



БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Издается с января 2001 г.

5(113)
2010

Редакционный совет:

АКИМОВ В. А.
БАЛЫХИН Г. А.
БЕЛОВ С. В.
ЗАЛИХАНОВ М. Ч.
(председатель)
МАХУТОВ Н. А.
ПАВЛИХИН Г. П.
СИДОРОВ В. И.
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:
ГЕНДЕЛЬ Г. Л.
ГРУНИЧЕВ Н. С.
ИВАНОВ Н. И.
КАЛЕДИНА Н. О.
КАРНАУХ Н. Н.
КАРТАШОВ С. В.
КАЧАНОВ С. А.
КРАСНОГОРСКАЯ Н. Н.
КСЕНОФОНТОВ Б. С.
КУКУШКИН Ю. А.
МАСТРЮКОВ Б. С.
МЕДВЕДЕВ В. Т.
ПАНАРИН В. М.
ПОЛАНДОВ Ю. Х.
ПОПОВ В. М.
СИДОРОВ А. И.
ТОПОЛЬСКИЙ Н. Г.
ФРИДЛАНД С. В.
ХАБАРОВА Е. И.
ЦХАДАЯ Н. Д.
ШВАРЦБУРГ Л. Э.

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДСТАВЛЯЕМ ОРГАНИЗАЦИЮ — ТУЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Соколов Э. М., Самарцева Е. И. Тульский государственный университет.
80 лет служения Отечеству 2

ОХРАНА ТРУДА

Качурин Н. М., Коновалов О. В., Качурин А. Н. Аэрологическое обоснование
и математические модели вентиляции тоннелей при их строительстве 6
Карначев И. П. Оценка социально-экономического ущерба для жизни и здоровья
трудоспособного населения вследствие несчастных случаев на производстве 12

ПРОМЫШЛЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

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. 19
Качурин Н. М., Борщевич А. М., Качурин А. Н., Бухтияров А. А. Безопасность
геотехнологий добычи угля по газовому фактору. 24

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Соколов Э. М., Качурин Н. М., Белая Л. А., Агеева И. В. Концептуальные положения
повышения эффективности геоэкологического мониторинга промышленных регионов 28
Брынько Ю. В., Бурдова М. Г., Симанкин А. Ф. О возможности применения реагентного
метода для повышения скорости уплотнения сброженных осадков канализационной
очистной станции. 33
Захаров Е. И., Комиссаров М. С. Оценка геохимической устойчивости городских почв. 36

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ

Соколов Э. М., Качурин Н. М., Кузнецов А. А., Свиридова Т. С. Оценка дозы облучения
населения на территории Подмосквовного угольного бассейна атмосферными выбросами
аварии на Чернобыльской АЭС 40
Рошупкин Э. В. Система распределенного автоматизированного мониторинга загрязнения
атмосферного воздуха промышленных регионов 46
Стась Г. В., Агеев И. И., Демина О. В. Алгоритмы и комплекс программных средств
для прогноза газообмена в атмосфере шахт Подмосквовного угольного бассейна 53

Приложение. Белов С. В., Симакова Е. Н. Ноксология. Учебное пособие. Выпуск 1.

Журнал входит в Перечень ведущих и 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.

ПРЕДСТАВЛЯЕМ ОРГАНИЗАЦИЮ — ТУЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 930.1

Э. М. Соколов, д-р техн. наук, проф., **Е. И. Самарцева**, д-р ист. наук, проф.,
Тульский государственный университет
E-mail: ecology@tsu.tula

Тульский государственный университет. 80 лет служения Отечеству

Тульскому государственному университету в 2010 г. исполняется 80 лет со дня основания. В 1930 г. был основан Тульский механический институт, а в 1953 г. — Тульский горный институт. На базе этих институтов был создан политехнический институт, технический университет, а затем и классический университет. На всех этапах истории Тульского государственного университета проблема обеспечения безопасности жизнедеятельности занимала одно из ведущих положений в учебной и научной работе.

Ключевые слова: история Тульского государственного университета, образование, безопасность жизнедеятельности.

Sokolov E. M., Samarceva E. I. Tula state university. 80 years of serving fatherland

Tula State University was founded 80 years ago in 2010. Tula Mechanical Institute was founded in 1930 and Tula Mining Institute was founded in 1953. Polytechnic Institute, Technical University and then Classic University were created at the base of these institutes. The problem of safety of life activity was one of the important education and scientific problems during all historical periods of Tula State University.

Keywords: history of Tula State University, education, safety of life activity.

Тульский механический и Тульский горный институты — предшественники Тульского государственного университета

Создание Тульского механического института диктовалось объективными условиями индустриализации страны. Промышленность Тульского края остро нуждалась в технически грамотных работниках. Например, на местном железнодорожном узле не было ни одного специалиста с высшим техническим образованием; на шахтах Подмосквовного бассейна работали 9 иностранных инженеров; среди 2311 человек, занимавших должности инженеров и техников на предприятиях Тулы и округа, только 859 человек являлись дипломированными специалистами.

Подготовка к открытию института велась в течение всего 1929 года. 20 января 1930 года организатором вуза был назначен В. Г. Щепетев. 12 мая 1930 г.

Коллегия Главпромкадра ВСНХ СССР приняла постановление о необходимости немедленной организации Тульского механического института (ТМИ).

28 июня 1930 г. вышел приказ № 109 по Главпромкадру ВСНХ СССР о завершении работ по созданию в г. Туле вуза и присвоении ему на основании постановления СТО от 30.04.30 названия "Тульский механический институт".

Тогда же постановлением Главпромкадра были окончательно определены специальности, по которым институт должен был готовить инженеров: холодная обработка металлов, горячая обработка металлов, инструментальное дело и станкостроение.

1 июля 1930 г. в газете "Коммунар" было опубликовано объявление "вербовочной" (приемной) комиссии о приеме заявлений на первый курс ТМИ.

На 240 мест было подано 370 заявлений. Без конкурса были зачислены рабочие по направлениям предприятий, партпрофтысячники, выпускники рабфака. Только 6 человек из 254 принятых не имели производственного стажа. Средний возраст первых студентов был 28 лет. Молодые люди до 20 лет составляли лишь четверть состава.

В августе—сентябре 1930 г. завершилось комплектование профессорско-преподавательского состава, административной и хозяйственной частей института; оборудование кабинетов, библиотеки.

На заключительной стадии подготовительных работ был организован учебный комбинат в составе механического института, высших технических курсов, дневного и вечернего механических техникумов. Директором Тульского механико-машиностроительного комбината стал И. Н. Пирогов. Директором Тульского механического института был утвержден В. Г. Щепетев с возложением на него обязанностей помощника директора по комбинату.

В декабре 1934—августе 1935 гг. состоялся первый выпуск студентов. Дипломы инженеров-механиков-технологов получили около 170 человек. Первым защищал проект В. И. Сорокин — будущий главный инженер, директор ряда машиностроительных заводов, главный специалист Госплана СССР. 14 человек защитили дипломные проекты на "отлично", 34 — на "хорошо".

Многие выпускники ТМИ 1935 г. как и последующих годов занимали видные посты: министров, директоров заводов, научно-исследовательских ин-

ституты, являлись видными учеными, были удостоены званий Героев Социалистического труда, стали лауреатами государственных и ленинской премий, были награждены высшими орденами: это К. Н. Руднев, И. Ф. Белобородов, В. В. Фильчев, И. М. Михалёв, Н. К. Остроумов, К. А. Бунин и др.

Шла весенняя экзаменационная сессия 1940/41 уч. г. Экзамены сдавали 568 человек. Одновременно проходила защита дипломных проектов. 142 дипломника обоих факультетов — специального и механического готовились предстать перед Государственной экзаменационной комиссией. Ритм жизни института был нарушен 22 июня 1941 г.

В конце июня—начале июля 1941 г. ушли на фронт многие студенты, рабочие и служащие института. Среди них студенты 3-го курса: Егоров Виктор, Захаров Владимир, Липский Константин, Мельников Сергей, Макаров Владимир и др. Добровольно ушли на фронт все члены комитета комсомола во главе с секретарем Виктором Фатеевым. Многие студенты, которые по своему здоровью или возрасту не ушли на фронт, отправлялись на заводы Тулы, заменяя рабочих, ушедших в ряды армии. Студенты 4-го курса по указанию Главного управления учебными заведениями НКВ СССР были выпущены досрочно и направлены на работу по специальности на заводы Тулы и других городов. Во второй половине августа 1941 г. отряд студентов в 227 человек был отправлен на строительство оборонительных сооружений в район г. Вязьмы.

Значительный вклад коллектив института внес в защиту Тулы. Он активно участвовал в строительстве оборонительных сооружений вокруг города и на его улицах, формировании истребительных батальонов и отрядов народного ополчения.

Прошли тяжелые военные годы. Страна возвращалась к мирной жизни.

Одним из основных положений послевоенного восстановления и реконструкции народного хозяйства было ускоренное развитие угольной промышленности. Именно поэтому приказом министра высшего образования СССР от 5 октября 1950 г. в составе института был утвержден факультет горного машиностроения. Новый факультет приступил к подготовке студентов по следующим специальностям: горная электротехника; горные машины (со специализацией "машины для добычи полезных ископаемых" и "рудничный транспорт и рудничный подъем"). В этом же, 1950 г. началось строительство комплексов зданий горного техникума. Строительство первой очереди было завершено в 1952 г. По своей материальной базе, оснащению кабинетов, лабораторий и учебных мастерских Тульский горный техникум встал в один ряд с лучшими техникумами страны. В этом большая заслуга всего коллектива техникума и его директора В. Я. Крымцева.

Наличие такой крупной лабораторной и учебной базы сделало реальным открытие в Туле горного

института. Постановлением Совета Министров СССР от 19 июня 1953 г. и приказом министра культуры СССР от 9 июля 1953 г. "О мероприятиях по обеспечению Министерства угольной промышленности инженерами горных специальностей" предусматривалась организация Карагандинского, Пермского и Тульского горного институтов.

Приемные экзамены были проведены в ТМИ. Первым директором горного института стал канд. техн. наук, доц. Н. Н. Толокнов, имевший многолетний опыт учебно-организационной работы в вузах Ленинграда и Свердловска. Новый институт открылся 1 сентября 1953 г. 200 студентов первого набора приступили к занятиям по двум специальностям: разработка месторождений полезных ископаемых (125 человек) и горная электромеханика (75 человек). К 1962 г. горный институт имел четыре факультета: горный, строительный, радиотехнический и факультет автоматизации производственных процессов. Достаточно успешно решалась кадровая проблема.

С конца 1950-х годов профессорско-преподавательский состав института пополняется своими выпускниками и аспирантами.

ТМИ получил право принимать на защиту кандидатские диссертации в 1958 г. Первыми выпускниками аспирантуры, защитившимися в своем институте, стали Звягин и И. А. Клусов. Всего с 1951 по 1962 гг. закончили аспирантуру 163 человека. Количество преподавателей с учеными званиями и степенями за это время удвоилось. В конце 1962 г. в обоих институтах насчитывалось более 100 высококвалифицированных научно-педагогических работников, в том числе, 6 профессоров.

В 1951—1962 гг. вузы Тулы подготовили 6747 инженеров. Из них механический — 5067, горный — 1680. Горный техникум дал стране свыше 5 тысяч специалистов средней квалификации. Многие из выпускников стали директорами заводов, НИИ, начальниками конструкторских бюро и строек, шахт и угольных разрезов, главными специалистами предприятий и т. д.

9 мая 1963 г. было принято правительственное постановление "О мерах по дальнейшему развитию высшего и среднего специального образования, улучшению подготовки и использования специалистов". 19 июня того же года во исполнение постановления был издан под аналогичным названием приказ министра высшего и среднего специального образования РСФСР. Этим приказом был создан целый ряд новых технических институтов и заводов-вузов. В приказе имелся следующий параграф: "...объединить Тульский горный институт с механическим институтом, присвоить объединенному вузу наименование — Тульский политехнический институт (ТПИ)".

Большую работу по организации института в его новом качестве выполнили ректор института Г. П. Ананьин, проректоры по научной работе



Ф. В. Седыкин, по учебной — В. А. Голутвин, по административно-хозяйственной — А. А. Адаев. Объединенный институт не был простым сложением трех учебных заведений в одно.

В 1970 г. ректором ТПИ был назначен Федор Владимирович Седыкин. Вскоре (1971 г.) в институте начинается работа Тульский филиал научного семинара АН СССР по основным проблемам теории механизмов и машин (руководитель — проф. В. Ф. Прейс). Ответом на запросы времени стало открытие в ТПИ (1972 г.) факультета технической кибернетики во главе с проф. Т. И. Матикашвили.

В 1974 г. Ф. В. Седыкин был назначен зам. министра Минвуза РСФСР, и ректором ТПИ стал канд. техн. наук, доц. Соколов Эдуард Михайлович (с 1980 г. — д-р техн. наук).

В 1980 г. институт был награжден орденом Трудового Красного Знамени в связи с 50-летием со дня основания и за большие успехи в учебной и научной работе. Государственные награды были вручены 30 сотрудникам: среди них: Л. А. Толоконников, А. Я. Шайденко, Д. И. Бурцев, Ю. С. Рагозин, Ж. М. Лозинской и др. К этому времени ТПИ насчитывал около 15 тыс. студентов, которые обучались на 32 специальностях. Учебный процесс вели 33 доктора наук и 520 кандидатов.

В 1992 г. ТПИ получил новое наименование — Тульский государственный технический университет (ТулГТУ) — приказ Министерства науки, высшей школы и технической политики № 1119 от 07.12.92. Одновременно вуз начинает переходить к подготовке студентов по многоуровневой системе образования: 1-й уровень — неполное высшее, 2-й уровень — бакалавры, 3-й уровень — специалисты, магистры. 1992-й год знаменателен и открытием факультета профессиональной подготовки (декан — проф. Л. Н. Шмараков).

Проведя большую подготовительную работу, ТулГТУ в 1994 г. создает медицинский факультет (декан — проф. А. А. Хадарцев).

Вполне закономерно изменение статуса технического университета в 1995 году. В приказе Государственного комитета Российской Федерации по высшему образованию № 1036 от 11.07.95 говорилось уже о Тульском государственном университете (ТулГУ).

Успешное развитие в рамках ТулГУ Центра социально-гуманитарного образования способствовало открытию в 1996 г. гуманитарного факультета (декан — проф. И. А. Батанина). В этом же году был открыт механико-математический факультет (декан — д-р физ.-мат. наук, проф. В. И. Иванов) и физико-технический (декан — д-р техн. наук, проф. П. Г. Сидоров).

В настоящее время университет аттестован по всем специальностям с полным циклом обучения и прошел государственную аккредитацию: имеет уникальный набор направлений и специальностей, готовит инженеров, математиков, экономистов, менеджеров, юристов, дизайнеров, социологов, врачей

и других дипломированных специалистов по более чем 150 направлениям и специальностям. В нем работают более 200 профессоров, докторов наук, более 600 кандидатов наук, доцентов, десятки членов международных и российских академий, заслуженные деятели России, лауреаты государственных премий, премий Правительства и Президента РФ.

В аспирантуре и докторантуре университета активно ведется подготовка кадров высшей квалификации по многочисленным научным направлениям и специальностям: обучаются свыше 50 докторантов и 450 аспирантов и соискателей; действуют докторские и кандидатские диссертационные советы; в срок подготовки защищаются более 70 % аспирантов; ежегодно свыше 15 сотрудников защищают докторские диссертации.

Безопасность жизнедеятельности — неотъемлемое направление подготовки специалистов

Проблемы обеспечения безопасности технологических процессов были основными направлениями практической подготовки инженерных кадров, начиная с первых лет функционирования ТМИ. И во главе этой многоотраслевой деятельности всегда стояла кафедра, которая сейчас называется кафедрой аэрологии, охраны труда и окружающей среды. Эта кафедра готовит бакалавров, специалистов и магистров по направлению "Защита окружающей среды" и специальностям "Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов", "Безопасность технологических процессов и производств".

Кафедра ведет свою историю от кафедры "Рудничная вентиляция и техника безопасности" с января 1957 г. После объединения горного и механического институтов в 1963 г. кафедра получила название "Промышленная аэрология и охрана труда", а в 1986 г. была переименована в кафедру "Аэрология, охрана труда и окружающей среды" (АОТОС).

Основатель и первый заведующий кафедрой д-р. техн. наук, проф. Леонид Николаевич Быков является одним из видных деятелей горной науки.

В момент образования кафедра состояла всего из двух человек — заведующего и ассистента Е. М. Астахова. В сентябре 1957 г. на должность доцента были избраны канд. техн. наук А. Д. Климанов и по совместительству два крупных специалиста — доц. М. М. Нечипоренко — начальник Управления Тульского округа Госгортехнадзора и доц. В. В. Жабо — начальник отдела техники безопасности Приокского совнархоза.

Преподаватели кафедры обеспечивали проведение лекционных и лабораторных занятий и консультации дипломников следующих специальностей: "Разработка месторождений полезных ископаемых" и "Горная электромеханика" (а затем и "Шахтное строительство") по курсам "Рудничная вентиляция" и "Техника безопасности".

В 1959 г. при кафедре под научным руководством профессора Л. Н. Быкова началась подготовка ас-

пирантов по специальности "Подземная разработка угольных, рудных и нерудных полезных ископаемых" и в 1966 г. — по специальности "Техника безопасности и противопожарная техника" (научный руководитель — доц. А. Д. Климанов).

Успешной подготовке научных работников способствовало постоянное выполнение сотрудниками научно-исследовательских работ для промышленных предприятий и объединений. Начиная с 1958 г., кафедра выполняет научно-исследовательские работы, направленные на создание безопасных условий труда в промышленности.

Наиболее важными научно-исследовательскими работами, выполненными для шахт Подмосковского угольного бассейна, являются: исследования по запыленности воздуха в шахтах и разработка установок сухого пылеулавливания для очистных и проходческих комбайнов; анализ состояния вентиляции шахт и разработка мероприятий по ее усовершенствованию; исследования газообильности шахт и разработка мероприятий по борьбе с предотвращением выделения газа; исследования причин эндогенной пожароопасности шахт и разработка мероприятий по предупреждению возникновения эндогенных пожаров; исследование метанопроявлений в шахтах Подмосковского бассейна.

Предложенная сотрудниками кафедры методика прогноза углекислотообильности шахт была включена в руководство по определению газообильности шахт и принята проектными институтами (в частности "Ростовгипрошахтом") при проектировании вентиляции вновь строящихся в то время шахт ("Обуховская-Западная", "Зверевская" и др.) Весьма важное научно-практическое значение имела профилактика эндогенных пожаров в шахтах Подмосковского бассейна. В результате впервые была предложена методика количественной оценки эндогенной пожароопасности шахт бассейна и проведена классификация шахт по их пожароопасности, что дало возможность рациональнее расходовать средства на профилактику пожаров.

Начиная с 1978 г., серьезно разрабатывается в те годы еще сравнительно новая тематика, посвященная охране окружающей среды, а именно — оценке уровня воздействия породугольных отвалов угольных шахт СССР. Далее природоохранительное направление стало доминировать в научной тематике кафедры. В настоящее время создана научная школа "Рациональное природопользование, экологическая и технологическая безопасность".

Кафедра поддерживает постоянные научные связи по основным направлениям и разделам научной деятельности с более чем 80 вузами нашей страны, а также с зарубежными научными и учебными организациями (Горно-геологический факультет и научный центр по охране окружающей среды Белградского университета, Университет штата Нью-Йорк в г. Олбани (США), Сианьский горный институт (КНР)).

Начиная с 1993 г., кафедра готовит дипломированных инженеров-экологов по специальности "Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов", а с 1996 г. открыта подготовка инженеров по специальности "Безопасность технологических процессов и производств".

К 1996 г. осуществлен переход на многоуровневую систему подготовки по схеме: бакалавр — специалист — магистр, которая позволяет наиболее талантливым выпускникам продолжить обучение в аспирантуре, пополнить ряды молодых ученых.

В настоящее время кафедра осуществляет обучение по следующим направлениям и специальностям:

- Бакалавр — по направлению 280200 "Защита окружающей среды";
- Магистр — по направлению 280200 "Защита окружающей среды";
- Инженер — по специальности 280201 "Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов";
- Инженер — по специальности 280102 "Безопасность технологических процессов и производств".

В 2005 г. на кафедре введена магистерская подготовка по программам "Информационные технологии в защите окружающей среды" и "Утилизация и переработка отходов производства и потребления".

На кафедре работают аспирантура и докторантура, где выпускники могут продолжить обучение.

Преподаватели кафедры значительное внимание уделяют самостоятельной работе студентов, создают учебные пособия, активизирующие и контролируемые самостоятельную работу студентов. Кафедра имеет устойчивые связи с крупнейшими предприятиями региона, среди которых АК "Тулачермет", ОАО "Туламашзавод", ОАО "Азот" и другие ведущие предприятия области. На указанных предприятиях осуществляется производственная практика студентов и трудоустройство выпускников.

Научные достижения кафедры "Аэрология, охрана труда и окружающей среды" Тульского государственного университета признаны научной общественностью России, зарубежных стран и отмечены наградами самого высокого уровня. Заведующий кафедрой является лауреатом Премий Президента и Правительства Российской Федерации и целого ряда других высоких наград. За последние семь лет лауреатами премий Президента и Правительства Российской Федерации за высокие достижения в области образования, науки и техники стали семь сотрудников кафедры.

Необходимо отметить, что исследованиями по различным направлениям безопасности жизнедеятельности активно занимаются сотрудники и других подразделений ТулГУ. Среди них — кафедра "Геотехнология и строительство подземных сооружений", также как и кафедра "Аэрология, охрана труда и окружающей среды", представленная на страницах этого номера.

УДК 624.191.94:550.814:519.876.5

Н. М. Качурин, д-р техн. наук, проф.,
О. В. Коновалов, канд. техн. наук, доц., **А. Н. Качурин**,
 Тульский государственный университет
 E-mail: ecology@tsu.tula

Аэрологическое обоснование и математические модели вентиляции тоннелей при их строительстве

Рассмотрены схемы вентиляции тоннелей в период их строительства и показано, что важнейшими характеристиками аэрогазодинамических процессов в тоннелях при их проведении являются параметры движения воздушного потока и диффузионного переноса выделяющихся газовых примесей. Обоснованы базовые теоретические положения моделирования движения и диффузии газовых примесей в горных выработках. Получены уравнения для расчета продольного профиля скорости воздуха в тоннеле, динамики средней концентрации газовых примесей по длине тоннеля и в призабойной части.

Ключевые слова: уравнение движения, диффузия, газовая примесь, схема вентиляции, воздух, тоннель, математическая модель.

Kachurin N. M., Konovalov O. V., Kachurin A. N. Aerological foundation and mathematical models of ventilation for tunnels during tunneling period

The tunnel ventilation schemes for tunnelling period are considered and it is shown that major characteristics of aerogas dynamics processes during tunneling period are parameters moving air flow and diffusion transfer of escaping gas admixtures. Basic theoretical foundations of modeling motion and diffusion gas admixtures in tunnels were substantiated. The equations for calculating longitudinal profile of air velocity in tunnel and average concentration of gas admixtures along tunnel and in critical area of one were gotten.

Keywords: equation of motion, diffusion, gas admixture, ventilation scheme, air, tunnel, mathematical model.

Схемы вентиляции тоннелей при их строительстве

Наиболее распространенные схемы вентиляции тоннелей в период их строительства представлены на рис. 1. Анализ схем вентиляции, представленных на рис. 1, показывает, что важнейшими характеристиками аэрогазодинамических процессов в тоннелях при их проведении являются параметры движения воздушного потока и диффузионного переноса выделяющихся газовых примесей. При этом по конструктивным особенностям схемы вентиляции подразделяются на три типа — *нагнетатель-*

ные, всасывающие и комбинированные. Практическая реализация этих схем может быть весьма разнообразной, но аэродинамические особенности с присутствующими им достоинствами и недостатками будут, в основном, соответствовать этим трем типам схем. Однако разнообразие геологических условий, с которыми приходится сталкиваться при проектировании и строительстве тоннелей, настолько велико, что конструирование новых схем вентиляции всегда актуально. Особую остроту эта проблема приобретает при проветривании строящихся тоннелей большого поперечного сечения с использованием буровзрывного способа проходки.

