целью как международные, так и российские отраслевые причины-источники формирования модельных свойств обновленной системы образования высшей школы России.

2. Предложим пути перехода от модельных свойств системы к технологиям ее проектирования.

3. Предложим комплекс мер для реализации деятельностных функций преподавателя в качестве обновленной (скорректированной) профессиональной компетенции.

Рассмотрим *причины-источники развития глобальной мировой экономики*, вынуждающие менять подходы к образованию и обучению. В числе данных закономерностей значимы, прежде всего, следующие:

— в профессиональной деятельности все большую роль играет информационный и творческий фактор, т. е. происходит "интеллектуализация" труда;

— возрастает роль гибких краткосрочных проектов, для решения которых выгоднее иметь временные трудовые коллективы вместо постоянного персонала;

— исчезает понятие стабильного профессионального роста — карьеры, сделанной на одном рабочем месте, в штате одного учреждения или предприятия;

— однотипность и взаимозаменяемость работников уступает место персонализации профессиональных задач и ценится нестандартный характер рабочей силы;

— утрачивается идентификация традиционных видов труда и разрушается замкнутость профессиональных каст, формируются "плавающие" границы профессий;

— нарастает динамика и глобализация профессий;

— профессиональное образование утрачивает ориентировку на единственную дальнейшую специализацию и т. п.;

— развитие общества привело к осознанию необходимости гуманизации и гуманитаризации образования, что означает его ориентацию на интересы и возможности личности, ее развитие.

Таким образом, указанные причины-источники раскрывают суть противоречия между обновленными условиями профессиональной деятельности инженера и реальной его сегодняшней моделью. Иными словами, происходит кардинальное изменение подходов к оценке профессиональных качеств работников инженерных отраслей. А потому сформировавшиеся ранее и реализуемые по сей день образовательные модели, рассчитанные в первую очередь на передачу теоретических знаний и профессиональных навыков, обеспечивающих стабильный карьерный рост и занятость в течение всего периода трудовой деятельности на одном или нескольких аналогичных рабочих местах, более не в состоянии обеспечить подготовку профессионалов, в которых нуждается современная экономика. В связи с этим требует пересмотра и переосмысления образовательный процесс подготовки инженеров, встает задача разработки *новой образовательной технологии*, ориентированной на подготовку инженеров для работы в условиях развития современного наукоемкого производства.

Главную роль в данном перестроечном образовательном процессе должен сыграть преподаватель высшей школы, осознавший всю сущность и необходимость *реконструкции своей профессиональной компетенции* по пути внедрения педагогических технологий. В качестве источника такой профессиональной реконструкции может выступать дидактический анализ УМК преподавателя вуза.

Сущность дидактического анализа УМК. Дидактический анализ УМК в первую очередь нацелен на выявление в нем законов и принципов дидактики в сравнении с их основными модельными свойствами. Основным законом дидактики является *закон единства деятельности субъектов учебного процесса*, согласно которому учебный процесс рассматривается как взаимосвязанная и взаимозависимая деятельность преподавателей и обучаемых. При этом обычно исходят из того, что в основе обучения лежит дидактический треугольник, связывающий передачу знаний, усвоение знаний и построение системы формирования знаний, и что сущность обучения складывается из его целей и задач, стоящих перед различными группами обучаемых (степени обучения). Высшей же целью обучения

является гармоничное развитие личности, способности к самостоятельному творческому мышлению на основе единства обучения и воспитания.

Таким образом, УМК любой вузовской дисциплины должен подчиняться *основному закону дидактики* — обуславливать роль и функции обучающего, определять пути, формы, средства и методы приобретения студентами знаний, навыков и умений (компетенций).

Реализация этих функций должна происходить на основе определенных *дидактических принципов обучения*: научности, систематичности, связи теории с практикой, сознательности обучения, соединения индивидуального и коллективного, единства конкретного и абстрактного, доступности, прочности знаний. Все эти принципы взаимосвязаны и взаимозависимы, дополняют и обуславливают друг друга. В практике обучения они находят применение в виде правил, методов и форм организации и проведения учебной работы.

Если рассматривать самую сущность дидактических принципов, то их можно охарактеризовать следующим образом.

1) Сущность *принципа научности* состоит в том, что все предусмотренные УМК сообщаемые учебные сведения должны находиться в полном соответствии с передовой современной наукой. Гарантом соблюдения данного принципа является грамотное и обоснованное использование первоисточников (научной литературы) и квалификационный статус преподавателя.