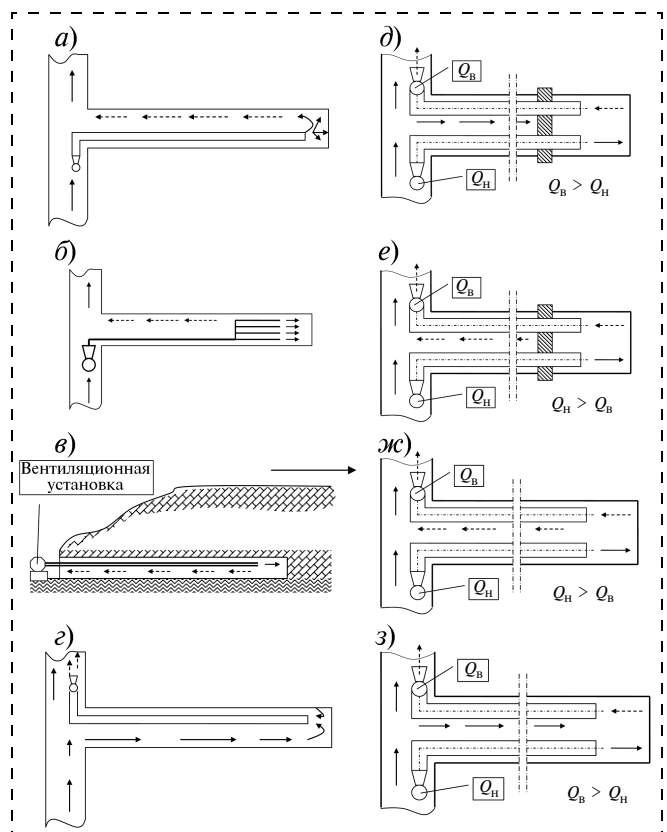


Рис. 1. Схемы вентиляции строящихся тоннелей:

a, б, в — нагнетательные схемы с различным расположением вентиляторов и различными конструкциями трубопроводов; *г* — всасывающая схема; *д, е, ж, з* — комбинированные схемы; Q_B, Q_N — производительность нагнетательного и всасывающего вентиляторов соответственно; — — — — — свежая струя воздуха; - - - - - исходящая воздушная струя.

Базовые теоретические положения моделирования движения воздуха в горных выработках и трубопроводах

В соответствии с основной теоремой динамики воздушного потока, индивидуальная производная от главного вектора количества движения рассматриваемого объема воздуха равна главному вектору объемных и поверхностных сил, приложенных к частицам, расположенным в рассматриваемом объеме и на ограничивающей его поверхности. То есть, если считать воздух несжимаемым, а это допущение справедливо для горных выработок и вентиляционных воздуховодов, то можно записать,

$$\frac{d\mathbf{K}}{dt} = \mathbf{F}_{об} + \mathbf{F}_{пов}, \quad (1)$$

где \mathbf{K} — главный вектор количества движения рассматриваемого объема воздуха; $\mathbf{F}_{об}$ и $\mathbf{F}_{пов}$ — главные векторы объемных и поверхностных сил соответственно.

Рассматривая произвольный объем воздуха Ω в вентиляционном потоке, ограниченный с внешней стороны поверхностью S , уравнение изменения количества движения (1) перепишем в следующем виде:

$$\frac{d}{dt} \iiint_{(\Omega)} \rho \mathbf{V} d\Omega = \iiint_{(\Omega)} \rho \mathbf{F}_M d\Omega + \iint_{(S)} T_{ij} dS, \quad (2)$$

где $\rho \mathbf{V}$ — вектор массовой скорости потока воздуха; \mathbf{F}_M — главный вектор массовых сил, действующих на воздух; T_{ij} — тензор напряжений в объеме воздуха Ω ; S — поверхность, ограничивающая объем жидкости Ω ,

$$T_{ij} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} — нормальные напряжения; τ_{xy} , τ_{xz} , τ_{yx} , τ_{yz} , τ_{zx} , τ_{zy} — касательные напряжения.

Для компонент тензора (3) использовано следующее правило индексов: первый индекс указывает ось координат, перпендикулярную рассматриваемой элементарной площадке; второй индекс — ось координат, вдоль которой действует рассматриваемое напряжение.

Рассмотрим производную соотношения (2).

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \iiint_{(\Omega)} \rho \mathbf{V} d\Omega &= \iiint_{(\Omega)} \frac{d}{dt} (\rho \mathbf{V}) d\Omega = \\ &= \iiint_{(\Omega)} \rho \frac{d\mathbf{V}}{dt} d\Omega + \iiint_{(\Omega)} \mathbf{V} \frac{d}{dt} (\rho d\Omega), \end{aligned}$$

но $\iiint_{(\Omega)} \mathbf{V} \frac{d}{dt} (\rho d\Omega) = \iiint_{(\Omega)} \mathbf{V} \frac{dm}{dt} = 0$ по условию сохранения массы m , тогда в общей форме соотношение (2) примет вид:

$$\iiint_{(\Omega)} \rho \frac{d\mathbf{V}}{dt} d\Omega = \iiint_{(\Omega)} \rho \mathbf{F}_M d\Omega + \iint_{(S)} T_{ij} dS. \quad (4)$$

Реологические закономерности для различных видов жидкостей, моделирующих свойства воздуха

в горных выработках и трубопроводах, позволяют задать в явном виде тензор T_{ij} , определив вид компонент матрицы (3). Тогда, используя закон сохранения количества движения (4), можно получить уравнение движения для конкретной физической модели воздуха. В реальных условиях возможны следующие варианты: воздух рассматривается как идеальная жидкость; изучается ламинарный режим течения вязкого воздуха; моделируется поток вязкого воздуха при турбулентном режиме течения.

Если воздух представить в виде идеальной жидкости, то тензор напряжений можно записать следующим образом:

$$T_{ij} = P_n = -p \varepsilon_{ij}, \quad (5)$$

где $P_n = \{\sigma_{xx} \sigma_{yy} \sigma_{zz}\}$; $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = -p$; p — давление воздуха;

$$\varepsilon_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{при } i \neq j, \\ 1 & \text{при } i = j, \end{cases} \quad (i, j = 1, 2, 3).$$

Следовательно, формулу (5) можно записать в следующем виде:

$$T_{ij} = \begin{pmatrix} -p & 0 & 0 \\ 0 & -p & 0 \\ 0 & 0 & -p \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Ламинарное течение вязкого воздуха характеризуют законом Ньютона, который в обобщенной форме записывается следующим образом:

$$\tau_{ij} = -\mu \frac{\partial V_j}{\partial x_i}, \quad (7)$$

где τ_{ij} — тензор касательных напряжений; μ — динамическая вязкость воздуха; V_j — компоненты главного вектора скорости \mathbf{V} ; x_i — пространственные координаты ($i = 1, 2, 3$; $x_1 = x$; $x_2 = y$; $x_3 = z$).

Жидкости, подчиняющиеся закону (7), называют ньютоновскими или идеальными в отличие от жидкостей, не подчиняющихся этим законам неньютоновских жидкостей.

Рассматривая воздух в качестве ньютоновской жидкости, тензор напряжений ламинарного течения вязкого воздуха можно записать следующим образом:

$$T_{ij} = -(p \varepsilon_{ij} + \tau_{ij}). \quad (8)$$

Второе слагаемое реологической закономерности (8) для однородной и изотропной среды можно записать в виде:

$$\tau_{ij} = \mu \begin{pmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} & \frac{\partial u}{\partial z} \\ \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{\partial v}{\partial z} \\ \frac{\partial w}{\partial x} & \frac{\partial w}{\partial y} & \frac{\partial w}{\partial z} \end{pmatrix}, \quad (9)$$



где \mathbf{u} , \mathbf{v} , \mathbf{w} — составляющие вектора скорости по осям x , y , z соответственно.

Касательные напряжения τ_x в плоскости, перпендикулярной оси Ox , с учетом допущения об однородности и изотропии исследуемой воздушной среды можно записать в виде

$$\tau_x = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial u}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial u}{\partial z} \mathbf{k} \right) (\mathbf{i} + \mathbf{j} + \mathbf{k}) = \mu \text{grad } \mathbf{u},$$

где \mathbf{i} , \mathbf{j} , \mathbf{k} — единичные векторы координатных осей x , y , z соответственно.

Рассуждая аналогично, для других плоскостей получим, $\tau_y = \mu \text{grad } \mathbf{v}$; $\tau_z = \mu \text{grad } \mathbf{w}$. Таким образом, второе слагаемое реологической закономерности (8) окончательно примет следующий вид:

$$\tau_{ij} = \mu \text{grad}(\mathbf{u}_{ij} + \mathbf{v}_{ij} + \mathbf{w}_{ij}) = \mu \text{grad } V_{ij}. \quad (10)$$

Рассматривая турбулентное течение вязкого воздуха, тензор напряжений записывают с учетом касательных напряжений, обусловленных турбулентными пульсациями:

$$T_{ij} = -p\varepsilon_{ij} + \tau_{ij} + \tau_{Tij}, \quad (11)$$

где τ_{Tij} — тензор касательных напряжений, обусловленных турбулентными пульсациями.

Третье слагаемое реологической закономерности (11) для однородной и изотропной турбулентности можно записать в виде:

$$\tau_{Tij} = -\rho \begin{vmatrix} \langle u_* u_* \rangle & \langle u_* v_* \rangle & \langle u_* w_* \rangle \\ \langle v_* u_* \rangle & \langle v_* v_* \rangle & \langle v_* w_* \rangle \\ \langle w_* u_* \rangle & \langle w_* v_* \rangle & \langle w_* w_* \rangle \end{vmatrix}, \quad (12)$$

где u_* , v_* , w_* — компоненты скорости турбулентных пульсаций.

Если воздух в вентиляционном потоке уподобляется идеальной жидкости, то уравнение (4) примет вид:

$$\iiint_{(\Omega)} \rho \frac{d\mathbf{V}}{dt} d\Omega = \iiint_{(\Omega)} \rho \mathbf{F}_M d\Omega - \iiint_{(\Omega)} \text{div}(p\varepsilon_{ij}) d\Omega, \quad (13)$$

следовательно, $\frac{d\mathbf{V}}{dt} = \mathbf{F}_M - \frac{1}{\rho} \text{div}(p\varepsilon_{ij})$.

В проекциях на оси координат уравнение (13) можно записать следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} &= X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} &= Y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} &= Z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

где u , v , w — компоненты вектора скорости, численно равные проекциям этого вектора на оси x , y , z

соответственно; ρ — плотность воздуха, X , Y , Z — проекции массовой силы \mathbf{F}_M на оси x , y , z .

В случае ламинарного течения вязкого воздуха уравнение (4) имеет вид:

$$\iiint_{(\Omega)} \rho \frac{d\mathbf{V}}{dt} d\Omega = \iiint_{(\Omega)} [\rho \mathbf{F}_M + \text{div}(-p\varepsilon_{ij} + \tau_{ij})] d\Omega, \quad (15)$$

следовательно,

$$\frac{d\mathbf{V}}{dt} = \mathbf{F}_M - \frac{1}{\rho} \text{div}(p\varepsilon_{ij}) + \nu \text{div}[\text{grad}(V_{ij})].$$

В проекциях на оси координат уравнение (15) можно записать следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} &= X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \Delta u \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} &= Y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \Delta v \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} &= Z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \Delta w \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

где Δ — трехмерный оператор Лапласа,

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}.$$

Для турбулентного течения вязкой жидкости уравнение (4) примет вид:

$$\iiint_{(\Omega)} \rho \frac{d\mathbf{V}}{dt} d\Omega = \iiint_{(\Omega)} [\rho \mathbf{F}_M + \text{div}(-p\varepsilon_{ij}) + \tau_{ij} + \tau_{Tij}] d\Omega,$$

откуда следует уравнение движения О. Рейнольдса,

$$\frac{d\mathbf{V}}{dt} = \mathbf{F}_M - \frac{1}{\rho} \text{div}(p\varepsilon_{ij}) + \nu \text{div}[\text{grad}(V_{ij})] - \frac{1}{\rho} \text{div}(\tau_{Tij}). \quad (17)$$

В проекциях на оси координат уравнение (17) можно записать в следующем виде:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \Delta u + \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial}{\partial x} (-\langle u_* u_* \rangle) + \frac{\partial}{\partial y} (-\langle u_* v_* \rangle) + \frac{\partial}{\partial z} (-\langle u_* w_* \rangle) \right]; \quad (18)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = Y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \Delta v + \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial}{\partial x} (-\langle v_* u_* \rangle) + \frac{\partial}{\partial y} (-\langle v_* v_* \rangle) + \frac{\partial}{\partial z} (-\langle v_* w_* \rangle) \right]; \quad (19)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = Z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \Delta w + \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial}{\partial x} (-\langle w_* u_* \rangle) + \frac{\partial}{\partial y} (-\langle w_* v_* \rangle) + \frac{\partial}{\partial z} (-\langle w_* w_* \rangle) \right]. \quad (20)$$

С практической точки зрения интерес представляет плоское стационарное течение. В реальных физических условиях будет действовать одна массовая сила — сила тяжести, тогда $Y = 0$, $Z = -g$.

То есть систему трех уравнений (18)–(20) можно свести к системе двух уравнений

$$\left. \begin{aligned} u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \Delta u + \\ &+ \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial}{\partial x} (-\langle u_* u_* \rangle) + \frac{\partial}{\partial y} (-\langle u_* v_* \rangle) \right] \\ u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} &= -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \Delta v + \\ &+ \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial}{\partial x} (-\langle v_* u_* \rangle) + \frac{\partial}{\partial y} (-\langle v_* v_* \rangle) \right]. \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

Л. Прандтль предложил следующую зависимость [1–3]:

$$u = 2,5v_* \ln \left(1 + \frac{30y}{k} \right), \quad (22)$$

где k — абсолютная шероховатость крепи тоннеля.

Тогда полагая, что допустимо приближенное равенство $v_* \approx \langle v_* \rangle$, получим,

$$\langle v_*^2 \rangle \approx \frac{0,16u^2}{\left[\ln \left(1 + \frac{30y}{k} \right) \right]^2}. \quad (23)$$

Используя формулу (23), можно вычислить производную в соотношении, которая войдет в уравнения движения

$$\frac{\partial}{\partial y} \langle v_*^2 \rangle \approx -\frac{9,6u^2}{(k+30y) \left[\ln \left(1 + \frac{30y}{k} \right) \right]^3}. \quad (24)$$

Тогда уравнения движения (21) примут следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \Delta u + \\ &+ \frac{9,6u^2}{\rho(k+30y) \left[\ln \left(1 + \frac{30y}{k} \right) \right]^3} \\ u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} &= -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \Delta v + \\ &+ \frac{9,6u^2}{\rho(k+30y) \left[\ln \left(1 + \frac{30y}{k} \right) \right]^3}. \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

Система уравнений (25) позволит прогнозировать профили продольной скорости воздуха на любом удалении от призабойного пространства.

Базовые теоретические положения моделирования диффузии газовых примесей в горных выработках

Перенос примесей в атмосфере тоннелей происходит путем диффузии. Различают три вида диффузии — молекулярную, конвективную и турбулентную. Интенсивность переноса характеризуется величиной диффузионного газового потока. Газовый поток представляет собой объем газа, прошедшего через единичную площадь в единицу времени: $j = M_T / (S \cdot t)$, где M_T — масса газа, прошедшего через поверхность с площадью S за период времени t .

В соответствии с видами диффузии различают и три вида газовых потоков — конвективный, молекулярный и турбулентный.

Конвективный газовый поток

$$j_k = \frac{G}{S} = \frac{G_T c}{S} = \frac{u S c}{S} = u c \Rightarrow j_k = u c,$$

где j_k — конвективный газовый поток; G_T , G — масса примеси и воздуха, проходящие через поверхность с площадью S в единицу времени; c — концентрация примеси в воздухе.

В проекциях на оси координат можно записать

$$j_{kx} = u c, j_{ky} = v c, j_{kz} = w c. \quad (26)$$

Молекулярный газовый поток определяется следующей феноменологической закономерностью (законом Фика): $j_M = -D_M \text{grad} c$, где j_M — молекулярный газовый поток; D_M — коэффициент молекулярной диффузии; $\text{grad} c$ — градиент концентрации примеси.

Известно, что градиент скалярной величины (в данном случае такой величиной является концентрация c) представляет собой вектор, направленный в сторону наивысшего возрастания поля скалярной величины. Следовательно, знак минус в правой части уравнения Фика означает, что примесь в воздухе распространяется в сторону уменьшения ее концентрации.

Уравнение Фика, записанное в проекциях на оси координат, имеет следующий вид:

$$j_{Mx} = -D_M \frac{\partial c}{\partial x}, j_{My} = -D_M \frac{\partial c}{\partial y}, j_{Mz} = -D_M \frac{\partial c}{\partial z}. \quad (27)$$

Турбулентный газовый поток определяется также по закону Фика: $j_T = -D_T \text{grad} c$, где D_T — коэффициент турбулентной диффузии. В проекциях на оси координат это выражение можно записать в виде:

$$j_{Tx} = -D_T \frac{\partial c}{\partial x}, j_{Ty} = -D_T \frac{\partial c}{\partial y}, j_{Tz} = -D_T \frac{\partial c}{\partial z}. \quad (28)$$

В общем случае коэффициент турбулентной диффузии D_T может зависеть от концентрации, пространственных координат, времени и направления



движения. Зависимость от координат определяется выражением

$$D_T = D_{Tx} + D_{Ty} + D_{Tz},$$

где $D_{Tx} = D_{Txx} + D_{Txy} + D_{Txz}$, $D_{Ty} = D_{Tyx} + D_{Tyy} + D_{Tyz}$, $D_{Tz} = D_{Tzx} + D_{Tzy} + D_{Tzz}$, т. е. в этом случае величина коэффициента турбулентной диффузии определяется девятью компонентами. Следовательно, коэффициент турбулентной диффузии определяется по формуле

$$D_T = \begin{pmatrix} D_{Txx} & D_{Txy} & D_{Txz} \\ D_{Tyx} & D_{Tyy} & D_{Tyz} \\ D_{Tzx} & D_{Tzy} & D_{Tzz} \end{pmatrix}. \quad (29)$$

Правило индексации для тензора (29) такое же, как и для тензора (3). В практических расчетах формулу (29) упрощают, принимая допущение о том, что диффузия является однородной и изотропной, тогда $D_T \approx D_{Txx} \approx D_{Tyy} \approx D_{Tzz}$.

Уравнение диффузии примеси в воздухе отражает закон сохранения массы. Для получения этого уравнения рассмотрим объем воздуха Ω , ограниченный поверхностью площадью 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 площадью S . Выделим на этой поверхности участок dS настолько малый, что его кривизной можно пренебречь, тогда масса газа, проходящего через этот участок 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 площадью S , равно $\iint_S \mathbf{j}_c dS$.

Изменение массы газа в единицу времени в элементарном объеме $d\Omega$ будет равно $\left(-\frac{\partial c}{\partial t} + I\right) d\Omega$, где $-\frac{\partial c}{\partial t}$ — скорость изменения массы в единичном

объеме воздуха за счет диффундирующего переноса (знак минус показывает, что масса газа убывает).

Изменение массы газа во всем объеме Ω в единицу времени равно $\iiint_{(\Omega)} \left(-\frac{\partial c}{\partial t} + I\right) d\Omega$. По закону

сохранения массы количество газа, ушедшего через поверхность площадью S , равно изменению количества газа в объеме, т. е. эти интегралы равны между собой:

$$\iint_S \mathbf{j}_c dS = \iiint_{(\Omega)} \left(-\frac{\partial c}{\partial t} + I\right) d\Omega. \quad \text{По формуле}$$

$$\text{Остроградского—Гаусса} \quad \iint_S \mathbf{j}_c dS = \iiint_{(\Omega)} \text{div}(\mathbf{j}_c) d\Omega.$$

$$\text{Тогда можно записать, что} \quad \iiint_{(\Omega)} \left(\frac{\partial c}{\partial t} + \text{div}(\mathbf{j}_c) - I\right) d\Omega = 0.$$

Но этот интеграл может быть равен нулю только в том случае, если подынтегральная функция равна нулю, т. е.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \text{div}(\mathbf{j}_c) - I = 0. \quad (30)$$

Уравнение (30) является уравнением неразрывности газового потока. Оно выражает в математическом виде закон сохранения массы для любой газодинамической системы. Если выразить суммарный газовый поток \mathbf{j}_c через его составляющие, то получим

$$\begin{aligned} & \frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(cu) + \frac{\partial}{\partial y}(cv) + \frac{\partial}{\partial z}(cw) = \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left[(D_M + D_{Tx}) \frac{\partial c}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(D_M + D_{Ty}) \frac{\partial c}{\partial y} \right] + \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left[(D_M + D_{Tz}) \frac{\partial c}{\partial z} \right] + I(x, y, z, t). \end{aligned} \quad (31)$$

Уравнение (31) представляет собой основное уравнение диффузии примесей в атмосфере тоннелей. 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 любой точке тоннеля в любой момент времени. Этот подход универсален и может быть использован для любых схем вентиляции и любых конструкций тоннелей.

Для тоннелей с эквивалентным диаметром 3...4 м можно принять допущение о том, что концентрация в плоскости произвольного поперечного сечения равна некоторому среднему значению c . После взрывной отбойки горной породы формируется зона отброса газов ВВ. В начальный момент времени t_0 в призабойной зоне будет начальная кон-

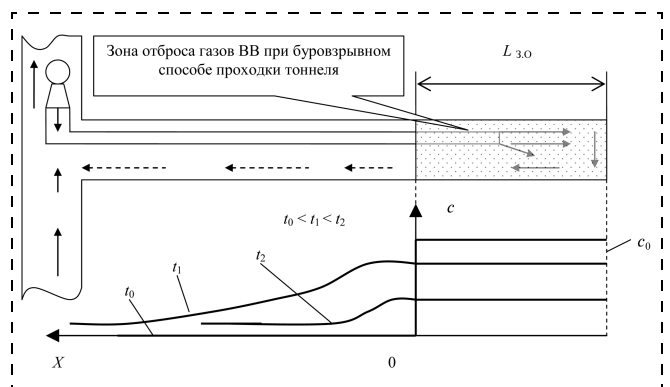


Рис. 2. Расчетная схема диффузии газовой примеси в тоннеле, который проводится буровзрывным способом: $L_{3.0}$ — длина зоны отброса газов ВВ при взрыве шпуров в забое

центрация c_0 . Затем распространение газов ВВ по длине тоннеля за счет конвективно-турбулентной диффузии будет формировать различные продольные профили средних концентраций этих газов. Тогда расчетная схема диффузии газовой примеси в тоннеле, который проводится буровзрывным способом, будет иметь вид, представленный на рис. 2. Уравнение (31) в этом случае примет вид:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} = D_T \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}, \quad (32)$$

где D_T — эффективное значение коэффициента турбулентной диффузии.

Начальные и граничные условия в этом случае можно записать в виде:

$$c(x, 0) = 0, \quad c(0, t) = \varphi(t), \quad \lim_{x \rightarrow \infty} c \neq \infty, \quad (33)$$

где $\varphi(t)$ — концентрация газовой примеси на границе зоны отброса газов ВВ.

Чтобы задать граничное условие в явном виде рассмотрим изменение газовой примеси в объеме зоны отброса газов ВВ после взрывания шпуров. Будем считать, что в зоне отброса газов будет происходить активное перемешивание и концентрация газовой примеси в любой точке этого объема будет одинаковой, и зависящей только от времени. Расчетная схема в этом случае будет иметь вид, представленный на рис. 3.

За время dt в объеме зоны отброса газов ВВ Ω количество газовой примеси изменится на величину $\Omega dc = -Q_{3,п} c dt$, где $Q_{3,п}$ — количество воздуха, поступающего в подготовительный забой. Следовательно, для зоны отброса газов ВВ справедливо дифференциальное уравнение:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\frac{Q_{3,п}}{\Omega} c. \quad (34)$$

Решение уравнения (34) имеет вид:

$$c(t) = c_0 \exp(-Kt), \quad (35)$$

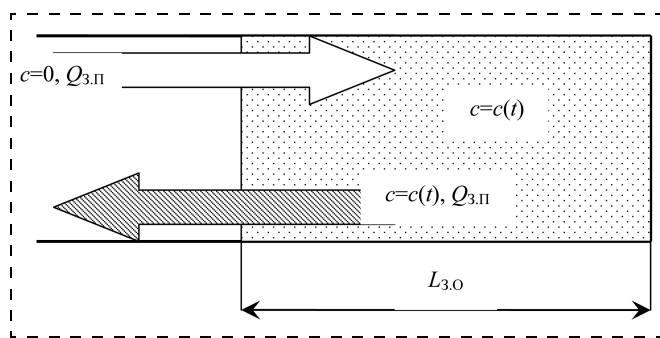


Рис. 3. Расчетная схема газообмена в зоне отброса газов ВВ

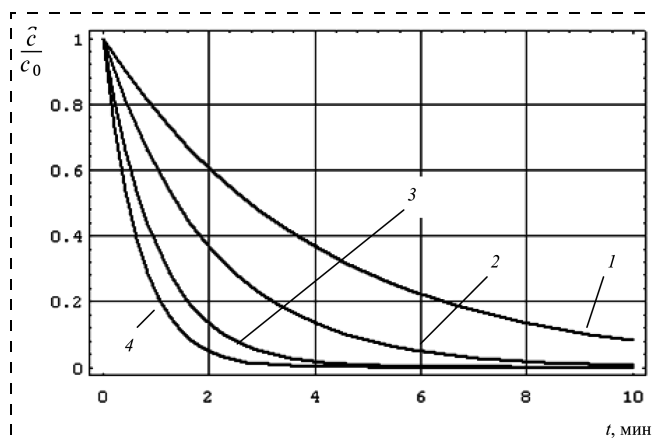


Рис. 4. График зависимости отношения концентраций c/c_0 от времени при различных значениях кратности воздухообмена K : 1 — 0,25; 2 — 0,5; 3 — 1; 4 — 1,5

где c_0 — концентрация примеси в призабойном пространстве; K — кратность воздухообмена в зоне отброса газов ВВ, $K = Q_{3,п}/\Omega$.

Результаты вычислительного эксперимента для призабойного пространства тоннеля представлены на рис. 4.

Следовательно, граничное условие для уравнения (32) можно записать следующим образом:

$$c(0, t) = \varphi(t) = c_0 \exp(-Kt). \quad (36)$$

Решение уравнения (32) для условий (33), с учетом зависимости (36), получено в следующем виде:

$$c(x, t) = 0,5c_0 \exp(-Kt) \left\{ \exp \left[-x \sqrt{\frac{\beta}{D}} \right] \operatorname{erfc} \left[\frac{x}{2\sqrt{D_T t}} - \sqrt{\beta t} \right] + \exp \left[x \sqrt{\frac{\beta}{D}} \right] \operatorname{erfc} \left[\frac{x}{2\sqrt{D_T t}} + \sqrt{\beta t} \right] \right\}, \quad (37)$$

где β — параметр массопереноса газовой примеси в объеме тоннеля, который вычисляется по формуле $\beta = u^2/D_T - K$.

Таким образом, получено физическое обоснование возможных аэродинамических процессов при проветривании тоннелей и разработаны математические модели аэрогазодинамики тоннелей при их строительстве. Математические модели аэрогазодинамики тоннелей позволят провести цикл вычислительных экспериментов и в каждом конкретном случае строительства тоннеля оценить газовые ситуации на различных этапах строительства. Следует отметить, что предлагаемые модели можно использовать как на стадии проектирования, так и непосредственно в период проведения тоннеля.



Список литературы

1. Ушаков К. З., Бурлаков А. С., Медведев И. И. Рудничная аэрология. — М.: Недра, 1978. — 478 с.
2. Ушаков К. З. О диффузии динамически активных газов в шахтных вентиляционных потоках // Известия вузов. Горный журнал. — 1968. — № 6. — С. 72–78.
3. Ушаков К. З. Аэромеханика вентиляционных потоков в горных выработках. М.: Недра, 1975. — 153 с.
4. Медведев И. И. Проветривание калийных рудников. — М.: Недра, 1970. — 211 с.
5. Соколов Э. М., Качурин Н. М., Кузнецов А. А. Газовыделение в тупокровные выработки шахт Подмосковного бассейна // Вентиляция шахт и рудников: Сб. ст. / ЛГИ. — Д., 1979. — С. 72–77.
6. Соколов Э. М., Качурин Н. М., Кузнецов А. А. Аэродинамические процессы в протяженных выработках углекислотобоильных шахт // Известия вузов. Горный журнал. — 1982. — № 8. — С. 52–56.
7. Лайгна К. Ю., Блом М. Ф., Вирилайд А. Х. Турбулентная диффузия в стратифицированных потоках подземных выработок // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 1988. — № 1. — С. 96–98.
8. Лайгна К. Ю. Анализ и усовершенствование метода расчета массообмена при конвективно-диффузионном переносе примесей в подземных горных выработках // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 1988. — № 4. — С. 110–1137.
9. Лайгна К. Ю., Поттер Э. А. Турбулентное струйное течение воздуха в сквозных выработках // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 1989. — № 3. — С. 91–101.

УДК 331.45.047.43

И. П. Карначев, канд. техн. наук,
Научно-исследовательская лаборатория Федерального государственного учреждения науки "Северо-западный научный центр гигиены и общественного здоровья" Роспотребнадзора, Мурманская область, г. Киров
E-mail: ecology@tsu.tula

Оценка социально-экономического ущерба для жизни и здоровья трудоспособного населения вследствие несчастных случаев на производстве

Рассмотрены вопросы количественной оценки социально-экономического ущерба для жизни и здоровья работников вследствие производственного травматизма, возможности использования методов определения стоимости среднестатистической жизни, которые базируются на существующих подходах к оценке социально-экономического ущерба в случае гибели индивидуума.

Ключевые слова: социально-экономическая оценка, ущерб, здоровье, травматизм, безопасность, трудоспособное население.

Karnachov I. P. *Evaluating social-economical prejudice for life and health of able-bodied population as a result of production accidents*

Problems of quantitative evaluating social-economical prejudice for life and health of able-bodied population as a result of industrial traumatism are discussed at the paper. Possibilities of using appraisalment average statistical life methods, which founding existent approach by evaluating social-economical prejudice in case of death person, are shown.

Keywords: social-economical estimation, prejudice, health, traumatism, safety, able-bodied population.

Влияние социально-экономического уровня региона на показатели безопасности труда. Исследуя причины, обуславливающие различные уровни травматизма и профессиональных заболеваний по отраслям народного хозяйства регионов страны можно выделить две главные факторные составляющие этих процессов — региональную специфику материального производства и комплекс социально-экономических показателей, влияющих на состояние безопасности труда на предприятиях региона [1].

Для первой составляющей (специфика материального производства) очевидно, что особенность экономики конкретного региона характеризуется спецификой основных отраслей промышленности, например, для Мурманской области она характеризуется сырьевой направленностью. Ознакомление с данными статистических бюллетеней показывает, что в сфере материального производства ведущее положение занимают предприятия горно-химической промышленности, черной и цветной металлургии, промышленности строительных материалов. Именно на этих предприятиях высок уровень профессиональной заболеваемости и числа несчастных случаев (НС) из-за травматизма ввиду технологической специфики условий труда на рабочих местах. Это положение подтверждается еще и тем,

что указанные предприятия относятся к числу производств с максимальным классом профессионального риска. Так, в соответствии с Классификацией видов экономической деятельности по классам профессионального риска они относятся к следующим классам (из 32 классов профессионального риска в промышленности): предприятия по производству и обогащению медной руды (код 13.20.1) — 29-й класс; предприятия по обогащению нефелин-апатитовых руд (код 13.20.33) — 30-й класс; предприятия по добыче и обогащению никелевой и кобальтовой руд (код 13.20.2) — 32-й класс.

Для второй составляющей (*комплекса социально-экономических показателей, влияющих на состояние безопасности труда*) рассмотрим общие подходы, которые обусловлены исследованием взаимосвязей различных социально-экономических показателей для количественной оценки экономической эффективности мероприятий по безопасности труда. Отметим, что в этом направлении за последнее время было предложено большое количество различных методик, которые имеют некоторые общие основы и предназначены, как правило, для решения задач двух типов:

- определению экономического ущерба, причиняемого объекту исследования от аварий, профессиональных заболеваний, производственного травматизма по показателям, отражающим социально-экономические потери, расходы, издержки;
- расчету экономической эффективности, связанной с внедрением различных мероприятий по улучшению условий труда и обеспечению безопасности людей как на предприятии, так и в регионе (сюда входит оценка капитальных вложений, эксплуатационных расходов, затраты на медобслуживание, аттестацию рабочих мест и др.).

В соответствии с Методическими рекомендациями РД 03-496—02 [2] впервые в отечественной практике был предложен вариант расчета стоимости человеческой жизни в случае НС исходя из объема налогов и произведенных материальных благ, определяемой в зависимости "...от вклада человека в валовой внутренний продукт (ВВП) страны". Конкретизация региональной особенности этого показателя представлена в работе [3], где была сделана попытка оценки стоимости человеческой жизни для каждого из субъектов Российской Федерации. Причем, в представленной автором методике суммарный ущерб от гибели одного человека в случае НС учитывает одновременно потери региона из-за недопроизведенного валового регионального продукта (ВРП) и размера компенсаций, которые положены семье в случае потери кормильца. Расчет последнего показателя (размер компенсаций) яв-

ляется трудоемким, поскольку требуются такие статистические региональные данные, как расходы на выплату пособий на погребение погибших, число иждивенцев на одного занятого в экономике, средний возраст иждивенцев и т. п.

Перечисленные показатели не всегда отражены в имеющейся статистической информации и поэтому потребуют дополнительных изысканий для получения таковой. Расчет же недопроизведенного ВРП предлагается исчислять по следующей формуле [3]:

$$P_{\text{ВТР}} = \left(\frac{\text{ВРП}}{Ч} - 12 \cdot \overline{ЗП} \right) (\overline{ПВ} - \overline{ВР}), \quad (1)$$

где $P_{\text{ВТР}}$ — ущерб государству от выбытия трудовых ресурсов (недопроизведенный ВРП); ВРП — валовой региональный продукт, для которого проводится оценка стоимости человеческой жизни; $Ч$ — число занятых в экономике; $\overline{ЗП}$ — средняя заработная плата в регионе; $\overline{ПВ}$ — средний пенсионный возраст в регионе; $\overline{ВР}$ — средний возраст в регионе.

Величина среднего пенсионного возраста для региона определяется следующим образом:

$$\overline{ПВ} = \left(\frac{60}{1+K} \right) + \left(\frac{55K}{1+K} \right), \quad (2)$$

где K — относительное соотношение женщин и мужчин в регионе.

На основании соответствующих статистических показателей Росстата [4] был проведен расчет недопроизведенного ВРП в случае гибели работника на производстве по формулам (1) и (2) для субъектов, входящих в состав Северо-Западного федерального округа (СЗФО) России за шестилетний период 2000—2005 гг., в том числе и для Мурманской области. Расчетные соотношения по недопроизведенному ВРП в случае гибели от НС по субъектам СЗФО графически представлены на рис. 1. Величины недопроизведенного ВРП в виде годовых гистограмм даны в ранжированном порядке (по мере убывания абсолютного значения ВРП в тыс. руб.) и распределились за временной период исследования следующим образом:

- минимальные уровни недопроизведенного ВРП (девятое и десятое значение ранга) имели Псковская и Калининградская области, чередуясь соответственно местами почти ежегодно, кроме 2004 г., когда на девятом месте находилась Республика Карелия, переместив Калининградскую область на восьмое ранговое место;
- максимальные уровни недопроизведенного ВРП (первое и второе значение ранга) неизменно занимали Вологодская область и Республика Ко-

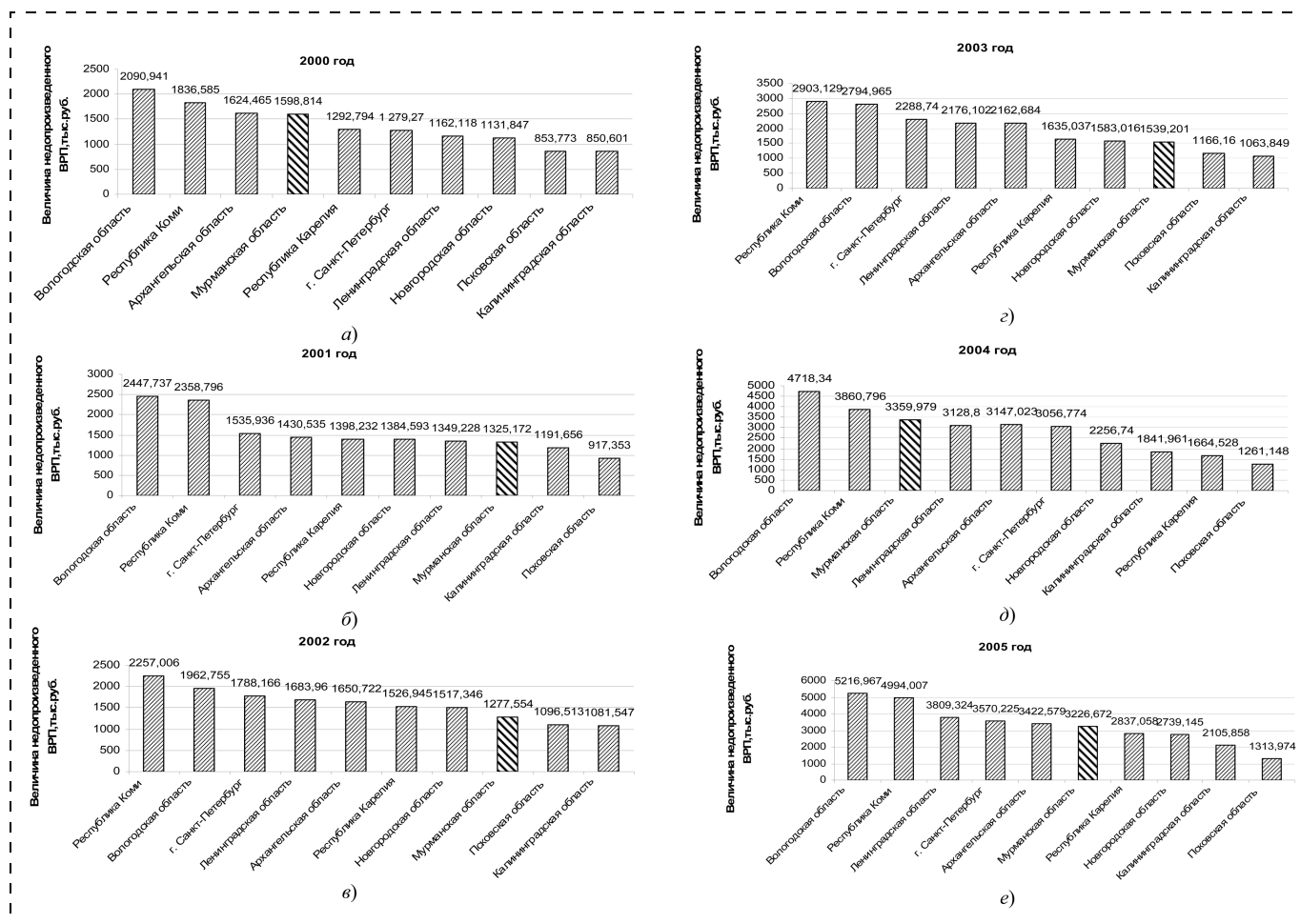


Рис. 1. Динамические ряды стоимостных уровней недопроизведенного валового регионального продукта по субъектам Северо-Западного федерального округа в случае гибели работника на производстве за период 2000–2005 гг.

ми, абсолютное значение ВРП которых отличалось всего в 1,03–1,21 раза;

- Мурманская область в этой последовательности всегда занимала промежуточное ранговое значение уровня недопроизведенного ВРП (на представленных диаграммах упомянутый регион визуально имеет соответствующую отличительную штриховку), перемещаясь с третьего места (2004 г.) на восьмое место (три года с 2001–2003 гг.).

Таким образом, анализ графиков позволил выявить среди регионов СЗФО закономерные места "лидеров" (Вологодская область и Республика Коми) и "аутсайдеров" (Псковская и Калининградская области) по ранговому показателю недопроизведенного ВРП в случае гибели работника на производстве. А годовые колебания стоимостных значений недопроизведенного ВРП по Мурманской области, которые соответственно отобразились в смене рангового места этого региона, можно объяснить изменением региональных социально-экономических показателей.

В диссертационном исследовании Воробьева М. М. [5] комплексный анализ социально-экономического развития региона России рассматривается как с точки зрения его хозяйственных результатов (первая группа показателей), так и отдельно с позиций безопасности труда (вторая группа показателей). В качестве исходных показателей первой группы автором использовались социально-экономические характеристики. Во вторую группу показателей входили средние по каждому региону коэффициенты частоты травматизма, частоты смертельного травматизма, тяжести травматизма, а также процент предприятий в регионе, не имеющих за год страховых случаев травматизма и профессиональной заболеваемости.

На основании канонических корреляций комплекса показателей двух групп составлена таблица в виде ранжированного ряда из 88 обследованных субъектов России по уровню благоприятности социально-экономических условий для безопасности труда. Все субъекты по указанному критерию

разбиты на три группы: а) группа с высоким и выше среднего уровнем (42 региона); б) группа с ниже среднего и низким уровнем (20 регионов); в) группа с крайне низким уровнем (26 регионов). Из представленных результатов ранжирования по упомянутому источнику [6] для субъектов СЗФО можно отметить следующие особенности:

- восемь регионов СЗФО из десяти по представленной методике входят в группу высокого и выше среднего уровня благоприятности условий для безопасности труда (в том числе и Мурманская область);
- только один регион СЗФО относится к группе с ниже среднего и низким уровнем благоприятности (Архангельская область) и один регион СЗФО относится к группе крайне низкого уровня благоприятности (Республика Коми).

Если же произвести сопоставление результатов ранжирования субъектов СЗФО по представленным в работе [4] расчетным показателям с результатами рассчитанных уровней недопроизведенного ВРП в случае гибели работника по источнику [3], то значение порядка ранга регионов почти полностью совпадает: например, Псковская область с минимальным значением этого показателя занимает в соответствии с исследованиями по работе [4] предпоследнее ранговое значение (что также имеет место в соответствии с графиками рис. 1, а, в и г), а Республика Коми — занимает первое ранговое место (см. рис. 1, в и г). Мурманская область при сопоставлении по значению ранга с расчетом уровня недопроизведенного ВРП и уровня благоприятности социально-экономических условий для безопасности труда занимает третье ранговое место, что видно на графике рис. 1, д.

В заключение отметим, что в целом рассмотренные методики вполне корректно позволяют оценить региональную особенность уровня социально-экономического развития во взаимосвязи с показателями по безопасности труда. Однако по нашему мнению, все они обладают недостатком, связанным с ретроспективным характером изучаемых явлений, когда оценка стоимостного ущерба требует обязательного свершения события (аварии или другого события, приводящего к травме или гибели работника). Одним из иных вариантов является использование методики прогнозного вероятностно-статистического моделирования приемлемого риска на промышленных предприятиях региона в виде прогнозного вероятностного числа НС [6]. Вариант такого подхода позволит рассматривать взаимосвязь факторов безопасности труда с факторами, определяющими эффективность хозяйственной деятельности региона в будущем, что позволит упреждающе производить необходимые

технично-технологические, социально-экономические, оздоровительно-профилактические мероприятия по "сезонному" уровню приемлемого риска на промышленных предприятиях этого региона.

Методы стоимостной оценки социально-экономического ущерба вследствие производственного травматизма. Если рассматривать национальную экономику любого государства как единое целое, то нельзя не признать, что существующая взаимозависимость всех членов общества приводит к тому, что несчастный случай с одним из них сказывается в целом на уровне жизни всего населения [7].

При использовании экономических методов анализа производственного травматизма (ПТ) подробно рассчитывают потери, обусловленные НС, которые, как правило, включают перечень стоимостных показателей как на микроуровне (предприятие, фирма), так и макроуровне (регион, государство). В рамках экономической концепции анализ риска ПТ рассматривают как часть затратно-прибыльного исследования [8]. В этом варианте риски являются ожидаемыми потерями полезности, возникающими вследствие некоторых нежелательных событий, и выгода (прибыль) здесь выступает в виде предотвращенного ущерба. Поэтому с очевидной уверенностью можно говорить о присутствии экономической составляющей в вопросах анализа ПТ с позиций экономики труда и трудового менеджмента [9, 10]. В настоящее время существует большое количество методик по определению экономической эффективности мероприятий по безопасности труда, причем с позиции теории рисков безопасность труда характеризует "...состояние деятельности, при которой либо исключено полностью, либо доведено до пороговых значений приемлемости действие рисковеносущих факторов" [11].

Все эти методики имеют, как правило, общие основы и предназначены для решения задач следующих двух типов [10, 12]:

1) определение экономического ущерба, причиняемого предприятию от аварий, профессиональных заболеваний, ПТ по различным показателям, отражающих социально-экономические потери и издержки;

2) расчет экономической эффективности различных мероприятий по улучшению условий труда по соответствующим статьям затрат на их реализацию, включая оценку капитальных вложений и эксплуатационных расходов.

Методики по определению ущерба отличаются друг от друга полнотой учета потерь: расходами предприятия и сторонних организаций, а также расходами из фонда социального обеспечения. При этом весь перечень перечисленных выше последствий



в виде затрат, возникающих от НС на производстве, можно представить с дифференциацией этого ущерба по следующим трем уровням возмещения [13]:

- I уровень — производственные издержки (непосредственный ущерб от наступления НС на производстве);
- II уровень — внепроизводственные издержки (ущерб, опосредованно связанный с ликвидацией НС);
- III уровень — другие экономические издержки (ущерб, в виде отдаленных последствий НС).

Одной из первых задач при экономическом обосновании мероприятий по улучшению условий и охраны труда является выявление *затрат на реализацию мероприятий по улучшению условий и охраны труда*. Эти затраты включают капитальные вложения и эксплуатационные расходы.

К капитальным вложениям относят единовременные затраты на создание основных фондов для улучшения условий и охраны труда, состав которых соответствует основным направлениям проводимых или планируемых мероприятий, а также на совершенствование техники и технологии в целях улучшения условий труда и обеспечения травмобезопасности и безаварийности производства.

К эксплуатационным расходам относятся текущие затраты на содержание и обслуживание основного технологического оборудования, вызванные его совершенствованием в целях улучшения условий труда и предотвращения производственного травматизма, а также затраты на проведение мероприятий по охране труда за счет цеховых и общезаводских расходов.

В продолжение тематики по оценке и анализу ПТ с социально-экономических позиций отметим, что важное значение имеет нозологическая природа утраты трудоспособности работником [14]. Так, если вредный производственный фактор является причиной профессиональных заболеваний, то необходимо, например, определить вероятность заболевания работников по полу и возрасту, продолжительность контакта с вредными веществами, объективные показатели степени тяжести заболевания и др. Если же опасный производственный фактор приводит к гибели работников, то необходимо иметь информацию о распределении количества погибших по различным причинно-следственным факторам, приведших к смертельному исходу, знать число иждивенцев, приходящихся на 1000 погибших и т. п. В соответствии с этим результирующие показатели ПТ можно сгруппировать по следующим составляющим:

- *экономическая* — расходы на лечение и реабилитацию в связи с потерей трудоспособности, затраты на компенсацию доходов и др.;

- *социальная* — ущерб здоровья, утрата трудоспособности, смертность, численность иждивенцев погибших и др.

Однако стоимостная оценка этих составляющих, по мнению ряда авторов, имеет некоторые особенности [13, 15, 16]. Так, численная оценка экономического ущерба, обусловленного гибелью людей в результате НС или ухудшения их здоровья вследствие травм и заболеваний, не представляет особых трудностей и выполняется по соответствующим методикам. А вот социальная составляющая ущерба вследствие ПТ и профессиональной заболеваемости при любых методах расчета потерь не всегда может быть объективно определена, так как многие ее компоненты трудно (а иногда и невозможно) выразить через стоимостные показатели.

В качестве нормативного показателя экономических потерь, обусловленных ПТ на отечественных предприятиях, рекомендуется исчислять показатель материальных последствий НС по формуле [17]:

$$K_M = 10^{-3} MP \cdot P^{-1}, \quad (3)$$

где MP — материальные последствия НС за отчетный период, руб.; P — среднесписочная численность работников, чел.

Однако в указанной зависимости (3) значение числителя MP , например, по статьям затрат, которые были перечислены выше, не конкретизируются. Дополнительно в качестве экономического показателя ПТ также рекомендуется исчислять стоимость экономической оценки потерь рабочего времени \mathcal{E} в результате НС из расчета на 1000 работающих по следующей формуле:

$$\mathcal{E} = 10^{-3} Z_n \cdot T \cdot P^{-1}, \quad (4)$$

где Z_n — средняя зарплата пострадавшего, руб.; T — общее число рабочих дней, потерянных за счет НС за отчетный период.

Следует заметить, что балансовый подход к суммарной оценке потерь по причине НС в отечественной практике является не новым, поскольку еще в период существования Советского Союза этот метод был рекомендован различными авторами при экономическом анализе последствий ПТ. Так, например, авторами работы [18] предлагалось определять экономический ущерб от НС на предприятии в стоимостном выражении следующим образом:

$$\mathcal{E}_{\text{НС}} = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 + P_7 + P_8 + P_9, \quad (5)$$

где P_1 — потери, связанные с простоем работников и оборудования, вызванные случаями травматизма; P_2 — заработная плата пострадавшему за недоработанное время (смену); P_3 — затраты, связанные с доставкой пострадавшего в медицинское учреждение;

дение; P_4 — выплата пособия по временной нетрудоспособности при нарушении предприятием правил охраны труда; P_5 — доплата к пенсии до уровня средней заработной платы при потере трудоспособности в результате НС; P_6 — доплаты работнику при частичной утрате трудоспособности, требующей перевода на более легкую работу; P_7 — единовременная помощь семье пострадавшего от НС с тяжелым исходом; P_8 — упущенная экономическая выгода; P_9 — суммы, взыскиваемые по регрессивным искам с предприятий в случае травматизма, связанным с грубейшими нарушениями правил техники безопасности.

Отметим, что денежное выражение материальных последствий МП в числителе формулы (3) может быть определено в виде экономического ущерба по зависимости вида (5). Авторами работы [19] одновременно предлагается рассчитывать и экономический ущерб, наносимый всему обществу (т. е. на макроуровне) в результате преждевременного ухода на пенсию работника вследствие последствий полученной травмы:

$$\mathcal{E}_{\text{НС}}^{\text{об}} = (D_q \Delta_q + D_{\text{п}} + D_{\text{л}})T + D, \quad (6)$$

где D_q — потеря той части национального дохода, которую мог бы дать работник в среднем за год; Δ_q — темп прироста чистого продукта в отрасли экономики, где работал пострадавший; $D_{\text{п}}$ — выплата пенсий за этот период; $D_{\text{л}}$ — затраты на лечение последствий травмы; T — число лет с момента выхода на преждевременную пенсию до получения пенсии по возрасту; D — годовая разница в пенсии по инвалидности и в пенсии по старости.