2) Согласно *принципу систематичности*, все планируемые УМК знания, сообщаемые обучающимся, должны быть выстроены в определенную педагогически обоснованную систему. Под систематичностью понимают последовательность и логическую связь в изучении материала. Данный принцип легко проследить в структуре представления учебного материала рабочей программой преподавателя.

3) *Принцип связи теории с практикой* — важнейший в системе подготовки УМК — рассматривается как единое и неразрывное сочетание теории и практики в процессе приобретения знаний, навыков, умений. На основе этого принципа, исходя из конечных целей обучения, определяется соотношение между теоретической и практической частями.

4) *Принцип сознательности* понимается как обоснованное самостоятельное мышление, оправданность действия обучаемого. Сознательность

рассматривается как его личное убеждение в процессе обучения. Все качественные признаки сознательности — *активность, дисциплина, интерес, внимание к своему совершенствованию* — требуют участия обучаемых. Важную роль играют здесь перспективы совершенствования профессионального мастерства (компетентности) будущего специалиста. Наличие в УМК методов организации обратной связи со студентами и выпускниками (анкетирование, учет мнений) есть факт соблюдения данного принципа.

5) *Принцип соединения индивидуального и коллективного* требует объединения интересов всех и каждого обучаемого на основе единства целей и задач обучения. Единство индивидуального и коллективного в обучении требует хорошего знания преподавателями индивидуальных свойств и особенностей каждого обучаемого, его интересов, способностей, уровня его развития и т. д. Показателем соблюдения данного принципа служит наличие в УМК краткой характеристики учебной группы и отдельных студентов, а также наличие вариантов маршрутов усвоения учебного материала с учетом субъективного фактора — болезнь обучаемого, уникальные способности и т. п.

6) *Принцип единства конкретного и абстрактного* заключается в соединении абстрактного мышления с наглядностью преподавания.

7) *Принцип доступности* заключается в том, что уровень обучения должен соответствовать уровню развития обучаемых, учитывать их способности и возраст. На основе этого принципа определяется степень теоретической сложности учебного материала, его объем, формы и методы обучения.

8) *Принцип прочности* знаний предполагает, что полученные знания должны стать базой для дальнейшего совершенствования по профессии. Обучаемый всегда должен умело, оперативно использовать сознательно усвоенные знания, навыки, умения. Этот принцип должен реализовываться на основе строгого отбора материала, исключения дублирования, выделения достаточного времени для прочного закрепления навыков и умений.

Общие принципы дидактики определяют характер любого обучения. В то же время в зависимости от уровня и целей обучения, одни из них могут становиться определяющими и направляющими, а другие реализовываться неполностью. Глубокое понимание общих принципов системы усвоения знаний и умений позволяет творчески



подходить к организации процесса обучения. Творческий подход к обучению наряду с обобщением педагогического опыта и на базе этого обобщения предлагает совершенствование, поиск, развитие и внедрение самых разнообразных *приемов и методов обучения*, ведущих к повышению эффективности и качества обучения.

Дидактический анализ УМК позволяет выявить и оценить приемы и методы обучения, оптимизировать и предложить их развитие с учетом современного компетентностного подхода.

При ведении учебного процесса образовательным учреждениям приходится решать *основные педагогические задачи*. К этим задачам относятся формирование сознательного, активного, творческого отношения к труду; воспитание обучаемых, а также формирование у обучаемых системы прочных общетехнических, специальных знаний, умений и навыков, формирование профессионального мастерства; развитие познавательных способностей, мышления, самостоятельности и самоконтроля.

Наличие в УМК данных задач является фактором дидактической обоснованности подбора учебного материала в контексте общей цели высшего образования в условиях выполнения общей миссии вуза. Для выполнения основных задач учебного процесса важную роль в формировании УМК играет выбор правильной *технологии (методики) обучения*, которая разрабатывается на основе знаний философии, возрастной физиологии, педагогической психологии, профессиональной педагогики, методики воспитательной работы, методики применения технических средств обучения, оборудования и техники теоретических основ специальности.

При осуществлении учебного процесса образовательному учреждению необходимо добиваться единства процессов теоретического и производственного обучения, а это можно достичь только подбором методов обучения.

Дидактический аудит как метод развития УМК.