В отечественной практике экономического анализа ПТ в последнее время стала шире использоваться концепция оценки не только экономиче-

ского ущерба его последствий, но и более широкая категория потерь по причине НС в виде социально-экономического ущерба [19]. На основании проведенного авторами [19] комплексного анализа ПТ на промышленных предприятиях Республики Башкортостан помимо исчисления экономической составляющей материального ущерба предложена методика количественной оценки морального ущерба пострадавшему работнику. Такой подход позволяет минимизировать роль субъективного фактора оценки ПТ, а также учесть личностные социально-психофизиологические характеристики работника. Основным критерием для расчета величины морального ущерба пострадавшего работника на производстве является оценка экономической эффективности жизнедеятельности его после негативного воздействия производственной среды. *Стоимостной показатель морального ущерба по причине ПТ* предлагается определять следующим образом [20]:

$$Y_{\text{мор}} = (C_{\text{ЭК}} K_{\text{кр}} + C_{\text{ОС}}) P_{\text{СТ}} P_{\text{П}} P_{\text{С}} + АИ, \quad (7)$$

где $Y_{\text{мор}}$ — величина морального ущерба вследствие повреждения здоровья, руб.; $C_{\text{ЭК}}$ — потенциальная экономическая эффективность жизнедеятельности человека, руб.; $K_{\text{кр}}$ — коэффициент карьерного роста; $C_{\text{ОС}}$ — остаточная экономическая эффективность жизнедеятельности человека, руб.; $P_{\text{СТ}}$ — показатель степени тяжести НС на производстве; $P_{\text{П}}$ — психофизиологический показатель; $P_{\text{С}}$ — социальный показатель; $АИ$ — альтернативные издержки (упущенная выгода), руб.

Рекомендации и формулы по определению всех входящих переменных в выражение (7) подробно изложены в источнике [19]. В зависимости от степени тяжести полученной травмы дается примерное среднерасчетное соотношение материального и морального ущерба, которое для удобства восприятия приведено в виде таблицы.

Для наглядности анализа представим официальные статистические данные о смертельном травматизме в РФ в 2000—2007 гг. по трем ведомствам: Роструд, ФСС, Росстат (рис. 2). Как, в частности, отмечается в национальном докладе "О реализации государственной политики в области условий и охраны труда в Российской Федерации в 2005 году" [20] статистические данные по НС по упомянутым выше государственным органам РФ отличаются друг от друга ввиду того, что они формируются на основе различных методологических подходов. В Роструде подлежат учету все НС с летальным исходом, по которым составлялись акты по форме Н-1.

Росстат ведет учет НС на производстве со смертельным исходом по ограниченному кругу видов экономической деятельности, производя выбороч-

Среднее соотношение материального и морального ущерба по степени тяжести полученной травмы на производстве [79]

Степень тяжести травмы	Вид ущерба	Оценка ущерба	
		%	руб.
<i>Легкая</i> (до 21 дня нетрудоспособности)	Материальный	34	12 000
	Моральный	66	30 000
Общая сумма ущерба		100	42 000
<i>Средней тяжести</i> (от 22 до 60 дней нетрудоспособности)	Материальный	28	35 000
	Моральный	72	150 000
Общая сумма ущерба		100	185 000
<i>Тяжелая</i> (свыше 60 дней нетрудоспособности)	Материальный	20	52 000
	Моральный	80	450 000
Общая сумма ущерба		100	502 000

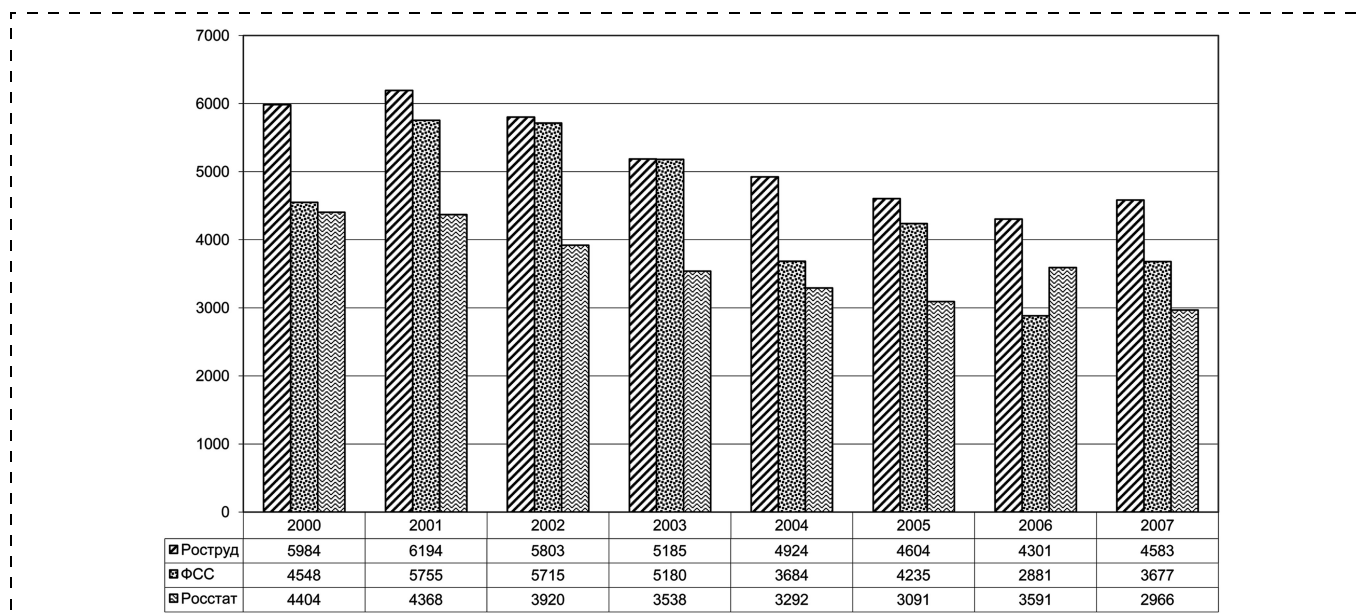


Рис. 2. Иллюстративное сопоставление статистических данных о несчастных случаях на производстве со смертельным исходом по данным различных государственных ведомств РФ за период 2000—2007 гг.

ное обследование, охватывающее только 25...30 % работающих. В свою очередь ФСС РФ учитывает категорию только такого типа НС, которые обязательно признаны страховыми случаями.

В заключение можно сделать вывод о большой неопределенности в части оценки стоимости средне-статистической жизни (ССЖ) ввиду многочисленности критериев и различных подходов к категории "цена жизни", а также в связи с недостаточной разработанностью и трудоемкостью применения вышеописанных методик в реальных условиях места и времени.

Список литературы

1. Карначев И. П. Региональная особенность уровня социально-экономического развития и его влияние на комплекс показателей по безопасности труда // Проблемы социально-экономического развития регионов Севера: сб. науч. ст. — Апатиты: изд. КФ ПетрГУ, 2007. — Вып. 3. — С. 24—29.
2. Методические рекомендации по оценке ущерба от аварий на опасных производственных объектах (РД 03-496—02). — М.: "НТЦ по безопасности в промышленности Госгортехнадзора РФ", 2002. — 40 с.
3. Дулясова М. В., Стрижкова Н. В. Социально-экономический ущерб работнику вследствие несчастного случая на производстве: Учебное пособие. — Уфа: Изд-во УГНТУ, 2004. — 63 с.
4. Регионы Северо-Западного федерального округа. Социально-экономические показатели. Стат. сб. / Комистат. — Сыктывкар, 2007. — 182 с.
5. Воробьев М. М. Теория, методология, практика оценки безопасности производственной среды и управления профессиональными рисками (на примере угольных шахт). Автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.26.01. — М., 2004. — 46 с.
6. Карначев И. П. Анализ и моделирование уровня безопасности труда с позиций производственного травматизма на региональном уровне. — Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 2008. — 230 с.
7. Andreoni D. Затраты, связанные с несчастными случаями на производстве / Энциклопедия МОТ по охране и безопасности труда. 4-е изд., 2000. Т. 2. Разд. VIII. — Гл. 56. — Режим доступа: <http://www.oshnet.me.tut.fi:1888/iloenc>
8. Вишняков Я. Д., Радаев Н. Н. Общая теория рисков. М.: Изд. центр "Академия", 2007. — 368 с.
9. Экономика и социология труда / Под ред. А. Я. Кибанова. — М.: ИНФРА-М, 2007. — 584 с.
10. Шириков А. И. Менеджмент охраны труда. — Ростов н/Д.: Феникс, 2000. — 384 с.
11. Кирсанов К. А., Михайлов Л. М. Рискология (управление рисками). — М.: Экзамен, 2003. — 384 с.
12. Халин Е. В. Безопасность производства: технологии, способы, устройства. — М.: ГНУ ВИЭСХ, 2006. — 372 с.
13. Гуревич Е. Р. Оценка экономического ущерба и страховых платежей производственного травматизма на предприятиях угольной промышленности. Автореф. дис. ... канд. экон. наук: 08.00.05. Санкт-Петербург, 1997. — 22 с.
14. Экономика труда: социально-трудовые отношения / Под ред. Н. А. Волгина, Ю. Г. Одегова. — М.: Экзамен, 2006. — 736 с.
15. Урланис Б. Ц. Эволюция продолжительности жизни. — М.: Статистика, 1978. — 310 с.
16. Куплевацкий Н. М., Шевелев В. С. Предупреждение производственного травматизма в сельском хозяйстве. — М.: Россельхозиздат, 1985. — 240 с.
17. Фомин А. Д. Руководство по охране труда. — М.: Апрохим-Пресс, 2004. — 216 с.
18. Ершова Т. В., Мишин Ю. Т. Об экономической оценке заболеваемости с временной утратой нетрудоспособности // Здравоохранение Российской Федерации. — 1975. № 11. С. 7—10.
19. Дулясова М. В., Стрижкова Н. В. Методические рекомендации по количественной оценке морального ущерба работнику вследствие несчастного случая на производстве. — М.: Новые технологии, 2004. — 52 с.
20. Доклад "О реализации государственной политики в области условий и охраны труда в Российской Федерации в 2005 году". — М.: Минздравсоцразвития, 2006. — 90 с.

УДК 622.411.33:622.12

Н. М. Качурин¹, д-р техн. наук, проф., А. М. Борщевич², А. А. Бухтияров¹,

¹Тулский государственный университет

²ЗАО "Южкузбассуголь"

E-mail: ecology@tsu.tula

Прогноз выделения метана с поверхности обнажения разрабатываемого угольного пласта и нагрузка на лаву при интенсивной выемке угля

Рассмотрены физическая модель и математическое описание выделения метана с поверхности угольного пласта. Представлены результаты теоретического анализа и обоснования базовой закономерности для прогноза выделения метана с поверхности угольного пласта.

Ключевые слова: очистной участок, производительность, метан, угольный пласт, газовыделение, прогноз.

Kachurin N. M., Borschevich A. M., Buhtiyrov A. A. Forecasting methane emanation from mined coal seam face and mining face productivity by intensity coal extraction

Physical model and mathematical description of methane emanation from mined coal seam face were created. The results of theoretical analysis and foundation on basic regularity for forecasting methane emanation from mined coal seam face were represented.

Keywords: mining face, productivity, methane, coal seam, gas emanation, forecasting.

Рассматривая угольные пласты, которые обрабатывают по технологии "шахта—лава", процесс фильтрационного движения метана принято считать ламинарным и одномерным [1]. Расчетная схема выделения метана с поверхности обнажения разрабатываемого угольного пласта для таких условий представлена на рис. 1.

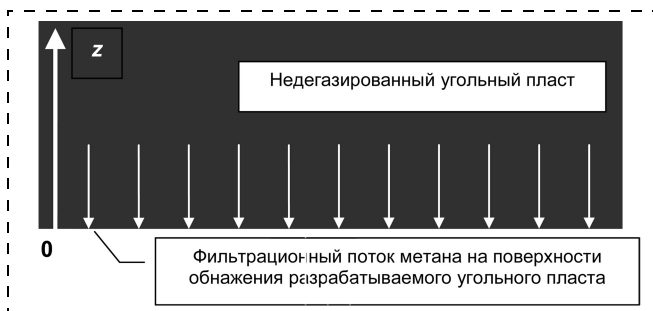


Рис. 1. Схема выделения метана с поверхности обнажения разрабатываемого угольного пласта

Учитывая весьма значительную скорость подачи комбайна в лаве, необходимо использовать уравнение фильтрации гиперболического типа [2], поэтому математическое описание поля давлений свободного метана в краевой части разрабатываемого угольного пласта имеет следующий вид:

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

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; $\chi_{y.п}$ — пьезопроводность угольного пласта, зависящая от фильтрационных и сорбционных свойств угля.

Длина выемочного столба на 1—2 порядка превышает мощность разрабатываемого угольного пласта и размеры зоны естественного газового дренирования, поэтому физически обосновано можно рассматривать одномерное полубесконечное пространство, что позволяет записать начальные и граничные условия в следующем виде:

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

где p_0 , p_c — давление свободного метана в угольном пласте и на поверхности обнажения пласта соответственно.

Решение уравнения (1) для условий (2) можно записать следующим образом [3]:

$$\begin{aligned} \frac{p^2 - p_0^2}{p_c^2 - p_0^2} = \exp[-0,5z(t_r \chi_{y.п})^{-0,5}] + 0,5z(t_r \chi_{y.п})^{-0,5} \times \\ \times \int_0^t (\tau^2 - z^2 t_r \chi_{y.п}^{-1})^{-0,5} \exp(-0,5\tau t_r^{-1}) \times \\ \times z(t_r \chi_{y.п}^{-1})^{0,5} \\ \times I_1^B [0,5 t_r^{-1} (\tau^2 - z^2 t_r \chi_{y.п}^{-1})^{0,5}] d\tau \text{ при } t \geq z(t_r \chi_{y.п}^{-1})^{0,5}, (3) \end{aligned}$$



$$\frac{p^2 - p_0^2}{p_c^2 - p_0^2} = 0 \text{ при } t < z(t_r \chi_{y.п}^{-1})^{0,5}, \quad (4)$$

где τ — переменная интегрирования, имеющая размерность времени.

Массовая скорость фильтрации метана χ определяется из уравнения баланса массы:

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

где ρ и ρ_a — плотность метана соответственно при давлении p и при атмосферном давлении p_a ; μ — динамическая вязкость метана; $\langle k \rangle$, m — средние значения газовой проницаемости и пористости угля соответственно; α_p — параметр линеаризации, определяемый по формуле $\alpha_p = (p_c - p_0) \ln p_c p_0^{-1}$; I_0^B , I_1^B — модифицированная функция Бесселя соответственно нулевого и первого порядка.

Используя соотношение (5) получим аналитическую закономерность для расчета метановыделения с единичной площади поверхности обнажения угольного пласта

$$I_{уд.п} = I_{уд.н} \exp\left(-\frac{0,5t}{t_r}\right) I_0^B\left(\frac{0,5t}{t_r}\right), \quad (6)$$

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

Формула (6) позволяет разрешить противоречия, возникающие при сравнении результатов шахтных наблюдений и результатов математического моделирования газовой выделенности на базе параболического уравнения фильтрации, из решения которого следует, что $I_{уд.н} \sim t^{0,5}$. Эта закономерность, впервые экспериментально установленная Г. Д. Лидиным, удовлетворительно описывает процесс при $t \gg 0$. Однако экспериментальные данные А. Т. Айруни,

А. А. Мясникова, А. Э. Петросяна и др. [4–6] свидетельствуют о том, что $I_{уд.п} = I_{уд.н} \exp(-Kt)$, где K — эмпирический коэффициент, имеющий размерность, обратную времени. При этом экспоненциальная зависимость не следует из решения уравнения фильтрации параболического типа. Однако анализ формулы (6) показывает, что каждая из полученных ранее закономерностей справедлива, но для различных периодов времени.

При малых значениях аргумента модифицированная функция Бесселя в формуле (6) может быть заменена следующим асимптотическим разложением: $I_0(0,5t/t_r) \approx I(1) = 1$, и тогда из формулы (6) следуют экспоненциальная зависимость метановыделения с единичной площади поверхности обнажения угольного пласта

$$I_{уд.п} = I_{уд.н} \exp\left(-\frac{0,5t}{t_r}\right). \quad (7)$$

При больших значениях аргумента для модифицированной функции Бесселя справедливо асимптотическое разложение: $I_0(0,5t/t_r) \approx \exp(0,5t/t_r) \sqrt{t_r/(\pi t)}$. В результате из уравнения (6) получаем гиперболическую зависимость Г. Д. Лидина, которая в данном случае примет следующий вид:

$$I_{уд.п} = 0,564 I_{уд.н} \sqrt{\frac{t_r}{t}}. \quad (8)$$

На рис. 2 приведены графики изменения отношения дебита газа с единичной поверхности обнажения разрабатываемого угольного пласта к его начальному значению от отношения времени процесса t к удвоенному значению периода релаксации t_r . Результаты расчетов показали, что гиперболическое уравнение (8) является более точным, но и более сложным. Вместе с тем закономерность (6), хотя имеет более общий вид, описывает скорость газовой выделенности с поверхности обнажения угольного пласта на всем временном интервале без физических

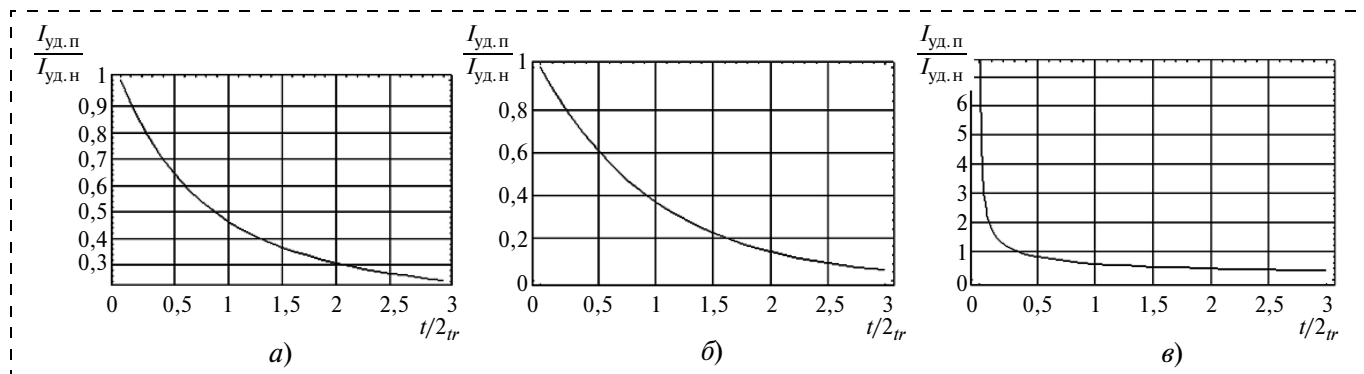


Рис. 2. Графики зависимости метановыделения с единичной поверхности обнажения разрабатываемого угольного пласта: а — зависимость (6); б — зависимость (7); в — зависимость (8)

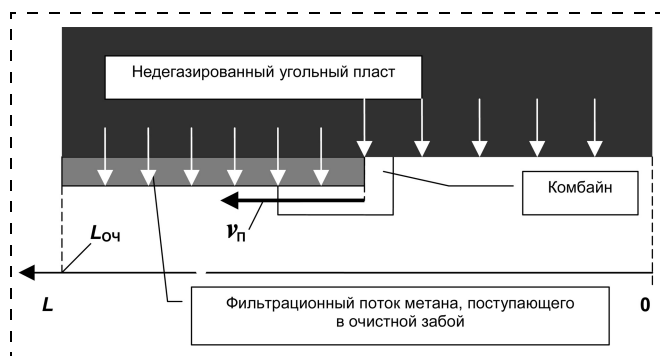


Рис. 3. Схема выделения метана в рабочем пространстве очистного забоя

противоречий. Учитывая тот факт, что нагрузки на лаву при использовании современной добычной техники возросли на порядок, необходимо использовать более точную модель газоотдачи разрабатываемого угольного пласта в лаву. Схема выделения метана в рабочем пространстве очистного забоя представлена на рис. 3.

Дебит метана $dI_{п.о}$ в очистной забой с элементарной поверхности обнажения угольного пласта dS , учитывая зависимость (6), можно определить как $dI_{п.о} = I_{уд.п} dS = m_{у.п} v_{п} I_{уд.н} \exp(-0,5t/t_p) I_0^B(0,5t/t_p) dt$, где $m_{у.п}$ и $v_{п}$ — мощность разрабатываемого угольного пласта и скорость подачи очистного комбайна соответственно. Тогда, представляя модифицированную функцию Бесселя в интегральном виде, метановыделение в очистной забой со всей по-

верхности обнажения угольного пласта определим по формуле

$$I_{п.о} = 0,318 m_{у.п} t_r v_{п} I_{уд.н} \int_0^{L_{оч}/(2t_r v_{п})} \exp(-\eta) \times \times \left\{ \int_0^{\pi} [\exp(\eta \cos \theta) + \exp(-\eta \cos \theta)] d\theta \right\} d\eta, \quad (9)$$

где η — переменная интегрирования, имеющая физический смысл безразмерного времени процесса; θ — переменная интегрирования, измеряемая в радианах; $L_{оч}$ — длина очистного забоя.

Формула (9) справедлива для челноковой схемы работы выемочного комбайна. Верхний предел внешнего интеграла представляет собой безразмерную длительность выемочного цикла $\tau_{в.ц}$. Введем следующее обозначение: $\bar{I}_{п.о}(\tau_{в.ц}) = \pi I_{п.о} \times \times (m_{у.п} t_r v_{п} I_{уд.н})^{-1}$, где $\bar{I}_{п.о}$ — безразмерное значение метановыделения в очистной забой со всей поверхности обнажения угольного пласта.

Результаты вычислительного эксперимента представлены на рис. 4. Исследования проведены на четырех интервалах значений безразмерной длительности выемочного цикла. Результаты исследования закономерности $\bar{I}_{п.о} = f(\tau_{в.ц})$ показывают, что при $\tau_{в.ц} \in [0, 3]$ функция $f(\tau_{в.ц})$ может быть аппроксимирована степенной зависимостью для интервалов значений $\tau_{в.ц} \in [3, 10]$, $\tau_{в.ц} \in [10, 50]$ и $\tau_{в.ц} \in [50, 100]$ целесообразно использовать линей-

ную аппроксимацию с различными начальными значениями и угловыми коэффициентами. Погрешность принятых аппроксимаций не превышает 3 %.

Анализ этой зависимости свидетельствует о том, что при выемочном цикле метановыделение нарастает за счет увеличения площади газоотдающей поверхности. Газоотдающая поверхность находится под перепадом давления, приблизительно равным значению $p_0^2 - p_c^2$.

В то же время площадь частично дегазированной поверхности обнажения уменьшается с той же скоростью, с которой увеличивается площадь недегазированной газоотдающей поверхности, поэтому при работе выемочного комбайна формируется стационарное состояние, определяемое формулой (9).

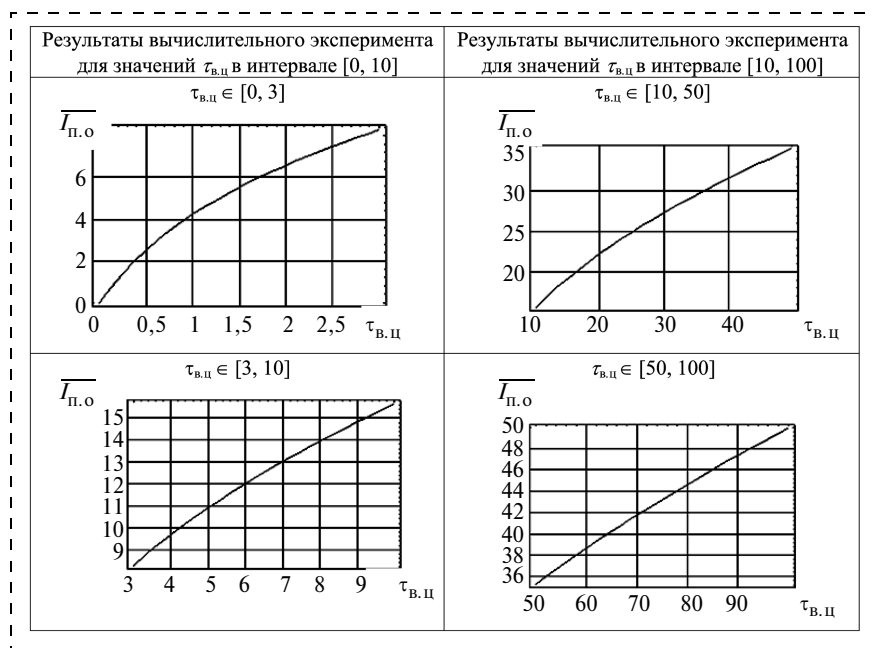


Рис. 4. Результаты исследования зависимости $\bar{I}_{п.о} = f(\tau_{в.ц})$



Несмотря на то, что нагрузка на очистные забои увеличилась в 10–15 раз по сравнению с производительностью очистных забоев в угольной промышленности России в советский период, подход к расчету количества воздуха, необходимого для проветривания лавы, а, следовательно, и к расчету предельно допустимой нагрузки остался прежним. То есть как определение количества воздуха, необходимое для проветривания лавы, так и оценка предельно допустимой нагрузки на очистной забой основываются на физических принципах статического разбавления метана в рабочем пространстве очистного забоя. Расчетная схема представлена на рис. 5.

Проведем теоретический анализ нормативного метода расчета количества воздуха, необходимого для проветривания очистных и подготовительных забоев по газовому фактору. Если принять, что в рабочем пространстве очистного забоя по всей его длине концентрация выделяющегося метана одинакова и зависит только от времени, то уравнение баланса количества газа в проветриваемом объеме можно записать в следующем виде:

$$\Omega dc = L(t)dt + Qc_0 dt - Qc(t)dt,$$

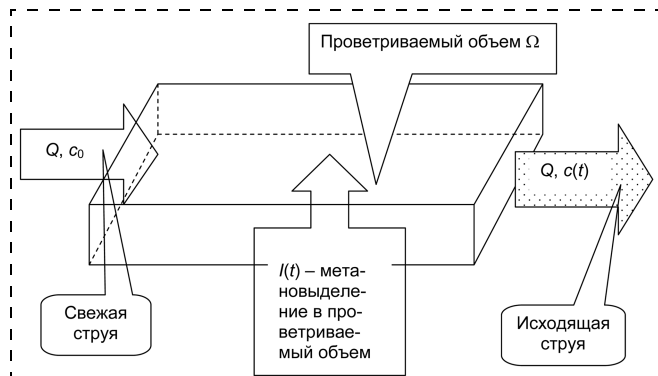


Рис. 5. Схема к определению количества воздуха, необходимого для проветривания очистного забоя по газовому фактору

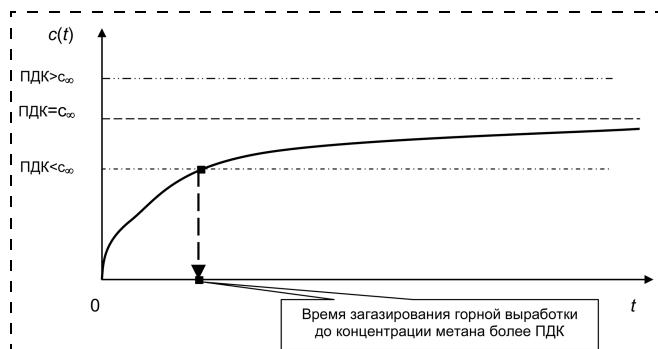


Рис. 6. Возможные газовые ситуации в проветриваемом объеме при статическом разбавлении метана

где Ω — объем рабочего пространства очистного забоя; c, c_0 — концентрация метана в исходящей и свежей струях соответственно; I — абсолютная метанообильность очистного забоя; Q — количество воздуха, поступающего в очистной забой; t — время.

Тогда уравнение газообмена и начальное условие в проветриваемом объеме будет иметь следующий вид:

$$\frac{dc}{dt} + \alpha c = \alpha c_0 + \Omega^{-1} I(t), \quad c(0) = c_H = \text{const}, \quad (10)$$

где α — параметр, численно равный отношению Q/Ω ; c_H — концентрация метана в рабочем пространстве очистного забоя в начальный момент времени.

Решение уравнения (10) можно записать следующим образом:

$$c(t) = c_0 + [c_H - c_0 \exp(-\alpha t)] + \Omega^{-1} \exp(-\alpha t) \int_0^t I(\tau) \exp(\alpha \tau) d\tau. \quad (11)$$

Рассмотрим частный случай, когда $c_H = 0$, $I(t) = I_M = \text{const}$, тогда зависимость (11) примет вид: $c(t) = (c_0 + I_M/Q)[1 - \exp(-\alpha t)]$.

Очевидно, что функция $c(t)$ имеет асимптоту при $t \rightarrow \infty$, значение которой обозначим c_∞ , тогда вычисляя это значение получим, $\lim_{t \rightarrow \infty} \{(c_0 + I_M/Q)[1 - \exp(-\alpha t)]\} = c_0 + I_M/Q$. Таким образом, рассматривая возможные газовые ситуации в проветриваемом объеме при статическом разбавлении метана, можно получить три возможных случая, схематически представленных на рис. 6. 1) ПДК > c_∞ ; 2) ПДК < c_∞ ; 3) ПДК = c_∞ , где ПДК — предельно допустимая концентрация метана в очистном забое. В первом случае забой никогда не будет загазирован, при этом концентрация метана на исходящей струе будет всегда меньше допустимого значения. Во втором случае концентрация метана превысит допустимое значение через некоторое время. В третьем случае концентрация метана на исходящей струе практически никогда не будет равна ПДК, приближаясь к ней асимптотически.

Рассмотрим случай ПДК = c_∞ , тогда получим, что количество воздуха, необходимое для проветривания рассматриваемого объема, в данном случае будет определяться по формуле: $Q = I_M(\text{ПДК} - c_0)^{-1}$. Для того чтобы адаптировать эту формулу к реальному процессу газовой выработки, динамику выделения метана учитываем коэффициентом неравномерности газовой выработки $k_H = I_{\text{max}}/I_M$, тогда базовая формула для расчета количества воздуха окончательно примет вид:

$$Q = k_H I_M (\text{ПДК} - c_0)^{-1}. \quad (12)$$

Однако, если учесть конвективную и турбулентную диффузию метана в воздушном потоке, проходящем через лаву, то в общем случае можно записать:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial l} = D_T \frac{\partial^2 c}{\partial l^2} + I_{\text{оч}}(c), \quad (13)$$

где u — средняя скорость движения воздуха в рабочем пространстве очистного забоя; D_T — коэффициент турбулентной диффузии метана; l — пространственная координата, направленная вдоль воздушного потока; $I_{\text{оч}}(c)$ — мощность метановыделения, представляющая собой количество метана, поступающего в единичный объем рабочего пространства лавы в единицу времени.

Если вновь предположить, что в рабочем пространстве очистного забоя по всей его длине концентрация выделяющегося метана одинакова и зависит только от времени, то уравнение (13) примет вид: $dc/dt = I_{\text{оч}}(c)$. Тогда сравнивая уравнения (10) и (13) найдем в явном виде мощность источника метановыделения $I_{\text{оч}}(c) = \alpha(c_0 - c) + \Omega^{-1}I(t)$. С другой стороны, при $u \approx 4$ м/с можно пренебречь турбулентной диффузией. Следовательно, динамика средней концентрации метана в лаве будет описываться следующим уравнением:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial l} = \alpha(c_0 - c) + \Omega^{-1}I(t). \quad (14)$$

Начальное и граничное условия применительно к воздушному потоку в очистном забое можно записать в виде: $c(l, 0) = 0$; $c(0, t) = c_0 = \text{const}$. Если принять $l = l_{\text{оч}}$, то из решения уравнения (14) для заданных условий получим теоретическую закономерность изменения концентрации метана на исходящей струе очистного участка $c_{\text{исх}}(t) = c(l_{\text{оч}}, t)$ в следующем виде:

$$c_{\text{исх}}(t) = c_0 \left[0,632 - 0,864 \exp\left(-\frac{t}{t_{\text{оч}}}\right) \right] + \frac{0,368}{\Omega} \left[\int_0^t I(t - \tau) \exp\left(-\frac{\tau}{t_{\text{оч}}}\right) d\tau - \int_0^{t-t_{\text{оч}}} I(t - t_{\text{оч}} - \tau) \exp\left(-\frac{\tau}{t_{\text{оч}}}\right) d\tau \right], \quad (15)$$

где $t_{\text{оч}}$ — время, за которое частица воздуха проходит расстояние $l_{\text{оч}}$.

Рассматривая осредненное значение абсолютной метанообильности, получим

$$\bar{c}(l, t) = \left(c_0 + \frac{I_M}{Q} \right) \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{t_{\text{оч}}}\right) \right] + \frac{I_M}{Q} \times \left\{ \exp\left(-\frac{l}{l_{\text{оч}}}\right) - \exp\left[-\left(\frac{t}{t_{\text{оч}}}\right)\right] \right\}, \quad (16)$$

где \bar{c} — значение концентрации метана при $I(t) = I_M = \text{const}$.

Тогда изменение концентрации метана на исходящей струе очистного участка $\bar{c}_{\text{исх}}(t) = \bar{c}(l_{\text{оч}}, t)$ в явном виде можно записать следующим образом: $\bar{c}_{\text{исх}}(t) = c_0 + 0,632 I_M / Q$. Математическая модель установившегося поля концентраций метана в лаве является частным случаем уравнения (13):

$$\frac{dc}{dl} = \frac{l}{l_{\text{оч}}} \left[(c_0 - c) + \frac{I_M}{Q} \right]. \quad (17)$$

Решение этого уравнения имеет вид: $c(l) = c_0 + I_M / Q [1 - \exp(-l/l_{\text{оч}})]$. Очевидно, что при $l = l_{\text{оч}}$ получим асимптотическое значение для изменения средней концентрации метана на исходящей струе $c(l_{\text{оч}}) = c_0 + 0,632 I_M / Q$, которое совпадает с $\bar{c}_{\text{исх}}(t)$, подтверждая справедливость полученных результатов. При этом $Q_{\text{max}} = v_{\text{max}} S_{\text{оч}}$ (м³/с), где v_{max} — максимально допустимая скорость в очистном забое, $v_{\text{max}} = 4$ м/с; $S_{\text{оч}}$ — площадь поперечного сечения очистного забоя, м². Учитывая следующее соотношение: $I_M = 0,694 \cdot 10^{-3} A_{\text{оч}} (x_{\text{пр}} - x_0)$ м³/мин, где $A_{\text{оч}}$ — нагрузка на очистной забой, т/сут; $x_{\text{пр}}$ — природная газоносность разрабатываемого угольного пласта, м³/т; x_0 — остаточная газоносность угля на выходе из лавы, м³/т; получим формулу для определения максимальной нагрузки на забой (т/сут):

$$A_{\text{max}} = 5467 \frac{(\text{ПДК} - c_0) S_{\text{оч}}}{x_{\text{пр}} - x_0}. \quad (18)$$

Формула (18) позволяет оценить максимально возможную нагрузку на очистной забой по газовому фактору с учетом выноса метана, обусловленного конвективной диффузией. Анализ этой формулы показывает, что с увеличением разности $\Delta x = x_{\text{пр}} - x_0$ уменьшается максимально возможная нагрузка на очистной забой. Очевидно, что обеспечить современные требования по производительности очистных забоев можно лишь уменьшая величину $x_{\text{пр}}$. То есть все виды дегазации будут способствовать эффективному использованию высокопроизводительной добычной техники.

В целом, установленные закономерности позволяют, во-первых, повысить достоверность прогноза газовыделений из разрабатываемого угольного



пласта на метанообильных очистных участках и, во-вторых, оценить прогнозное значение эффективности системы дегазации.

Список литературы

1. **Аэрогазодинамика** углекислотообильных шахт / Качурин Н. М., Ковалев Р. А., Ефимов В. И., Бобовников А. Л. — М.: Изд-во МГГУ. — 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.** Тепло-массообмен: Справочник. — М.: Энергия, 1978. — 480 с.
4. **Айруни А. Т.** Теория и практика борьбы с рудничными газами на больших глубинах. — М.: Недра, 1981. — 335 с.
5. **Мясников А. Л.** Проветривание горных выработок при различных системах разработки. — М.: Госгортехиздат, 1962. — 221 с.
6. **Петросян А. Э.** Выделение метана в угольных шахтах. Закономерности и их инженерное использование. М.: Наука, 1975. — 188 с.

УДК 622.81

Н. М. Качурин¹, д-р техн. наук, проф., **А. М. Борщевич**²,

О. Н. Качурин¹, асп., **А. А. Бухтияров**¹, асп.

¹Тулский государственный университет

²ЗАО "Южкузбассуголь"

E-mail: ecology@tsu.tula.ru

Безопасность геотехнологий добычи угля по газовому фактору

Представлены результаты анализа информации по взрывам метана в угольных шахтах России. Показано, что социально-экономические и политические условия последних десятилетий обусловили необходимость первостепенного внимания к обеспечению безопасности по газовому фактору. Предложен системный подход к снижению риска и локализации последствий взрывов метана в угольных шахтах и сформулированы научные и практические задачи безопасности добычи угля по газовому фактору.

Ключевые слова: шахта, метан, взрыв, риск, системные принципы, физическая модель, математическое описание, прогноз.

Kachurin N. M., Borschevich A. M., Kachurina O. N., Buhtiyrov A. A. Safety mining coal geotechnologies by gas factor

Information analysis results on explosions of methane in Russian coal mines are interpreted. It's shown that social-economical and political conditions of last decades have stipulated using safety imperative by gas factor. System approach to reducing risk and localization consequences of methane explosions in coal mines are proposed. Scientific and practical problems of safety for mining on gas factor are formulated.

Keywords: mine, methane, explosion, risk, system principals, physical model, mathematical description, prognosis.

Общие балансовые запасы угля в России составляют почти 200 млрд т или 11,3 % мировых запасов. По производству угля Россия занимает 5-е место в мире после Китая, США, Индии и Австралии. Энергетической стратегией до 2020 г. намечается увеличить добычу угля в России до 450 млн т, в том числе в Кузбассе — до 177 млн т. В 2004 г. Кузбасс преодолел 150-миллионный рубеж добычи и по итогам года выдал на-гора 158,2 млн т высококачественного угля (подземная добыча — 77,3 млн т, открытая — 81,4 млн т). С 1999 по 2004 гг. было введено в эксплуатацию 7 шахт и 11 разрезов. В настоящее время в Кузбассе в стадии строительства находятся 18 угледобывающих предприятий — 13 шахт и 5 разрезов общей проектной мощностью 24 млн т угля.

В настоящее время разработаны организационно-технологические принципы внедрения высокопроизводительной технологии "шахта—лава" применительно к условиям Кузнецкого угольного бассейна. Эти организационно-технологические принципы внедрены и апробированы на шахтах ООО "Ерунаковская угольная компания"¹, ЗАО "Холдинговая компания "Сибирский деловой Союз" и других угольных компаний. Общее состояние подземной угледобычи на шахтах ООО "Ерунаковская угольная компания" и ЗАО "Холдинговая компа-

¹ В настоящее время переименована ООО "РОСА"-Кузбасс" (входит в состав ООО "РОСА"-Холдинг")

ния "Сибирский деловой Союз" и перспективы их развития на базе высокопроизводительной технологии "шахта—лава" характеризуются производственными показателями действующих шахт и проектными показателями строящихся и проектируемых шахт. На современных шахтах суточная добыча угля в одной лаве составляет 6...10 тыс. т, а средняя скорость подвигания очистного забоя 4,5...8 м/сут.

Увеличение подземной добычи угля связано с необходимостью повышения безопасности ведения горных работ и снижением количества несчастных случаев, вызванных загазованностью горных выработок. До настоящего времени загазирование горных выработок остается одной из причин несчастных случаев, которые заканчиваются для горняков летальным исходом. Несмотря на сокращение числа угледобывающих предприятий за последние три десятилетия, доля этого вида аварий не уменьшилась (5,4 % в 1970-х годах, 14,0 % в 1980-х годах, 8,3 % в 1990-х годах, 7,6 % после 2000 г.). Социально-экономические и политические условия последних десятилетий обусловили необходимость того, чтобы при освоении и эксплуатации недр был в полной мере учтен императив обеспечения безопасности по газовому фактору. Поэтому проблемно-ориентированные поисковые исследования, посвященные созданию технологий снижения риска и локализации последствий взрывов метановоздушной смеси в угольных шахтах, особо актуальны.

Статистический анализ аварий в угольных шахтах по аэрогазодинамическому фактору показывает, что эффективность существующих методов для прогнозирования риска взрывов метановоздушной смеси в горных выработках угольных шахт, физическая модель и математическое описание угрозы возникновения взрывоопасных газовых ситуаций в горных выработках угольных шахт является неудовлетворительной. Это наглядно иллюстрирует динамика взрывов метановоздушной смеси (МВС) и их последствий на угольных шахтах России, представленная в табл. 1.

Поэтому необходимо развивать системные принципы технологии снижения риска техногенных аварий в угольных шахтах, которые основываются на моделировании риска по аэрологическому и газовому факторам, а также моделировании газовой ситуации при появлении предвестников взрывоопасного состояния шахтного воздуха. Риск взрыва МВС определяется следующей концептуальной формулой: *Риск взрыва МВС = Вероятность взрыва МВС × Ущерб от взрыва МВС*.

Установление закономерностей нарушения состава рудничной атмосферы метанообильных шахт

позволит создать инновационный технологический комплекс распознавания взрывоопасных ситуаций и локализации последствий взрывов метановоздушной смеси, обеспечивающего высокий уровень безопасности при ведении горных работ на угольных шахтах с высокой нагрузкой на очистные забои.

Анализируя концептуальную формулу риска взрыва метановоздушной смеси, можно записать следующее уравнение:

$$R_{\text{МВС}} = P_{\text{взр}} Y,$$

где $R_{\text{МВС}}$, $P_{\text{взр}}$ — риск и вероятность взрыва МВС соответственно; Y — ущерб от взрыва МВС.

Очевидно, что вероятность взрыва МВС будет представлять собой вероятность одновременного появления двух событий, во-первых, концентрация метановоздушной смеси должна быть выше нижнего предела взрывчатости и не должна превышать верхнего предела взрывчатости и, во-вторых, во взрывоопасном объеме должен появиться источник воспламенения, т. е.

$$R_{\text{МВС}} = P\{НПВ < [МВС] < ВПВ\} P_{\text{ив}} Y, \quad (1)$$

где $[МВС]$ — средняя концентрация метана в метановоздушной смеси; $НПВ$, $ВПВ$ — соответственно нижний и верхний пределы взрывчатости метана в МВС; $P\{НПВ < [МВС] < ВПВ\}$ — вероятность появления взрывоопасной концентрации метана;

Таблица 1

Динамика взрывов МВС и их последствий на угольных шахтах России

Год	Количество взрывов МВС	Количество пострадавших, чел.	
		всего	погибло
1985	13	60	19
1986	8	27	6
1987	7	19	1
1988	9	30	8
1989	11	30	6
1990	8	16	2
1991	10	28	8
1992	22	85	46
1993	23	94	35
1994	11	35	12
1995	11	64	41
1996	8	44	16
1997	12	157	104
1998	3	38	30
1999	4	12	5
2000	12	26	16
2001	3	23	12
2002	7	44	15
2003	7	42	4
2004	9	65	20
2005	8	Нет данных	33
2006	4	Нет данных	3
2007	6	Нет данных	159

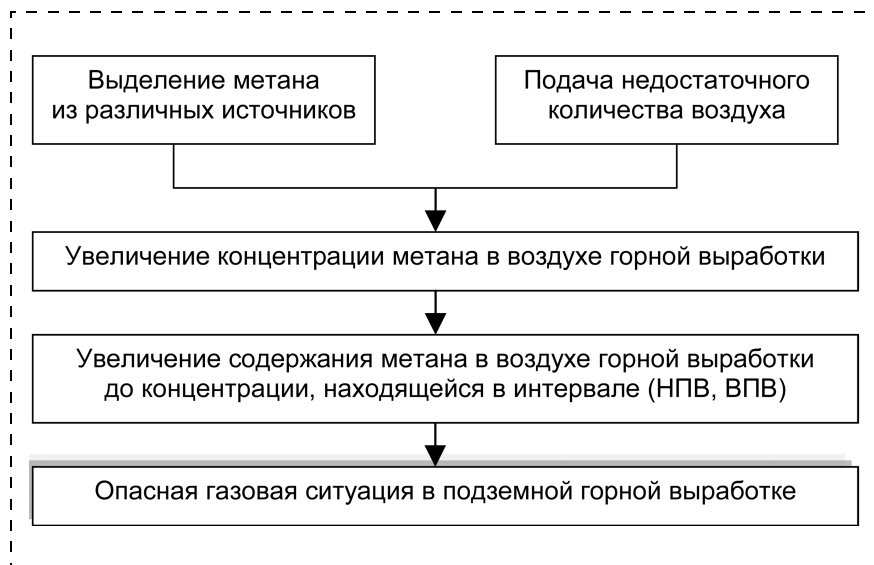


Рис. 1. Формирование опасной ситуации по фактору взрыва метановоздушной смеси

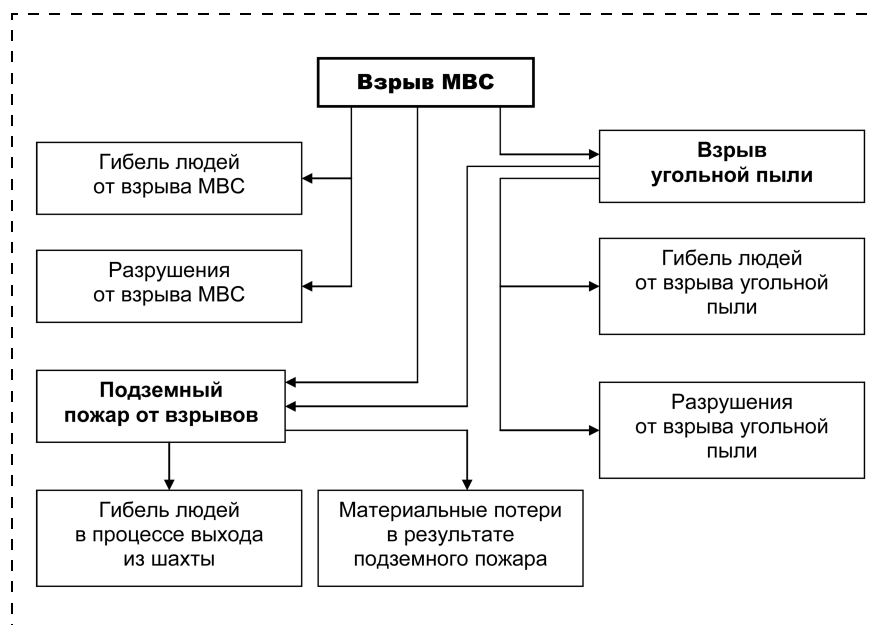


Рис. 2. Формирование последствий взрыва метановоздушной смеси

$P_{ив}$ — вероятность появления источника воспламенения; $У$ — ущерб от взрыва МВС.

В общем случае ущерб от взрыва метановоздушной смеси определяется как математическое ожидание поражения горнорабочих в подземном пространстве:

$$Y = \int_{\Omega} p_{л}(x, y, z) P_{п}(x, y, z) d\Omega, (2)$$

где $p_{л}(x, y, z)$ и $P_{п}(x, y, z)$ — соответственно плотность распределения горнорабочих в подземном пространстве и вероятность поражения по всей зоне действия поражающего фактора; Ω — зона действия поражающего фактора.

Из формулы (1) следует, что важнейшей подсистемой технологии снижения риска и локализации последствий взрывов метановоздушной смеси является оценка динамики концентрации метана в воздухе. Процессы формирования опасной ситуации по фактору взрыва метановоздушной смеси и последствий этого взрыва представлены на рис. 1 и 2. Такая систематизация позволяет рассматривать в качестве методической базы технологии снижения риска взрыва МВС взаимосвязь методов снижения риска и предпосылок этого вида аварий (рис. 3).

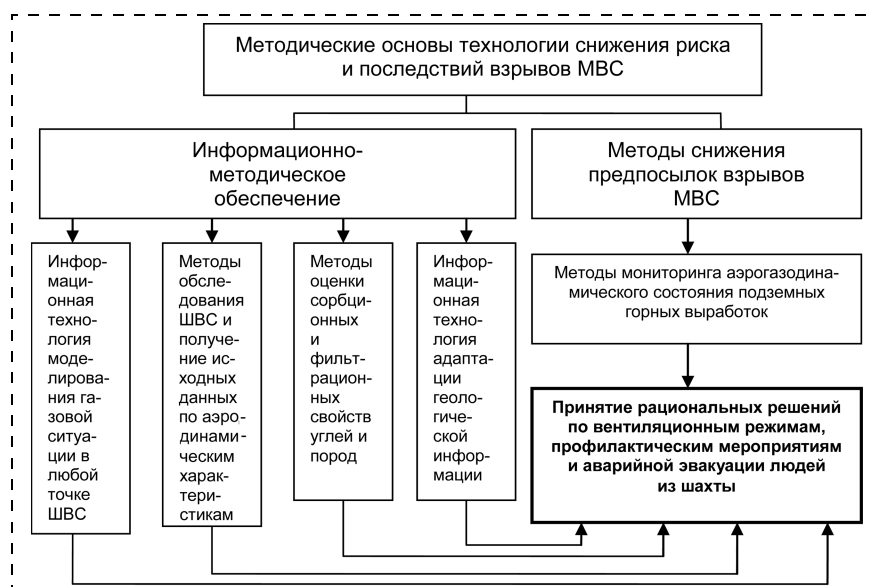
Представляет интерес следующий статистический анализ. Как выяснилось, интенсивность отказов системы защиты от взрывов МВС осталась в угольной промышленности России на уровне значений угольной промышленности СССР (табл. 2).