Понимая всю необходимость дидактического анализа УМК, следует отметить, что не менее важно наличие и внедрение механизма его осуществления в условиях конкретного вуза, кафедры, специальности и учебного предмета. Общепринятый административный аудит и дидактический аудит и по цели, и по задачам имеют существенные различия. *Сущность дидактического аудита заключается в организации совместной научно-методической дея-*

тельности между педагогом-дидактиком и инженерной кафедрой для достижения модельных дидактических свойств УМК.

1. *Целью дидактического аудита* является анализ УМК кафедры или конкретного преподавателя и последующая его коррекция с учетом современных педагогических теорий и практик.

2. *Задачи дидактического аудита:*

- достижение нового качества УМК;
- пропаганда современной педагогической науки в условиях подготовки инженерных кадров;
- повышение квалификации профессорско-преподавательского состава в части педагогической компетентности;
- развитие мотивации к учению студентов.

3. Как любая системная социальная деятельность дидактический аудит базируется на *принципах* инициативности, научности, результативности, информационной доступности, доверия и коммуникабельности.

4. *Формальным результатом дидактического аудита* выступают рекомендации педагога дидактика по совершенствованию конкретного УМК.

Примером осуществления теории дидактического анализа и его практического воплощения в качестве аудита послужило сотрудничество в данном направлении кафедр ТулГУ "Теория и методика профессионального образования" (ТиМПО, зав. кафедрой В. М. Петровичев) и "Геотехнология и строительство подземных сооружений" (ГиСПС, зав. кафедрой Н. М. Качурин) и кафедры ТГПУ им. Л. Н. Толстого "Механизация сельского хозяйства" (МСХ, зав. каф. А. А. Потапов). В распоряжение экспертов педагогов ТиМПО был предоставлен весь арсенал УМК кафедр ГиСПС и МСХ с целью проведения дидактического аудита. Итоги аудита показали, что все УМК в основном соответствуют дидактической структуре — содержат полный набор дидактических средств и методов для достижения образовательной цели обучения. Поэтому остановимся на основных рекомендациях по их совершенствованию с учетом соблюдения логики дидактического анализа УМК (см. таблицу).

Опыт данного исследования показал, что педагогическая наука в союзе с желанием и волей преподавателей инженерных специальностей позволяет найти новое качество учебного процесса в вузе путем дидактической коррекции УМК в контексте современных требований ФГОС.

В заключение приведем ряд рекомендаций в осуществлении рассмотренной выше процедуры коррекции профессиональной компетенции преподавателя высшей школы.

1. Необходимо разработать интерактивную, личностно-ориентированную, развивающую образовательную технологию, охватывающую все элементы учебного процесса, направленную на формирование профессионально важных интеллектуальных и личностных креативных качеств, необходимых для эффективной деятельности инженера в условиях наукоемкого производства.

2. Концептуальной основой проектируемой образовательной технологии должна стать идеология

системного подхода к проектированию всех компонентов: целевого, управляющего, процессуального, содержательного и контролирующего.

3. Системное проектирование каждого из компонентов образовательной технологии должно основываться на следующих методологических подходах и принципах:

— интегративный подход, позволяющий на уровне целевого и управляющего компонентов согласовать достижение различных целей в рамках единого учебного процесса, а на уровне содержательного и контролирующего компонентов — сформировать систему трансдисциплинарных знаний, умений и личностных качеств;

Дидактические отклонения	Примеры коррекции УМК
<i>Принцип научности</i>	
1) Теоретический и практический материал УМК содержит списки литературы без привязки к дидактическим единицам 2) УМК не имеет дифференциации по научно-квалификационному статусу преподавателя	1) В рекомендованной литературе более подробно ссылаться на предметность в них изучаемых дидактических единиц 2) Учитывать реальную научную новизну предмета, указывая научные журналы, ссылки Интернет, материалы конференций и диссертаций
<i>Принцип систематичности</i>	
1) В содержании УМК отсутствуют межпредметные связи	1) Практиковать УМК, содержащие интегрированные занятия
<i>Принцип связи теории с практикой</i>	
1) Отсутствуют активные формы обучения	1) Практиковать ролевые игры и кейс-технологии
<i>Принцип сознательности</i>	
1) В УМК отсутствует модульный по степени сложности подход 2) Отсутствуют ссылки на современные методики и технологии	1) Включить раздел «Технологии и методы обучения» 2) Практиковать наличие в УМК методов организации обратной связи со студентами и выпускниками (анкетирование, учет мнений)
<i>Принцип соединения индивидуального и коллективного</i>	
1) Не учитывается психолого-педагогическая особенность каждой учебной группы 2) В организации практических (семинарских) занятий недостаточно групповых активных форм обучения	1) Наличие в УМК краткой характеристики учебной группы и отдельных студентов, а также наличие вариантов маршрутов усвоения учебного материала с учетом субъективного фактора — болезнь обучаемого, уникальные способности и т.п.
<i>Принцип единства конкретного и абстрактного</i>	
1) Отсутствуют интерактивные методы обучения (лекции)	1) Практиковать создание мультимедийных лекций
<i>Принцип доступности</i>	
1) Объем теоретического материала не обоснован с точки зрения конспекта студента 2) Графические объекты не обоснованы с точки зрения наглядности	1) В УМК выделить конспективную часть теоретического материала 2) Указывать метод представления графического материала (таблица, проекция, доска)
<i>Принцип прочности</i>	
1) УМК не содержит описания технологии самостоятельной работы студента	1) Разработать поведенческие модели самостоятельной работы студентов