В то же время интенсивность отказов системы защиты от поражающих факторов на угольных шахтах России возросла почти в 5 раз по сравнению с этим показателем в угольной промышленности СССР. Соответственно и предполагаемая длительность работы без взрывов МВС осталась на прежнем уровне, а продолжительность добычи

Таблица 2

Статистические оценки экспоненциального закона распределения вероятностей взрывов метановоздушной смеси

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 гг.	1992—2007 гг.	1985—1991 гг.	1992—2007 гг.	1985—1991 гг.	1992—2007 гг.	1985—1991 гг.	1992—2007 гг.
9,43	9,38	7,14	34,44	31,2	31,2	40,8	8,4



угольных шахтах сводится к решению следующих научных и практических задач:

- обоснование алгоритмов и разработка комплекса программных средств моделирования воздушораспределения 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 моделирования для систем дегазации угольных шахт в реальном масштабе времени при нормальных и аварийных режимах эксплуатации шахты;
- совершенствование технологии определения метаноёмкости 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;

Рис. 3. Взаимосвязь методов снижения риска и предпосылок взрыва метановоздушной смеси

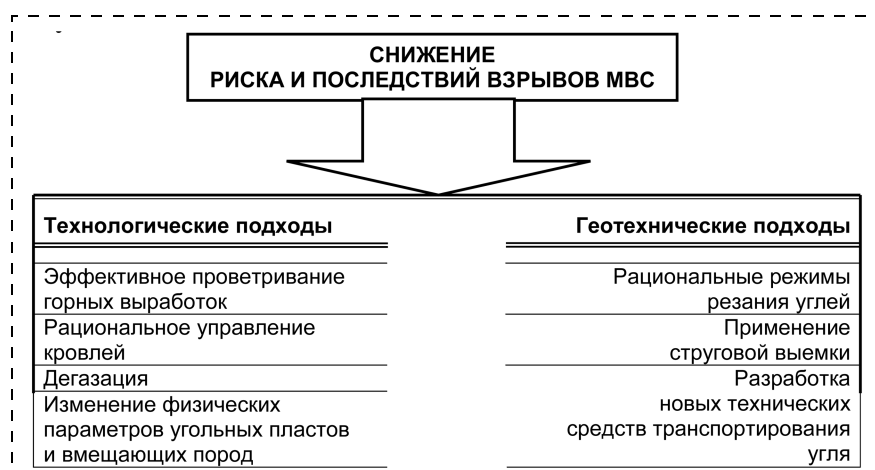


Рис. 4. Геотехнологические подходы к снижению риска и последствий взрывов метановоздушной смеси

угля без гибели людей, обусловленной взрывами МВС, уменьшилась в 4,8 раза.

Таким образом по своим характеристикам система защиты от взрывов метановоздушной смеси в угольных шахтах России не изменилась и остается на уровне угольной промышленности СССР, а система защиты от поражающих факторов ухудшилась в несколько раз.

Наши исследования показывают, что снижение риска и последствий взрывов метановоздушной смеси целесообразно осуществлять геотехнологическими методами. Наиболее реальные геотехнологические подходы к решению этой проблемы представлены на рис. 4.

В целом же системный подход к снижению риска и локализации последствий взрывов метана в

- 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;
- совершенствование компьютерной технологии разработки, уточнения и реализации плана ликвидации аварии для метанообильных угольных шахт;
- разработка и внедрение компьютерной технологии оценки риска взрыва метановоздушной смеси в угольных шахтах;
- разработка и внедрение технологии снижения последствий взрыва метановоздушной смеси в угольных шахтах.

УДК 502.3:613.15

Э. М. Соколов, д-р техн. наук, проф., Н. М. Качурин, д-р техн. наук, проф.,
Л. А. Белая, асп., И. В. Агеева, асп.,
Тульский государственный университет
E-mail: ecology@tsu.tula

Концептуальные положения повышения эффективности геоэкологического мониторинга промышленных регионов

Обосновываются системные принципы геоэкологического мониторинга промышленных регионов, на территориях которых различные отрасли промышленности вносят существенный вклад в загрязнение окружающей среды. Обоснованы математические модели оценки экологического риска, позволяющие рассчитать параметры надежности системы экологической безопасности на основе данных комплексного геоэкологического мониторинга.

Ключевые слова: система, геоэкологический мониторинг, промышленный регион, вероятность, экологический ущерб, окружающая среда, алгоритм.

Sokolov E. M., Kachurin N. M., Belay L. A., Ageeva I. V. Conceptual principles of improving environmental monitoring efficiency for industrial regions

System principals of an environmental monitoring for mining-industrial regions, where different industrial branches making large contribution at polluting territorial environment, are substantiated. Mathematical models of evaluating environmental risk, which giving possibility calculating environmental safety system reliability parameters with using data base of the comprehensive environmental monitoring, were substantiated.

Keywords: system, environmental monitoring, industrial region, probability, environmental detriment, environment, algorithm.

Использование принципа "Устойчивое развитие" (Sustainable Development)

Практика функционирования экономики развитых стран показывает, что устойчивое развитие и эколого-социальные задачи во многом определяются формулами концептуальных положений мониторинга системы "окружающая среда—здоровье человека" (ОС—ЗЧ) [1]. Эти формулы всегда в явном виде выражают идеологию политической власти и уровень ее компетентности [2]. Проблема устойчивого развития территорий носит комплексный характер, включая в себя социально-экономические, управленческие, медицинские и технические ас-

пекты. Академик Н. Н. Моисеев неоднократно отмечал, что до настоящего времени нет однозначного толкования понятия "устойчивое развитие", поэтому решение управленческих задач на основе соответствующего принципа осуществляется в сложных условиях формирования понятийного аппарата. Это особенно заметно при формировании структуры и разработке функциональных принципов регионального мониторинга системы "ОС—ЗЧ". Однако актуальность проблемы взаимоотношений общества и среды его обитания растет, поэтому весьма интересны прикладные аспекты принципа "Устойчивое развитие" как о новом смысле и цели процесса функционирования социальных и экономических систем. Глобальные экологические проблемы заставляют людей задуматься и почувствовать, что они живут в одном мире, в котором все взаимосвязано. Сохранение этого мира является наиболее важной задачей из всего комплекса проблем, стоящих перед людьми, живущими в разных странах и самых различных условиях [3].

Практика жизни и здравый смысл показывают, что нельзя говорить о среде, окружающей человека, не учитывая его потребность извлекать из этой среды полезные свойства, необходимые для создания качества жизни, которое человек желает для себя создать. Ведь все мы воспринимаем экологическое состояние окружающей нас среды как потребители ее свойств, необходимых для нашей жизни на Земле. Если бы противоречия, возникшие между обществом и природой, не отражались на качестве жизни общества и его последующих поколений, то эти противоречия не стали бы глобальной проблемой всего мирового сообщества. Уровень современных знаний, практический опыт, накопленный научными школами развитых стран, и требования повседневной жизни переводят проблему оценки экологического состояния регионов из научно-познавательной сферы в сферу практической деятельности, связанной с управлением жизнедеятельностью территорий, где проблема контроля состояния системы "ОС—ЗЧ" является наиболее важной.

Предположим, что достоверная оценка экологического состояния региона основывается на законо-

мерностях, существующих между экологическими критериями и показателями качества жизни населения. Наиболее важными параметрами, определяющими уровень качества жизни населения и зависящими от экологического состояния территории, на которой оно проживает, являются показатели здоровья населения и демографические показатели.

Для решения проблемы контроля качества экологического состояния административно территориального подразделения по фактору "Устойчивое развитие" целесообразно использовать следующий алгоритм:

- разработка модели территориальной структуры региона, как конечного множества территориальных подразделений, слагающих регион, в пределах которых экологические критерии и демографические показатели можно считать равномерно распределенными и зависящими только от времени;
- разработка компартментных математических моделей, описывающих динамику численности населения, его возрастной и половой структуры и продолжительности жизни с учетом показателей состояния здоровья населения и экологических критериев, отражающих уровень антропогенной нагрузки на каждое территориальное подразделение;
- вычислительные эксперименты с использованием данных государственной статистической отчетности;
- разработка законодательных актов, регламентирующих уровень антропогенной нагрузки с использованием методики оценки экологического состояния региона по демографическим показателям, и их практическая апробация на территории рассматриваемого региона.

Основными трудностями в реализации такого подхода являются получение адекватных экологических критериев, представляющих собой функционально связанные экологические факторы и уровни воздействия на окружающую среду, и адаптация информационной базы учреждений государственной статистики РФ к алгоритмам поиска базовых феноменологических закономерностей динамики характеристик состояния здоровья населения и демографических показателей.

Мониторинг динамической системы "Окружающая среда—здоровье человека"

Человечество взаимодействует с биосферой как одно целое, следовательно, оно обязательно должно обладать общими стандартами взаимоотношений с окружающей средой, которые характеризуют экологическое состояние территорий, являющихся средой обитания людей. Вот почему представляется

разумным использовать в качестве идеологической основы мониторинга системы "ОС—ЗЧ" принцип современного антропоцентризма, утверждающий, что дальнейшее развитие человечества может состояться только не в ущерб развитию природы [3]. Антропоцентристский подход переводит проблему мониторинга системы "ОС—ЗЧ" из класса природоохранительных и природно-ресурсных задач в разряд социально-экологических и эколого-экономических проблем.

Биоцентристское ядро при таком подходе сохраняется, если в качестве основных критериев, характеризующих состояние системы "ОС—ЗЧ", используются характеристики состояния здоровья населения и демографические показатели. Это позволяет эффективно использовать динамическую теорию биологических популяций, рассматривая в качестве основной популяции людей, проживающих на рассматриваемой территории. Можно предположить, что функционирование подсистемы "Отходы—окружающая среда" ("О—ОС") приведет к качественным и количественным изменениям в структурном элементе "Здоровье человека" (ЗЧ). Практика подтверждает справедливость этого предположения. Функционирование подсистемы "О—ОС" отрицательно влияет на здоровье людей, снижает уровень и ухудшает качество их жизни. Группа показателей, характеризующих состояние здоровья населения, должна включать показатели риска заболеваний.

Таким образом, понимая под здоровьем способность организма сопротивляться нарушениям гомеостаза, которые проявляются в виде тех или иных заболеваний, можно состояние здоровья характеризовать риском возникновения заболевания. При этом риск рассматривается как возможная опасность, проявляющаяся в нарушении нормальной деятельности организма. Тогда количественная оценка экологического состояния системы "ОС—ЗЧ" может быть получена с помощью известных методов теории надежности динамических систем. Предположим, что основной характеристикой системы "ОС—ЗЧ" является оператор $X(t)$, с помощью которого техногенные воздействия преобразуются в выходную реакцию экологических и социальных подсистем как состояния здоровья "среднестатистического человека" $Y(t)$. Тогда можно записать

$$Y(t) = A(t, v)X(t). \quad (1)$$

Здесь техногенные воздействия и выходную реакцию той или иной динамической системы, моделирующей макроструктурные элементы административно территориального подразделения, рассмат-



риваются как векторы, имеющие соответствующие размерности:

$$X(t) = \{X_1(t), X_2(t), \dots, X_n(t)\}^T,$$

$$Y(t) = \{Y_1(t), Y_2(t), \dots, Y_m(t)\}^T,$$

где индекс T означает знак транспонирования.

Вектор внешних воздействий $X(t)$ может быть представлен в виде детерминированной $G(t)$ и случайной $\zeta(t)$ составляющих. Оператор $A(t, v)$ зависит от времени t и вектора параметров $v = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}^T$, характеризующих эколого-социальное состояние рассматриваемой территории.

В последние десятилетия стало понятно, что на таких территориях, где природопользование противоречит принципам разумного самоограничения и где окружающая среда ухудшается, невозможны здоровое общество и экономика. Природопользование представляет собой совокупность техногенных воздействий на окружающую среду с целью получения энергии и вещества, необходимых для жизнедеятельности людей. Именно этот процесс вызывает негативные последствия в окружающей среде, поэтому необходимо обеспечивать рациональное природопользование.

Научный инструментарий для изучения последствий техногенных воздействий на окружающую среду является главной составной частью **геоэкологии**. Основными задачами геоэкологии являются изучение изменений жизнеобеспечивающих ресурсов геосферных оболочек под влиянием природных и антропогенных факторов, их охрана, рациональное использование и контроль с целью сохранения для нынешних и будущих поколений людей продуктивной природной среды.

Наблюдения, оценка и прогноз состояния окружающей среды для изучения изменений, вызываемых техногенной деятельностью, являются основной целью геоэкологического мониторинга.

Увеличение масштабов техногенного воздействия на окружающую природную среду придает особую актуальность проблеме создания адекватных эколого-экономических моделей. Анализ предметной области, в целом, и объектов моделирования, в частности, позволяет разрабатывать эффективные структурные и функциональные схемы моделей территорий как объектов управления по эколого-экономическим критериям.

Территория как объект управления физически представляет собой открытый системный блок, состоящий из подсистем — "население региона", "экономика предприятия" и "природный ресурс предприятия". Следовательно, объектом исследования в этом случае является предприятие как источник загрязнения окружающей среды, являющейся средой обитания для достаточно многочисленной

группы людей, связанных с деятельностью всего промышленного комплекса, расположенного на рассматриваемой территории.

Особую роль в решении обсуждаемой проблемы занимает эпидемиология, которая изучает состояние здоровья определенных контингентов населения и факторов, влияющих на состояние здоровья. При эпидемиологических исследованиях экологические факторы принимаются во внимание, а население подвергается соответствующей классификации. Различные переменные, учитываемые при классификации и связанные с естественными процессами также требуют идентификации и классификации с тем, чтобы можно было рассматривать изолированно или в комбинации их влияния на изучаемые группы населения. Многие эпидемиологические исследования эндогенных вредностей основываются на существующих воздействиях и изучают их возможные последствия для здоровья.

В целом эпидемиологические исследования особенно важны, когда существует необходимость дать оценку экзогенным вредностям, для которых характерно комплексное и/или отдаленное воздействие, а также в тех случаях, когда защитные меры потребуют больших затрат или коренных изменений.

Основной трудностью в реализации предлагаемой концепции является получение адекватных экологических критериев, представляющих собой функционально связанные экологические факторы, показатели состояния здоровья населения, демографические показатели и уровни воздействия на окружающую среду. Практической основой геоэкологического мониторинга является оценка воздействия на окружающую среду (ОВОС). Показатель ОВОС использовался в России для изучения взаимосвязей предлагаемых проектных решений с особенностями экологических условий и социально-экономической структуры, сложившихся в районах размещения проектируемых промышленных объектов. Однако практика использования ОВОС показала, что эти методические принципы можно эффективно применять и для действующих предприятий.

Оценка риска негативных последствий добычи и переработки полезных ископаемых является одной из важнейших фаз геоэкологического мониторинга. При этом необходимо учитывать влияние на окружающую среду и других отраслей промышленности, так как нет регионов, на территориях которых существовала бы только горнодобывающая отрасль. В общем виде структура и объекты геоэкологического мониторинга горнодобывающего региона могут быть представлены в виде таб-



Структура и объекты геоэкологического мониторинга горнодобывающего региона

Вид мониторинга	Объект мониторинга					
Мониторинг источников воздействия	Источники воздействия					
	Горнодобывающие предприятия	Предприятия металлургии	Предприятия энергетики	Химико-технологические предприятия	Предприятия строительного комплекса	Предприятия машиностроительного комплекса
Мониторинг факторов влияния	Факторы, влияющие на геоэкологическое состояние территории					
	Биотические факторы, характеризующие состояние экологических систем		Абиотические факторы, характеризующие состояние среды обитания населения		Социальные факторы, характеризующие демографическую ситуацию и состояние здоровья населения	
Мониторинг состояния окружающей среды	Компоненты окружающей среды					
	Компоненты природной среды				Компоненты социальной среды	
	Атмосфера	Водные ресурсы	Почвенный слой и литосфера	Энергетическая среда обитания	Население территории	Региональная система управления

лицы, где представлены как виды мониторинга, так и его объекты.

Таким образом, ОВОС является еще и базовым инструментом стратегического планирования развития территорий, при котором должен осуществляться комплексный мониторинг (в том числе и геоэкологический) с целью определения, какие из прогнозируемых тенденций реализуются в действительности. Для осуществления непрерывного процесса стратегического планирования и геоэкологического мониторинга секторов экономики необходимо определить ряд показателей, которые должны периодически отмечаться и сравниваться с показателями, приведенными в прогнозах первоначального стратегического плана. Научные критерии, используемые при разработке экологических стандартов окружающей среды, отражают количественную зависимость между интенсивностью, частотой и продолжительностью воздействия различных факторов окружающей среды, с одной стороны, и риском или степенью неблагоприятного воздействия на человека окружающей его среды — с другой.

Для того чтобы обеспечить соблюдение стандартов на выбросы и эмиссии, необходимо установить различного типа технологические стандарты, касающиеся эксплуатации и проектирования оборудования для определенных видов технологических процессов, связанных с образованием загрязнений. При утверждении указанных стандартов необходимо принимать во внимание вопросы технической выполнимости и финансовые последствия их внедрения.

Концептуальная формула риска неблагоприятного антропогенного воздействия на окружающую среду может быть записана в виде:

$$R = PD, \quad (2)$$

где R , P — соответственно риск и вероятность неблагоприятного антропогенного воздействия на окру-

жающую среду; D — ущерб от неблагоприятного антропогенного воздействия на окружающую среду.

Очевидно, что вероятность неблагоприятного антропогенного воздействия на окружающую среду будет представлять собой вероятность одновременного появления двух событий, во-первых, превышение интенсивности антропогенного воздействия допустимого уровня и, во-вторых, отказ в системе защиты окружающей среды. Поэтому окончательно получим

$$R = P\{I > ПДЭН\}P_{отк}D, \quad (3)$$

где I — интенсивность антропогенного воздействия на окружающую среду; $ПДЭН$ — предельно допустимая экологическая нагрузка на окружающую среду; $P\{I > ПДЭН\}$ — вероятность появления неблагоприятного антропогенного воздействия на окружающую среду, превышающего допустимый уровень; $P_{отк}$ — вероятность отказа в системе защиты окружающей среды.

В общем случае ущерб неблагоприятного антропогенного воздействия на окружающую среду конкретной территории определяется как математическое ожидание отрицательного влияния на население на этой территории, т. е.

$$D = \int_{\Omega} p_{нас}(x, y, z)P_{отр}(x, y, z)d\Omega, \quad (4)$$

где $p_{нас}(x, y, z)$ и $P_{отр}(x, y, z)$ — соответственно плотность распределения населения на рассматриваемой территории, и вероятность отрицательного влияния на людей по всей зоне неблагоприятного антропогенного воздействия на окружающую среду; Ω — зона неблагоприятного антропогенного воздействия на окружающую среду.

Основным показателем экологического неблагополучия является функция распределения количества случаев неблагоприятного антропогенного воздействия на окружающую среду рассматриваемой



территории. Теоретическая функция распределения определяет вероятность того, что жизнедеятельность рассматриваемой территории без нарушений состояния окружающей среды меньше некоторого заданного времени t (времени экологически благоприятной жизнедеятельности), т. е. $P\{I > ПДЭН\} P_{отк} = 1 - Q\{T < t\}$, где Q и T — вероятность и период жизнедеятельности рассматриваемой территории без нарушений состояния окружающей среды.

Значительный практический интерес представляет также интенсивность возникновения случаев неблагоприятного антропогенного воздействия на окружающую среду рассматриваемой территории, которая в соответствии со статистическим определением трактуется как математическое ожидание таких случаев.

Анализ информации по динамике возникновения случаев экологического неблагополучия позволяет заключить, что интенсивность возникновения таких ситуаций изменяется во времени. Следовательно, потоки отказов в системах экологического обеспечения жизнедеятельности территорий являются нестационарными. При этом физически обоснованной представляется гипотеза об ординарности и отсутствии последствия для рассматриваемых потоков. Таким образом, базовой закономерностью будет являться следующий закон распределения вероятности жизнедеятельности рассматриваемой территории без нарушений состояния окружающей среды:

$$Q(t) = \exp\left[-\int_0^t \lambda(\tau) d\tau\right], \quad (5)$$

где Q и λ — вероятность жизнедеятельности рассматриваемой территории без нарушений состояния окружающей среды и интенсивность случаев неблагоприятного антропогенного воздействия на окружающую среду соответственно; τ — переменная интегрирования.

Тогда период времени, в течение которого жизнедеятельность рассматриваемой территории протекает без нарушений состояния окружающей среды, можно определить по формуле:

$$T = \int_0^{\infty} \left\{ \exp\left[-\int_0^t \lambda(\tau) d\tau\right] \right\} dt. \quad (6)$$

Таким образом, задача управления экологической безопасностью жизнедеятельности рассматриваемой территории сводится к осуществлению мероприятий, позволяющих обеспечить следующие условия: $R \rightarrow \min \Rightarrow \lambda \rightarrow \rightarrow \min$ или $Q \rightarrow \max$. Анализ развития ситуаций, обусловленных нарушением нормального состояния окружающей среды, показы-

вает, что устранить причины возникновения таких ситуаций значительно легче, чем прекратить их развитие.

Задачами таких систем является содержание и накопление базы данных по параметрам, характеризующим состояние компонент окружающей среды, проведение качественного и количественного анализа информации о динамике техногенных воздействий, идентификация и прогнозирование состояний окружающей среды, прогноз возможных последствий. Главная цель такого подхода, заложенная в математическом обеспечении прогноза вероятности возникновения экологических проблем на рассматриваемых территориях, — это сделать возможным вычислительный эксперимент, моделирующий функционирование территории по фактору геоэкологической безопасности.

Результаты вычислительного эксперимента позволяют получить необходимый объем информации для принятия управленческих решений и своевременного ввода в действие системы защитных мероприятий. Высокая цена отказов, особенно катастрофических, в системе экологического обеспечения жизнедеятельности территорий выдвигает на первый план задачу их предупреждения, что возможно благодаря разработке эффективных профилактических мероприятий и своевременному вводу их в действие. Важнейшим организационным принципом безопасного функционирования территории по геоэкологическому фактору является обеспечение контроля выполнения законодательства по охране окружающей среды и рациональному использованию природных ресурсов.

Проблема мониторинга системы "Окружающая среда—здоровье человека" носит комплексный характер, включая в себя социально-экономические, управленческие, медицинские и технические аспекты. При этом главным критерием является состояние здоровья населения, проживающего на этих территориях.

В связи с изложенным реализация основных концептуальных положений мониторинга системы "ОС—ЗЧ" на федеральном и региональном уровнях уже сейчас способствует снижению экологической напряженности и поиску экологически рациональных технологий обращения с отходами.

Список литературы

1. Кондратьев К. Я., Данилов-Данильян В. И., Донченко В. К., Лосев К. С. Экология и политика. — С.-Петербург, 1993. — 285 с.
2. Постановления Правительства Российской Федерации № 946 от 08.12.92, № 732 от 02.08.93.
3. Моисеев Н. Н. Современный рационализм. — МГВП КОКС, 1995. — 376 с.

УДК 628.315:502.3

Ю. В. Брынько, канд. техн. наук, доц., **М. Г. Бурдова**, канд. техн. наук, доц.,
А. Ф. Симанкин, канд. техн. наук, доц.,
Тульский государственный университет
E-mail: eddy@schekino.tula.ru

О возможности применения реагентного метода для повышения скорости уплотнения сброженных осадков канализационной очистной станции

Приведены данные о скорости уплотнения осадка на иловых полях при использовании реагентов для обработки сброженных осадков канализационной станции города; предложена схема кондиционирования осадка, позволяющая снизить общую площадь иловых карт и повысить нагрузку на существующие площадки, а также отказаться от временных площадок, что существенно снизит экологическую нагрузку на почвенный покров.

Ключевые слова: осадки очистных сооружений, реагенты, скорость осаждения осадков, дозы реагентов, технология обработки осадка.

Brinko Y. W., Burdowa M. G., Siman-kin A. F. About possibility of method of reagents for the increase of speed of compression of stabilized deposits on sewer clearing station of Tula

The questions of speed of compression of a deposit on slit fields were considered in this work at the use of reagents for processing stabilized deposits of sewer station of a city; the offered method allows to lower a total area of platforms and raise loadings on existing platforms and refuse from temporary platforms that will essentially lower an ecological load on a soil cover.

Keywords: deposits of treatment station, reagents, speed of sedimentation of deposits, doses of reagents, technology of processing of the deposit.

На канализационной очистной станции (КОС) г. Тулы производительностью около 260 тыс. м³/сут (проектная мощность 270 тыс. м³/сут) очищаются хозяйственные и промышленные сточные воды. КОС в г. Туле запущена в эксплуатацию в 1975 г. По технологии очистки и переработки осадка это предполагает использование значительных площадей под площадки для хранения илов. В результате четвертьвековой эксплуатации этих сооружений г. Тула уже недосчитывается более 100 га лучших пойменных земель, где размещаются сооружения очистки воды, обработки и хранения осадков сточных вод.

В процессе очистки воды образуется сырой осадок (СО) и избыточный активный ил (ИАИ), который из вторичных отстойников подается на ило-

уплотнители, и далее в голову сооружений. Осадок из первичных отстойников, представляющий собой СО и ИАИ, подается в метантенки в количестве 300...400 м³/сут. по данным службы МП "Тулгорводоканал". Сбраживание осадков осуществляется с целью стабилизации и обеззараживания при температуре 53...55 °С в течение 8...10 суток.