— личностно-ориентированный подход — учитывающий исходный уровень подготовленности, личностную мотивацию и сформированность креативных личностных качеств на каждом отдельном этапе образовательного процесса;

— дифференцированный подход, учитывающий исходный уровень подготовленности, личностную мотивацию и сформированность креативных качеств на каждом отдельном этапе образовательного процесса;

— принцип развивающего образования, позволяющий студенту на каждом этапе образовательного процесса достигнуть максимального уровня своего развития;

— принцип синергии в организации учебной деятельности, заключающийся в том, что эффект комплексного применения всех элементов образовательной технологии должен значительно превышать возможный суммарный эффект от применения отдельных ее элементов.

4. Планирование результатов обучения, определяющих все остальные компоненты системы, должно осуществляться на языке поставленных педагогических целей.

Все это позволит проектировать образовательный процесс на основе профильной и уровневой

дифференциации и разработку соответствующих технологий обучения, тем самым выполнить целевую установку программы модернизации высшего образования в условиях конкретных вуза, кафедры, студента.

Список литературы

1. **Байдено В. И.** Болонский процесс: структурная реформа высшего образования Европы. 4-е изд., стереотип. — М., 2003.
2. **Федоров И. Б., Коршунов С. В.** О ходе разработки проектов государственных образовательных стандартов бакалавров и магистров по специальности в области инженерного образования / Доклад на Координационном совете УМО и НМС, МГСУ, 25.03.04 г. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана. — 30 с.
3. **Байдено В. И.** Болонский процесс: нарастающая динамика и многообразие (документы международных форумов и мнения экспертов). 2-е изд. — М., 2003.
4. **Болонский процесс: на пути к Берлинской конференции (европейский анализ)** / Под ред. В. И. Байденко. — М., 2004.
5. **Болонский процесс и его значение для России. Интеграция высшего образования в Европе** / Под ред. К. Пурсайнена и С. А. Медведева. — М., 2005.
6. **Руководство по использованию системы кредитов ECTS**, доступное в Интернете по адресу: http://europa.eu.int/comm/education/socrates_ects.html
7. **Материалы** на странице Национального агентства развития квалификаций на сайте <http://www.rsp.ru>

Общая информация о журнале "Безопасность жизнедеятельности"

Журнал зарегистрирован в Министерстве Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации ПИ № 77-3762 от 20.06.2000. Оригинал-макет ООО "Авансед солюшнз". Отпечатано в ООО "Авансед солюшнз". 105120, г. Москва, ул. Нижняя Сыромятническая, д. 5/7, стр. 2, офис 2.

ТТТ "Ежсабаеуноаі "Ітааа оаоііетіае". 107076, Інеаа, Норіісінеееіар., 4

Оаеаоіірааебее аоріаеа (499) 269-5397, оае./оаеа (499) 269-5510, e-mail: bjd@novtex.ru, <http://novtex.ru/bjd>

Оаеаоііаеаіаі оааеаіоа (812) 670-9376(55), e-mail: rusak-maneb@mail.ru

Дизайнер Т. Н. Погорелова.

Технический редактор Е. М. Патрушева. Корректор Е. В. Комиссарова

Сдано в набор 12.10.12. Подписано в печать 20.11.12. Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная. Заказ ВГ1212.

Журнал зарегистрирован в Министерстве Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций.

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-3762 от 20.06.2000.

Оригинал-макет ООО "Авансед солюшнз".

Отпечатано в ООО "Авансед солюшнз". 105120, г. Москва, ул. Нижняя Сыромятническая, д. 5/7, стр. 2, офис 2.