Процесс разложения осадков в термофильном режиме способствует увеличению дозы загрузки в метантенки. Однако сброженный осадок по сравнению со свежим имеет более мелкодисперсную однородную структуру, число частиц размером менее 1 мм составляет 85 %. К тому же при термофильном режиме сбраживания удельное сопротивление осадка увеличивается до 3950 · 10¹⁰ см/г, что неминуемо приводит к увеличению площади подсушивания осадка. В результате влажность сброженного осадка составляет 96,5...97,5 % при зольности 35...45 %.

В настоящее время суммарная площадь иловых карт составляет 37,6 га. Годовой объем иловой воды и атмосферных осадков оценивается в 10 тыс. м³. Иловая вода с атмосферными осадками подается на вход очистных сооружений с целью ее последующей очистки.

В составе иловых карт имеются временные 36 карт размером 100(80) × 60 × 2 м на естественном основании общей площадью 19,6 га. Карты расположены в 9 рядов по 4 в ряду. Отвод воды осуществляется с поверхности. Временные площадки переполнены осадком с высокой степенью влажности, которая затрудняет его уборку и транспортировку. Высокий уровень стояния грунтовых вод не обеспечивает нормальное функционирование иловых карт. Допускаем, что такой уровень грунтовых вод связан с фильтрацией сточных вод и иловой воды.

Осадок подсыхает за счет промерзания в зимнее время года и испарения — в летнее. Климатические особенности последних лет характеризуются малым интервалом отрицательных температур зимой, что не способствует осаждению и уплотнению илов.

Наши исследования по обработке осадка проводились на сброженном осадке из метантенков КОС г. Тулы путем его реагентной обработки с последующим гравитационным уплотнением. В качестве реагентов для кондиционирования осадка были при-



няты реагенты, рекомендуемые СНиП 2.04.03—85* для искусственно обезвоженных осадков: коагулянт — хлорное железо FeCl_3 и известь CaO . Методика определения эффективности воздействия реагентов на изменение структуры осадка заключалась в определении динамики образования осветленного слоя осаждения сброженного осадка и высоты слоя осадка с течением времени. Исследования проводились в цилиндрах емкостью 1 л со средней высотой осадка 500 мм. Концентрация ила, реагентов менялась с тем, чтобы определить оптимальные дозы реагентов и динамику осаждения ила.

При дозе хлорного железа в диапазоне от 1,0 до 10,0 % от сухой массы осадка отмечено, что зона осветленной воды после добавки FeCl_3 (при всех дозах) не превышает 20 мм при двухсуточном отстаивании (рис. 1). Но уже на третьи—четвертые и пятые сутки отстаивания происходит интенсификация процесса отстаивания за счет смещения термодинамической устойчивости, что выражается увеличением зоны осветленного слоя более 45 мм.

Доза коагулянта играет важную роль. Уже при дозе 2,5 % (см. рис. 1, кривая 2) высота осветленного слоя превышает более 90 мм. Дальнейшее повышение дозы от 5 до 10 % увеличивает высоту осветленного слоя до 100...120 мм.

По данным опытов можно отметить эффективность воздействия коагулянта FeCl_3 на коллоидно-устойчивую эмульсию, которой является сброженный осадок метантенков. Опыты показали, что наибольшая разница в показателях при применении доз FeCl_3 приходится на концентрацию в 5,0; 7,5 и 10,0 % и частично объясняется смещением pH в сторону снижения. Отмечено, что происходит замедление снижения поверхностного потенциала коллоидных частиц. Оптимальная скорость уплотнения осадка наступает при дозе более 2,5 % от сухой массы осадка.

При реагентной обработке известью динамика образования осветленного слоя осадка становится

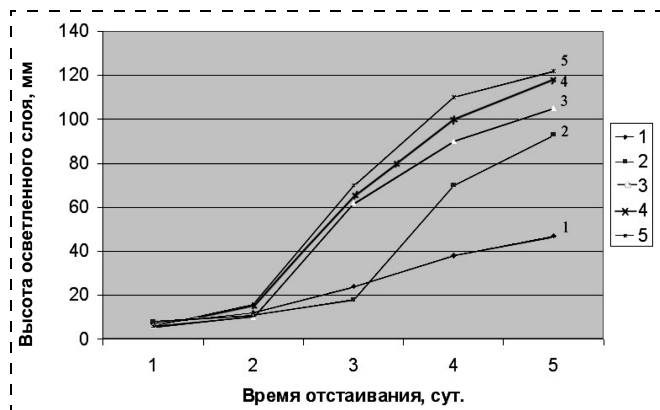


Рис. 1. Динамика образования осветленного слоя при осаждении сброженного осадка с концентрацией ила $C = 44,8$ г/л, влажность 95,52 %, концентрации FeCl_3 :

1 — 1 %, 2 — 2,5 %, 3 — 5 %, 4 — 7,5 %, 5 — 10 %

заметной также после двухсуточного отстаивания. Увеличение дозы от 1,25...3,75 до 6,25 % (от сухого осадка) высота осветленного слоя возрастает от 60 до 75 мм при пятисуточном отстаивании.

Была проведена серия опытов при совместном воздействии применяемых реагентов в следующей последовательности: известь CaO — перемешивание в течение 1 мин — хлорное железо FeCl_3 — перемешивание в течение 1 мин. Результаты опытов представлены на рис. 2. Доза CaO (знаменатель дроби) изменялась в пределах от 1,25 до 5 %, а FeCl_3 (числитель дроби) — от 1 до 7,5 %. Наибольший эффект воздействия достигался при расходах, соответственно, 7,5 и 5 %. При 90-часовом отстаивании высота осветленного слоя составила 75 мм.

Сравнение воздействие FeCl_3 и CaO показывает, что более сильное (почти в 1,5) воздействие отмечается при увеличении доз FeCl_3 по сравнению с дозами извести. Однако такие результаты больше свидетельствуют о качественной тенденции воздействия каждого из этих реагентов, чем об установлении оптимальной дозы каждого из них. Тем не менее, можно отметить положительное воздействие реагентов (и FeCl_3 , и CaO), причем по предварительной оценке оптимальная доза FeCl_3 находится в пределах 5...7,5 %, доза же CaO должна быть более 7,5 %.

Сравнивая эти данные с динамикой образования осветленного слоя при осаждении сброженного осадка без добавления реагентов, можно отметить:

- добавка CaO и хлорного железа FeCl_3 ускоряет процесс отстаивания почти в 3 раза;
- воздействие реагентов носит длительный характер — повышенная интенсивность осаждения отмечается после 20-часового отстаивания;
- агрегативную устойчивость коллоидно-суспензионной системы, слабо разрушаемой небольшими дозами реагентов.

Исследования динамики осаждения также показали, что уменьшение концентрации осадка от



Рис. 2. Осветление сброженных осадков при введении смеси FeCl_3 и CaO в соотношении FeCl_3/CaO :

1 — 1/1,25; 2 — 1/2,5; 3 — 1/5; 4 — 7,5/1,25; 5 — 7,5/2,5; 6 — 7,5/5,0

40 г/л и более до 23,5 г/л и увеличение влажности осадка с 96 до 97,65 % не оказывают практически никакого влияния ни на высоту слоя осветленной воды, ни на высоту слоя осадка. При концентрации ила выше 23,5 г/л динамика осаждения осадка практически не изменилась. Дальнейшие эксперименты проводились с концентрацией ила $C = 23,5$ г/л.

Проведенные эксперименты по применению методов реагентной обработки показали, что использование реагентов резко активизирует процесс осаждения твердой части осадков и отделения коллоидно-жидкой части, поэтому возникла необходимость использовать другие приемы кондиционирования сброженного осадка, в частности, его разбавление водой, а также промывку водой и добавление реагентов в оптимальном количестве. Жироподобные вещества, присутствующие в илах, в значительной степени снижают способность мицелл коагулировать, поэтому в дальнейших экспериментах использовался прием промывки илов водопроводной водой.

Серия экспериментов заключалась в обработке концентрированного осадка ($C = 23,5$ г/л) водопроводной водой в соотношении 1:2...1:4 и продолжительностью отстаивания 24 ч. Эта операция позволила получать промытый осадок с концентрацией $C = 11,62$ г/л и влажностью 98,84 % и с концентрацией $C = 5,75$ г/л и влажностью 97,65 %, а также иловую воду с концентрацией взвешенных веществ 500 мг/л. Последующая добавка извести и хлорного железа в осадок значительно ускоряет процесс отстаивания уже в первый час отстаивания. Высота осветленного слоя увеличивается до 140 мм. Из кинетики отстаивания, приведенных на рис. 3, видно, что процесс уплотнения протекает более интенсивно при концентрации осадка 11,62 г/л. Большое разбавление не ускоряет процесс осаждения, кривая кинетики осаждения быстро выполаживается.

Сравнение кинетических характеристик показывает, что процесс уплотнения промытых илов ускоряется в несколько раз. Уплотнение осадка происходит в течение 24 ч. Наиболее активно процесс уплотнения идет в течение 1...1,5 ч. Таким образом, относительно простой прием кондиционирования илов позволяет значительно ускорить процесс осаждения.

Проведенные эксперименты позволяют рекомендовать следующую схему кондиционирования осадка:

1) промывка осадка технической (очищенной сточной) водой в соотношении 1:3 с барботажем воздухом или механическим перемешиванием в течение 10...20 мин с последующим гравитационным уплотнением осадка в тех же сооружениях на протяжении 20...24 ч;

2) физико-химическая обработка реагентами с последовательным введением: 5 %-ной суспензии CaO и интенсивным перемешиванием в течение 3 мин;



Рис. 3. Осветление сброженных осадков, промытых водопроводной водой, при введении смеси $FeCl_3$ и CaO в соотношении:

1 — $C = 11,62$ г/л; $FeCl_3/CaO = 2,5/20$; 2 — $C = 11,62$ г/л; $FeCl_3/CaO = 4/15$; 3 — $C = 11,62$ г/л; $FeCl_3/CaO = 4/20$; 4 — $C = 5,75$ г/л; $FeCl_3/CaO = 6/20$; 5 — $C = 5,75$ г/л; $FeCl_3/CaO = 6/25$

5 %-ного раствора $FeCl_3$ с перемешиванием в течение 2...3 мин. Такая обработка снижает электрокинетический потенциал твердых частиц осадка, что приводит к последующей их коагуляции и более интенсивному разделению воды и осадка;

3) подсушивание осадка на иловых картах.

Физико-химическая обработка позволяет снизить объем обезвоживаемого осадка в 1,5 раза за счет снижения влажности с 97...98 % до 94,5...95 % при одновременном повышении пористости и влагоотдачи осадка, что будет способствовать улучшению процесса естественной сушки.

Предварительный расчет показывает, что для условий КОС г. Тулы при подсушивании осадка весеннего накопления и летнего напуска необходимо использовать 17 карт, для зимнего намораживания — 10 карт, для осеннего периода накопления с последующим замораживанием в зимний период — 28 карт. Таким образом, обезвоживание осадка может осуществляться на существующих площадках с искусственным основанием и дренажем без использования временных площадок.

Кондиционирование осадка физико-химической обработкой потребует дополнительно установки 4...5 резервуаров-уплотнителей объемом 550 м³ каждый.

Подсушивание осадка необходимо проводить с обязательным соблюдением технологического регламента, включая напуск, ворошение, сгребание в бурты и своевременный вывоз к месту использования. При этом появляется вероятность *двукратного опорожнения* площадок за летний период сушки. В таком случае общее количество иловых площадок для весенне-летнего подсушивания сократится в 1,3...1,5 раза и составит всего 17 карт.



УДК 502.521-047.43

Е. И. Захаров, д-р техн. наук, проф., **М. С. Комиссаров**, канд. техн. наук,
Тульский государственный университет
E-mail: ecology@tsu.tula

Оценка геохимической устойчивости городских почв

На основе полевых и лабораторных исследований в горнодобывающем регионе представлена карта-схема геохимической устойчивости почв г. Тулы к загрязнению тяжелыми металлами, отражающая комплекс факторов природного и техногенного происхождения, демонстрирующая их территориальное сочетание.

Ключевые слова: горное предприятие, ландшафт, техногенное воздействие, городские почвы, тяжелые металлы, загрязнение почв, почвообразование, геохимическая аномалия, геохимическая устойчивость почв.

Zacharov E. I., Komissarov M. S. Evaluating geochemical stability of urban soils

The map-scheme of geochemical stability of Tula City soils by polluting heavy metals, which reflected all complex nature and anthropogenic genesis factors and demonstrated territorial combination of these factors was created with using field and laboratory researches and is discussed at the paper.

Keywords: mining enterprise, landscape, anthropogenic influence, urban soils, heavy metals, polluting soils, soil formation, geochemical anomaly, geochemical stability of soils.

В современных городах в связи с ведением больших объемов работ жилищного, транспортного, промышленного и других видов строительства производятся работы по выемке и перемещению грунтов для возведения нулевых циклов строящихся зданий, прокладки различных видов коллекторов, транспортных туннелей, подземных переходов и т. д. При этом породы перевозятся и складываются в окрестностях городов или используются для планировочных работ, что оказывает влияние и на рельеф, и на миграцию подземных вод. Наиболее остро эти негативные факторы проявляются в горно-промышленных регионах, так как добыча угля приводит к значительным геохимическим изменениям свойств и состава почв. В частности предприятия г. Тулы, ее коммунальное хозяйство на протяжении более 100 лет использовали подмосковный уголь как основной топливно-энергетический ресурс. В южном пригороде г. Тулы обрабатывалось скуратовское месторождение бурого угля (около

десяти шахт). В результате отработки нарушались водоносные горизонты, образовались выработанные пространства в горном массиве, на поверхности образовались терриконы. В настоящее время вся горная масса терриконов шахт использована для отсыпки автомобильных дорог, засыпки оврагов, балок, планировки городских территорий. Добыча, первичная переработка и использование — сжигание подмосковного угля сказалось на всех компонентах биосферы, в том числе почвенном покрове.

Тяжелые металлы в настоящее время являются одним из основных загрязнителей городской среды, и многие из них включены в категорию высокоопасных и опасных элементов. Особенности миграции и концентрации отдельных загрязнителей строго дифференцированы и определяются конкретными почвенно-химическими и ландшафтно-геохимическими условиями, такими как кислотно-щелочные, емкость поглощения, содержание гумуса, окислительно-восстановительный потенциал почв и др.

К сожалению, существующие системы мониторинга загрязнения почв недостаточно учитывают почвенно-химические и ландшафтно-геохимические факторы, влияющие на формирование и состояние почвенного покрова. Поэтому геохимическую устойчивость почв, понимаемую как способность системы сопротивляться постоянно изменяющимся условиям среды до момента ее разрушения, необходимо определять относительно конкретного элемента-загрязнителя или определенной группы химических элементов с близкими условиями миграции и концентрации.

Анализ комплексных исследований, проведенных сотрудниками ТулНИГП и другими авторами [1—10], позволил установить, что в городах в результате хозяйственной деятельности формирование городских почв может происходить на культурном слое, на природных грунтах резкого генезиса, состоящих из органо-минерального материала, и остатков естественных почв, на природных и техногенных насыпных или намывных грунтах. Учитывая результирующее взаимодействие почвенных компонентов в экосистеме, можно сказать, что геохимические возмущения, наблюдаемые в почвенном покрове, наиболее достоверно отражают нарушение естественного протекания природных процессов

в самой экосистеме, а в целом устойчивость почв к техногенному загрязнению может использоваться как интегральный показатель устойчивости всей системы, в том числе и городской.

Данные лабораторных и полевых исследований, а также результаты экспериментов [1–9] позволили применительно к почвенному покрову г. Тулы выявить следующее:

— в формировании и дифференциации городских почв первостепенную роль играют физико-географические и геохимические, природные и антропогенные факторы;

— радиальная и латеральная геохимическая структура техногенного загрязнения городских почв определяется особенностями размещения предприятий промышленности, энергетики, транспортных магистралей и ландшафтно-геохимической структурой территории города;

— почвенно-химические и ландшафтно-геохимические факторы, а также условия миграции и концентрации химических элементов формируют основу геохимической устойчивости городских почв к загрязнению тяжелыми металлами.

В современных условиях преобладающим фактором почвообразования в городах становится антропогенное воздействие. Основной формой существования городских почв являются постоянные нарушения, перемешивания, срезания, омоложение почвенного профиля и привнесение в него инородного материала. Все это осложняется процессами химического и физического загрязнения. Эти закономерности проявляются в следующем:

— сильная расчлененность рельефа и развитие внутригородской гидрографической сети отражается в пестроте природного и техногенного составляющих почвенного покрова города;

— большая часть почв в городе формируется и развивается в элювиальных ландшафтно-геохимических условиях;

— с периферии к центру уменьшается доля природных почв и увеличивается доля урбано-почв и индустриезов, характерной пространственной особенностью которых является их крупноконтурность и компактность ареалов;

— архитектурно-планировочная структура города при одинаковых ландшафтно-геохимических условиях является основным фактором пространственной дифференциации почвенного покрова г. Тулы.

Данные по содержанию в почвах г. Тулы 15 химических элементов, сгруппированных по степени их экологической опасности, приведены в табл. 1.

Наиболее контрастные геохимические аномалии в почвах г. Тулы характерны для элементов первого класса экологической опасности — Pb, Zn и Hg.

Ареалы с максимальными уровнями загрязнения почв в основном находятся в правобережной части города, приурочены к промышленным предприятиям машиностроительного профиля, крупным транспортным магистралям города. В целом в почвах г. Тулы наиболее активно и повсеместно накапливаются Cu, Pb, Ni, Zn, Co, Cr, Hg — главным образом химические элементы первого и второго классов экологической опасности.

Исходя из вышеизложенного выведен ряд зависимостей и предложена математическая модель для установления соотношений, а также определения средневзвешенных величин концентраций каждого из рассматриваемых тяжелых металлов в соответствии с изменяющимися условиями среды, приводящими к изменению концентраций содержания тяжелых металлов в почве и к изменению их распределения.

Как показали почвенно-геохимические исследования, преимущественно щелочная характеристика почв является заметным фактором концентрации тяжелых металлов в почвах г. Тулы (табл. 2).

Таблица 1

Группировка химических элементов по классам экологической опасности (ГОСТ 17.4.1.02–83) "Охрана природы. Почвы. Классификация химических веществ для контроля загрязнения")

Классы экологической опасности	Химические элементы
I	Pb, Zn, Hg
II	Cu, Ni, Co, Mo, Cr, Sb, B
III	Mn, V, Ba, Sr, W

Таблица 2

Показатели pH поверхностного горизонта (0...10 см) почв и грунтов г. Тулы (данные автора)

Место отбора проб	pH
Пос. Косая Гора, промышленная зона (ОАО "КМЗ")	8,22 ± 0,82
Пос. Косая Гора, малоэтажная застройка	8,02 ± 0,80
Пос. Косая Гора, многоэтажная застройка, ул. М. Горького, 27	8,25 ± 0,83
Пос. Косая Гора, малоэтажная застройка, ул. М. Горького	7,94 ± 0,79
Пос. Косая Гора, леса и парки города, серая лесная почва, горизонт A2B	7,13 ± 0,71
Пос. Косая Гора, леса и парки города, серая лесная почва, верхняя часть гумусового горизонта	7,25 ± 0,72
Пос. Косая Гора, леса и парки города, серая лесная почва, середина гумусового горизонта	7,84 ± 0,78
г. Тула, ЦПКиО им. П.П. Белоусова	7,50 ± 0,75
г. Тула, многоэтажная застройка, двор ул. Агеева	7,81 ± 0,78
г. Тула, Пролетарский район, ул. К. Маркса, насыпь ж/д	8,32 ± 0,83
г. Тула, Пролетарский район, малоэтажная застройка, ул. К. Маркса, 157	8,12 ± 0,81
г. Тула, «Тулачермет», ул. Новотульская, 19	8,54 ± 0,85
г. Тула, малоэтажная застройка, ул. Курковая, 127	8,15 ± 0,82
г. Тула, Набережная Дрейера, сахарный завод	8,40 ± 0,84



В почвах накапливаются преимущественно халькофилы (Zn, Cu, Pb) и элементы группы железа (Ni, Co, Mo). Контрастность аномалий свидетельствует об их техногенном происхождении.

Основными показателями, используемыми для экологических оценок, являются уровень загрязнения компонентов природной среды и экологическая обстановка территории. Уровни загрязнения компонентов природной среды химическими элементами и соединениями являются абсолютными величинами и определяются относительно ПДК или относительно местного регионального геохимического фона. Для суммарной оценки загрязнения почв селитебных зон наиболее распространенным показателем является суммарный показатель концентрации (СПК) Z_c [8]. Обычно выделяют шесть уровней загрязнений (табл. 3).

Максимальный уровень суммарного загрязнения почв тяжелыми металлами ($Z_c > 128$) представлены тремя локальными ареалами, расположенными в районе ГП "Завод Штамп", где $Z_c = 200$, и в селитебно-промышленном районе между рекой Тулицей и железной дорогой Москва—Тула $Z_c = 150$.

Функциональные территории города по уровню содержания тяжелых металлов в целом слабо дифференцированы: нет четкой и однозначной территориальной зависимости между уровнем загрязнения и функциональной принадлежностью. Тем не менее, при средневзвешенном СПК по городу, равной 56, в почвах вокруг промышленных предприятий этот показатель приближается к максимальному уровню ($Z_c > 128$), а на селитебной территории, особенно в центральной части города с многоэтажной застройкой, — к уровню очень сильного загрязнения.

Как степень, так и характер загрязнения почв вызывают ответную реакцию городских почв на дальнейший рост техногенной нагрузки и в итоге на их геохимическую устойчивость. Не вызывает сомнения тот факт, что оценка геохимической устойчивости почв г. Тулы к загрязнению тяжелыми металлами и как результат сама устойчивость, которая определялась по результатам экспертной оценки, являются одними из важнейших параметров, по которым в дальнейшем возможно оценивать общую экологическую ситуацию в городе. Говоря об общей экологической ситуации, необходимо принимать во внимание постоянно изменяющиеся условия среды, проявляющиеся как в изменении

площадей функциональных зон, так и в постоянном росте техногенной нагрузки.

Учитывая вышесказанное, становится очевидно, что такой параметр, как геохимическая устойчивость, в первую очередь должен обладать прогностическими свойствами и учитывать целый ряд изменений, способных наиболее серьезным образом отразиться не только на самой устойчивости почв, но и на общей экологической обстановке в городе.

Исходя из этого, была предпринята попытка создания прогнозной математической модели, способной оценивать изменения устойчивости почв города с учетом динамики функциональных зон.

Средневзвешенная величина загрязнения Z_i суммарной площади

$$S_{\text{sum}} = \sum_{i=1}^n S_i, \quad (1)$$

определяется выражением:

$$Z_{\text{cp}} = \frac{\sum_{i=1}^n Z_i S_i}{\sum_{i=1}^n S_i},$$

или

$$Z_{\text{cp}} = \frac{1}{S_{\text{sum}}} \sum_{i=1}^n Z_i S_i. \quad (2)$$

Считая, что на момент времени $t = t_0$ площади $S_i = S_{i0}$, средневзвешенное загрязнение Z_i величин найдем по выражению:

$$Z_{\text{cp}} = \frac{\sum_{i=1}^n Z_i S_{i0}}{\sum_{i=1}^n S_{i0}}. \quad (3)$$

Учитывая, что за период времени Δt величины Z_i , характеризующие функциональные площади, остались неизменными, тогда как в соответствии с планированием изменились только функциональные площади или на момент времени $t = t_0 + \Delta t$ площади приобрели следующее значение:

$$S_i = S_{i0} \pm \Delta S_i, \quad (4)$$

Таблица 3

Оценочная шкала опасностей загрязнения почв по суммарному показателю концентрации химических элементов [5]

Величина СПК Z_c Уровень загрязнения	<8 Минимальный	8...16 Слабый	16...32 Средний	32...64 Сильный	64...128 Очень сильный	>128 Максимальный
---	-------------------	------------------	--------------------	--------------------	---------------------------	----------------------

где ΔS_i — изменение i -й площади в диапазоне $\pm \Delta S$ пределах от $0 \dots S_{i0}$ (для знака "-" в пределах от $0 \dots S_{i0}$).

С целью повышения наглядности и облегчения расчетных работ была получена следующая зависимость:

$$Z_{cp} = Z_{cp}^0 + \sum_{i=1}^n K_i \frac{\Delta S_i^*}{100}, \quad (5)$$

где $\Delta S_i^* = \frac{\Delta S_i}{S_{i0}} 100$ — относительное изменение

i -й функциональной площади в процентах к исходной на момент времени $t = t_0$; $K_i = Z_i \frac{S_i}{S_{sum}}$ — ко-

эффициент влияния изменения i -й функциональной площади на изменение средневзвешенного Z_i

величин по площади S_{sum} ; $\sum_{i=1}^n \Delta S_i^* = 0$ — суммарная

площадь исследованной области при изменении i -х функциональных площадей остается неизменной ($S_{sum} = const$), следовательно, изменение i -х площадей может происходить только попарно:

$$Z_{cp}^0 = \sum_{i=1}^n K_i$$

Результаты исследований используются "Тульским городским центром градостроительства и землеустройства", департаментом строительства Тульской области, департаментом Тульской области по экологии и природным ресурсам для принятия управленческих решений, направленных на повышение качества окружающей природной среды.

Список литературы

1. Аникеев В. А., Жуков В. П., Куварин Ю. Н., Стихарев В. В., Макаров О. А. Экологическая и медико-демографическая обстановка в Тульской области // Оценка экологического состояния почвенно-земельных ресурсов региона в зонах влияния промышленных предприятий (на примере Тульской области) / Под. общей ред. Г. В. Добровольского, С. А. Шобы. — М.: Изд-во Московского университета, 1999.
2. Березин П. Н., Яковлев А. С., Макаров О. А., Шатайлов В. В. Опыт экологического нормирования окружающей природной среды на примере Тульской области // Оценка экологического состояния почвенно-земельных ресурсов региона в зонах влияния промышленных предприятий (на примере Тульской области) / Под общей ред. Г. В. Добровольского, С. А. Шобы. — М.: Изд-во Московского университета, 1999.
3. Васютин С. И., Дымов В. С., Глушанков В. К. и др. Окружающая природная среда Тульской области и ее охрана // Материалы комитета комп. монит. Адм. Тульской области, 1996.
4. Головин А. А., Самаев С. Б., Соколов А. С. Современные подходы к эколого-геохимической оценке урбанизированных территорий. Прикладная геохимия. Вып. 6. Экологическая геохимия Москва и Подмосковье // Сб. статей под ред. Э. К. Буренкова и А. А. Кременецкого. — М.: ИМ-ГРЭ, 2004, с. 51—62.
5. Дмитриков А. В., Решетов В. В. и др. Отчет о геолого-экономическом изучении (картографировании) территории Тульской области масштаба 1:500000 в 1992—1997 гг. Геол. фонд Тульск. обл., 1998.
6. Мелехова Н. И. и др. Экологическое состояние почв Тульской области // Материалы научно-практической конференции "Экология XXI в в Тульском регионе ИПП "Гриф и К". — Тула, 2001. — С. 22—26.
7. Почвенная карта Тульской области. Масштаб 1:200000 / Отв. редактор А. И. Саталкин, 1985.
8. Сагт Ю. К., Ревич Б. А., Янин Е. М. и др. Геохимия окружающей среды. — М.: Недра, 1990. — С. 335.
9. Симурзин В. Н., Пенькова З. Н., Данилин В. А., Павлов В. И., Соколов А. Ю., Захарова И. А., Антонова Е. П. Эколого-геохимический атлас г. Тулы. Тула: ТУЛНИГП Комитета Российской Федерации по геологии и использованию недр, 1993 г.
10. Хадарцев А. А. и др. Химические соединения и тяжелые элементы в образцах почв Тульского региона // Мат. научно-практической конференции "Экология XXI в Тульском регионе". ИПП "Гриф и К", 2001 г. — С. 70—76.

Уважаемые авторы!

Будьте внимательны при подготовке статей, отправляемых для опубликования в наш журнал. Статья должна соответствовать требованиям, изложенным на сайте журнала:

<http://novtex.ru/bid>.

Несоблюдение этих требований как одна из причин может привести к задержки публикации. Обращаем Ваше внимание также на список литературы, в котором должны быть источники, имеющиеся в библиотеках, т.е. доступные читателю.

Если же Вы используете источник, который трудно разыскать, то желательно кратко изложить суть ссылки.

Редакция журнала

УДК [614.73:502.3:621.311.25](470,312)

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

Оценка дозы облучения населения на территории Подмосковского угольного бассейна атмосферными выбросами аварии на Чернобыльской АЭС

Представлены математические модели формирования дозы облучения населения, проживающего на территории, загрязненной радионуклидами Чернобыльской аварии. Предложена модель реконструкции дозы облучения населения в начальный период после аварии. Рассмотрено влияние дозы облучения на здоровье населения Тульской области.

Ключевые слова: авария, Чернобыльская АЭС, радионуклид, цезий-137, доза облучения, нозология, математическая модель.

Sokolov E. M., Kachurin N. M., Kuznetsov A. A., Sviridova T. S. Evaluating dose of radioactive irradiation for Moscow coal basin territory population by chernobyl disaster atmospheric emission

Mathematical models of forming radioactive irradiation dose for population living territory, which polluted by Chernobyl disaster atmospheric emission were shown. Radioactive irradiation dose reconstruction model for initial period after the accident was proposed. Radioactive irradiation dose influence upon Tula Region population health was studied.

Keywords: accident, Chernobyl atomic power station, radionuclide, caesium-137, radioactive irradiation dose, nosology, mathematical model.

Территория Подмосковского угольного бассейна является регионом с высоким уровнем концентрации металлургических и химических предприятий, что в совокупности обуславливает формирование сложной экологической ситуации, напряженность которой дополнительно усугубилась вследствие радиоактивного загрязнения выбросами аварии на Чернобыльской АЭС. Поэтому становится актуальной постановка и решение задачи исследования и оценки последствий радиоактивного загрязнения для населения данной территории на фоне существующей экологической ситуации.

Авария выявила все то негативное, что может нести современная техника и технология при неумелом руководстве и использовании достижений научно-технического прогресса. В результате аварии на Чернобыльской АЭС во внешнюю среду поступило 50 МКи различных радионуклидов (в 2,5 раза больше, чем при аварии на ПО "Маяк", 1957 г.). Это потребовало немедленной эвакуации г. Припяти (около 50 тыс. человек), а затем дополнительного выселения населения из 30-километровой зоны вокруг аварийного реактора (около 70 тыс. человек).

Длительный период выброса, изменение за это время метеорологической обстановки, сложные прогнозы "выгорания" радионуклидов разрушенной активной зоны, где температура доходила до 2500 °С, привели весной 1986 г. к чрезвычайно сложной картине радиоактивного загрязнения больших районов страны, неоднородности этого загрязнения как по площадям (пятнистость), так и по радиоактивному составу. Радиоактивному загрязнению, по данным бывшего Госкомгидромета СССР, подверглись в РФ четыре области (по последним данным — 16 областей и одна республика), на Украине — восемь и в Белоруссии — пять областей. Общая площадь территорий, в разной степени загрязненных цезием-137, составила около 7,0 млн. га, в том числе с плотностью загрязнения от 5 Ки/км² и выше — 2,5 млн га. На указанных территориях проживают более 6 млн человек. В результате Чернобыльской катастрофы на территории бывшего СССР сложилась следующая картина: уже в 1986 г. было выведено из оборота более 144 тыс. га сельскохозяйственных угодий, 432 тыс. га лесов, переселено на новое место жительства 116 тыс. человек.

Для уточнения сложившейся ситуации радиационного загрязнения территории Подмосковского угольного бассейна были изучены существующие сведения по распределению поверхностного загрязнения территорий и динамика изменения мощности экспозиционной дозы по территории бассейна, дополненные результатами натурных наблюдений,

проведенных в процессе выполнения исследований. Была создана база данных по основным показателям загрязнения: мощности экспозиционной дозы и удельной активности почвы.

Сложный характер картины поверхностного распределения радионуклидов обусловил необходимость разработки математической модели формирования и развития радиоактивного загрязнения территории с целью обеспечения достоверности для долгосрочных прогнозных оценок экологических последствий аварии. Динамика распределения концентрации радионуклида в атмосфере описывается дифференциальным уравнением [1, 2]:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} = \langle D_{\text{Тх}} \rangle \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \langle D_{\text{Ту}} \rangle \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \langle D_{\text{Тз}} \rangle \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} + I(x, y, z, t), \quad (1)$$

где c — концентрация радионуклидов в атмосфере, u, v, w — ортогональные компоненты скорости ветра (u — запад-восток, v — север-юг, w — вертикаль); $\langle D_{\text{Тх}} \rangle, \langle D_{\text{Ту}} \rangle, \langle D_{\text{Тз}} \rangle$ — средние значения коэффициентов турбулентной диффузии; $I(x, y, z, t)$ — закономерность, описывающая интенсивность выброса из источника.

Граничные и начальные условия для поставленной задачи имеют вид: $(\partial c / \partial z)|_{z=0} = 0, c(x, y, z, 0) = 0$. Учитывая значительные масштабы распространения радиоактивного загрязнения, аварийный реактор можно рассматривать как точечный источник, высота которого определяется высотой подъема аэрозолей выбросов, так как выбросы на выходе из разрушенной защитной оболочки реактора обладали большой начальной скоростью и характеризовались большими температурами относительно окружающего воздуха. Следовательно, вместо реальной высоты источника H необходимо использовать эффективную высоту H_e .

Процесс переноса радионуклидов был весьма динамичным, скорость ветра изменялась каждый день аварийной "работы" реактора, также менялось и его направление, поэтому необходимо использовать решение уравнения нестационарного распределения примесей в атмосфере при наличии ветра:

$$c(x, y, z, t) = \frac{\exp(-k_1^2 t)}{(2\sqrt{\pi})^3} \int_0^t \frac{q_1(t) \exp(k_1^2 t)}{(\sqrt{t-\tau})^3} \times \left\{ \exp\left(-\frac{a^2}{4(t-\tau)}\right) + \exp\left(-\frac{b^2}{4(t-\tau)}\right) + 2h \int_0^\infty \exp(h\eta) \exp\left[-\frac{x_1^2 + y_1^2 + (z_1 + H_1 + \eta)^2}{4(t-\tau)}\right] d\eta \right\} dt, \quad (2)$$

$$\text{где } a = \sqrt{x^2 \langle D_{\text{Тх}} \rangle^{-1} + y^2 \langle D_{\text{Ту}} \rangle^{-1} + (z - H_e)^2 \langle D_{\text{Тз}} \rangle^{-1}}; \\ h = 0,5w; H_1 = H \langle D_{\text{Тз}} \rangle;$$

$$b = \sqrt{x^2 \langle D_{\text{Тх}} \rangle^{-1} + y^2 \langle D_{\text{Ту}} \rangle^{-1} + (z + H_e) \langle D_{\text{Тз}} \rangle^{-1}}; \\ x_1 = x \langle D_{\text{Тх}} \rangle^{-1/2}; y_1 = y \langle D_{\text{Ту}} \rangle^{-1/2}; z_1 = z \langle D_{\text{Тз}} \rangle^{-1/2}; \\ k_1^2 = 0,25(u^2 \langle D_{\text{Тх}} \rangle^{-1} + v^2 \langle D_{\text{Ту}} \rangle^{-1} + w^2 \langle D_{\text{Тз}} \rangle^{-1});$$

$$q_1 = \frac{I_0}{\sqrt{\langle D_{\text{Тх}} \rangle \langle D_{\text{Ту}} \rangle \langle D_{\text{Тз}} \rangle}} \exp \frac{wH_1}{2}.$$

Здесь t — время процесса; τ, η — переменные интегрирования; I_0 — мощность источника выброса радионуклидов, мг/(м³ · с).

Приведенная выше формула сложна и содержит несобственные интегралы, что существенно затрудняет ее практическое применение. Однако реальные условия распространения выбросов позволяют использовать некоторые допущения. Вертикальную составляющую скорости W положим равной нулю. Это — общепринятое приближение, обусловленное тем, что вертикальная составляющая скорости на два—три порядка меньше горизонтальной. Далее выберем систему координат таким образом, чтобы ось Ox совпадала с направлением ветра, тогда можно положить также, что $v = 0$. Мощность выброса радионуклидов из источника будем считать величиной постоянной и равной I_0 . С учетом этих допущений формула (2) примет вид:

$$c(x, y, z, t) = \frac{2,246 \cdot 10^{-2} I_0}{\sqrt{\langle D_{\text{Тх}} \rangle \langle D_{\text{Ту}} \rangle \langle D_{\text{Тз}} \rangle}} \exp\left(-\frac{u^2 t}{4 \langle D_{\text{Тх}} \rangle}\right) \int_0^t (\sqrt{t-\tau})^{-3} \times \exp\left(\frac{u^2 \tau}{4 \langle D_{\text{Тх}} \rangle}\right) \left\{ \exp\left(-\frac{a^2}{4(t-\tau)}\right) + \exp\left(-\frac{b^2}{4(t-\tau)}\right) \right\} dt. \quad (3)$$

Величина начального подъема аэрозолей определяется по следующей формуле [2]:

$$\Delta H = \frac{1,5w_0 R_0}{u} \left[2,5 + \frac{3,3gR_0(T_0 - T_a)}{T_a u^2} \right]^{-1}, \quad (4)$$

где u — скорость ветра, м/с, на высоте 10 м; R_0 — радиус разрушенной зоны, м; w_0 — средняя скорость выхода газов из зоны, м/с; T_0 — средняя температура газа в струе, К; T_a — температура окружающего воздуха, К; H — высота выходной зоны, м.

Согласно наблюдениям, температура выходящих аэрозолей во время аварии составляла около 1700 °С. Таким образом, величина начального подъема составила порядка 300 м. Для проведения вычислительного эксперимента в качестве расчет-



ной площадки принят участок 1383 км × 2450 км. В качестве характеристики источника выброса приняты средние значения активностей радионуклидов (Ки/с) (см. таблицу).

Расчетное поле мощности экспозиционной дозы излучения в приземном слое атмосферы на территории Подмосковского угольного бассейна представлено на рис. 1 (см. 3-ю сторону обложки). При определении дозовых нагрузок предполагалось, что плотность загрязнения территории радиоактивными выбросами аварии на Чернобыльской АЭС пропорциональна рассчитанной концентрации радионуклида в атмосферном воздухе, т. е. $\dot{X} = K_x c_{\text{расч}}$, где \dot{X} — мощность дозы; K_x — коэффициент пропорциональности; $c_{\text{расч}}$ — расчетное значение средней концентрации радионуклидов Ки/м³. Расчетное значение средней концентрации радионуклидов определялось по формуле:

$$c_{\text{расч}} = c(x, y, t) \exp\left[-\frac{0,693(t-t_0)}{T_{0,5}}\right], \quad (5)$$

где $T_{0,5}$ — период полураспада рассматриваемого радионуклида, t_0 — время начала отсчета.

При этом необходимо учитывать изменение активности вследствие радиоактивного распада. На первом этапе был проведен расчет коэффициентов пропорциональности для трех послеварийных периодов (согласно методическим указаниям 2.6.1.579—96, 2.6.1.1114—02). Умножив рассчитанные концентрации на коэффициенты пропорциональности, получим оценки мощности дозы и плотности загрязнения в расчетных точках, используемые далее для определения поглощенной дозы, которая, в свою очередь, является составляющей показателя радиоактивного загрязнения — средней накопленной эффективной дозы облучения (СНЭД).

Выброс радионуклидов из разрушенного реактора

Радионуклид	Выброс, МКи	Мощность, Ки/с	Радионуклид	Выброс, МКи	Мощность, Ки/с
²³⁹ Np	23,0	26,61	⁹⁵ Zr	4,10	4,74
⁹⁹ Mo	3,7	4,28	¹¹⁰ Ag	10 ⁻³	0,00
¹³² Te	11,0	12,73	¹⁴⁴ Ce	2,40	2,78
¹³¹ I	17,0	19,67	¹⁰⁶ Ru	1,60	1,85
¹⁴⁰ Ba	7,3	8,45	¹³⁴ Cs	0,50	0,58
¹⁴¹ Ce	3,5	4,05	¹²⁵ Sb	4 · 10 ⁻³	0,00
¹⁰³ Ru	3,8	4,40	⁹⁰ Sr	0,22	0,25
⁸⁹ Sr	2,5	2,89	¹³⁷ Cs	1,00	1,16
⁹¹ Y	0,3	0,35	—	—	—

При расчете по значениям экспозиционной дозы можно реконструировать значение мощности поглощенной дозы на интересующий момент времени, а соответственно и получить ретроспективную прогнозную оценку, позволяющую реконструировать дозу облучения населения, полученную в первые месяцы после аварии: $\dot{D}(t) = 2,951 \dot{X}(t) \cdot \Gamma_{\delta}$, где Γ_{δ} — керма постоянная радионуклида. Следующим этапом математического моделирования является ретроспективный прогноз дозы облучения с течением времени в зависимости от радионуклидного состава выбросов. В результате вычислительного эксперимента, получим множество дозовых нагрузок в расчетных точках для конкретных радионуклидов. Просуммировав для точек с равными координатами уровни доз от различных радионуклидов, получим суммарную дозовую нагрузку в расчетных точках.

При расчетах по прогнозным значениям плотности загрязнения сначала по результатам моделирования определяется плотность загрязнения ¹³⁷Cs в расчетной точке: $\sigma_0^{137} = K_{\sigma}(t_0) c_{\text{расч}}$. Тогда поглощенная доза (мкГр/сут), соответствующая территории следа аварии на Чернобыльской АЭС, согласно действующей методике, может быть определена по формуле:

$$\dot{D}(t) = 0,024 r(t) \sigma_0^{137} \sum_i \frac{\sigma_0^i}{\sigma_0^{137}} d_S^i \exp(-\lambda_i t), \quad (6)$$

где σ_0^i — поверхностная плотность загрязнения i -м радионуклидом; σ_0^{137} — средняя плотность загрязнения почвы цезием-137 на дату окончания радиоактивных выпадений, кБк/м²; λ_i — постоянная радиоактивного распада i -го радионуклида, кБк/м; $r(t)$ — функция, описывающая влияние миграции радионуклида в почву на мощность поглощенной дозы в воздухе; d_S^i — удельная мощность поглощенной дозы в воздухе гамма излучения i -го радионуклида для плоского тонкого изотропного источника, расположенного на границе раздела "воздух—почва", (нГр/ч)/(кБк/м²).

Функция $r(t)$, отн. ед., определяется по формуле:

$$r(t) = p_1 \exp(-0,693t T_1^{-1}) + p_2 \exp(-0,693t T_2^{-1}),$$

где $p_1 = 0,4$; $p_2 = 0,42$; $T_1 = 550$ сут.; $T_2 = 18250$ сут.

Для расчета СНЭД внешнего облучения за период с 1986 г. по настоящее время этот период делится

на три временных интервала: I — один год $t = 1$ после аварии; II — от $1 < t \leq 9,7$ лет после аварии; III — от $9,7 < t \leq 14,7$ лет. Для периодов II и III характерно то, что учитывается вклад в дозу внешнего облучения жителей только гамма-излучения цезия-137 и цезия-134, влиянием остальных радионуклидов можно пренебречь.

Значение поглощенной дозы облучения $E = E^{\text{ext}} + E^{\text{int}}$ используется для расчета СНЭД и определяется как сумма доз внешнего облучения гамма-излучения радиоактивных выпадений E^{ext} и дозы внутреннего облучения E^{int} . Уравнение для мощности эффективной дозы (мкЗв/сут) для I периода у представителей j -й группы взрослого населения, проживающего в домах k -го типа имеет вид:

$$\dot{E}_{j,k}^{\text{ext}}(t) = \dot{D}(t)k_E k_C R_{j,k}(t),$$

где k_E — коэффициент перехода от поглощенной дозы в воздухе к эффективной дозе у взрослого человека, мкЗв/мкГр; k_C — коэффициент, учитывающий влияние снежного покрова на величину СНЭД; $R_{j,k}(t)$ — фактор, отражающий эффект уменьшения дозы внешнего облучения в антропогенной среде j -й группы населения, проживающего в домах k -го типа.

При расчете мощности эффективной дозы $\dot{E}_{j,k}^{\text{ext}}(t)$ фактор $R_{j,k}(t)$ аппроксимирован следующей зависимостью:

$$R_{j,k}(t) = \alpha \exp(\beta t) + \delta,$$

где α , β , δ — параметры, зависящие от типа населенного пункта, типа жилого здания и профессии человека соответственно. Переход от мощности эффективной дозы позволил получить прогнозную модель дозы внешнего облучения (мкЗв):

$$E_{j,k}^{\text{ext}} = k_E \left\{ R_{j,k}^I \left[\dot{D}(0) \frac{t_1 - t_0}{2} + \int_0^{189 - t_1} \dot{D}(t) dt \right] + R_{j,k}^{II} k_C \int_{189 - t_1}^{340 - t_1} \dot{D}(t) dt + R_{j,k}^{III} \int_{340 - t_1}^{365} \dot{D}(t) dt \right\}, \quad (7)$$

где t_1 — время, прошедшее с момента аварии до окончания радиоактивных выпадений, сут.; при этом интервал времени $[0; 365 \text{ сут.}]$ разбит на три подынтервала: $[0—189 \text{ сут.}, 189—340 \text{ сут.}, 340—365 \text{ сут.}]$.

Внутренняя доза облучения от радионуклидов, поступивших в организм с пищей (мЗв) на интервале времени (t_1, t_2) , определяется по формуле:

$$E^{\text{int}}(t_1, t_2) = \sum_i dk_i \int_{t_1}^{t_2} I_i(t) dt, \quad (8)$$

где dk_i — дозовый коэффициент для пищевого поступления i -го радионуклида в организм взрослого человека, мЗв/Бк; $I_i(t)$ — суточное поступление i -го радионуклида в организм с пищей, Бк/сут.

Для оценки накопленной дозы $C_{i,p}(t)$, Бк/кг(л), использована радиоэкологическая модель, основанная на коэффициенте перехода $K\Pi_{i,p}(t)$ от плотности загрязнения почвы i -м радионуклидом к удельной активности i -го радионуклида в пищевом продукте: $C_{i,p}(t) = K\Pi_{i,p}(t)\sigma_i(t)$. Концентрация цезия и стронция в молоке коров C_m (Бк/л), выпасаемых на загрязненной местности, аппроксимированы функцией:

$$C_{i,m}(t) = K\Pi_{i,m}(0)\sigma_i(t)(\exp(-0,693t/T_2) - \exp(-0,693t/T_1)),$$

где $K\Pi_{i,m}(0)$ — начальный переход i -го радионуклида в молоко коровы после поверхностного загрязнения почвы и растительности; T_1 — период, близкий к периоду полувыведения цезия и стронция с молоком коровы; T_2 — период, близкий к периоду очистки пастбищной растительности от поверхностного радиоактивного загрязнения.

Использование полученных закономерностей распределения радиоактивных загрязнений на территории Тульской области и зависимостей (7)—(8) позволило получить прогнозные оценки распределения СНЭД с учетом реконструированной дозы облучения населения коротко живущими радионуклидами первого аварийного периода (рис. 2 — см. 3-ю стр. обложки).

Суммарное значение прогнозных оценок СНЭД по всем радионуклидам, являясь нормативным показателем, может использоваться при разработке перспективных планов реабилитации загрязненных территорий. Полученные значения дозовых нагрузок также используются в качестве исходных данных при прогнозе последствий радиоактивного загрязнения для состояния здоровья населения исследуемой территории.

Подмосковный угольный бассейн представляет собой территорию с наличием устойчивых негативных процессов в окружающей среде, на которой техногенное загрязнение и радиационное воздействие привели к возникновению напряженной экологической и санитарно-эпидемиологической обстановки и, как следствие, к ухудшению здоро-



вья населения и распространению эколого-зависимых болезней, обусловленных во многом нарушениями работы иммунной системы. Наблюдается стабильное превышение средних уровней заболеваемости для промышленно развитых городов рассматриваемого региона.

Состояние здоровья населения анализировалось по показателям заболеваемости отдельных классов и видов болезней на тысячу человек населения, а также по структуре заболеваемости, определяющей долевой вклад каждой формы патологии в общую заболеваемость. В ходе анализа рассматривались четыре группы территорий.

1. Контрольные районы, не подвергшиеся радиоактивному загрязнению вследствие аварии на Чернобыльской АЭС: Ясногорский, Заокский, Дубенский.

2. Районы "чернобыльского следа" с выраженным радиационным загрязнением (10 Ки/км^2): Плавский, Чернский и Арсеньевский.

3. "Угольно-промышленные" районы с радиационным загрязнением до 6 Ки/км^2 и развитой угольной промышленностью: Киреевский, Богородицкий и Донской.

4. "Угольно-химические" районы с радиационным загрязнением до 6 Ки/км^2 , с развитой угольной и химической промышленностью: Щекинский, Новомосковский и Узловский.

На основании данных медицинской статистики была сформирована база показателей заболеваемости населения на территориях этих районов. Общая первичная заболеваемость характеризуется ростом на всех территориях. В районах "чернобыльского следа", по сравнению с другими группами районов, отмечаются наиболее высокие значения относительного веса следующих нозологий в общей заболеваемости (2003 г.): заболевания нервной системы и органов чувств — 16,1 %, а в остальных группах районов — 10,4 % (3-я) и 14,1 % (4-я); болезни эндокринной системы — 3,3 %, а в остальных — 1,7 % (3-я) и 3,1 % (4-я); заболевания желчного пузыря и желчевыводящих путей — 1,83 %, в остальных — 0,9 % (3-я) и 1,3 % (4-я) и только в "угольно-промышленных" районах 1,85 %.

Для определения радиационно обусловленных нозологий на исследуемых территориях использовались следующие критерии:

1) наличие значимой корреляционной связи между дозовыми нагрузками населения и уровнем заболеваемости по данной нозологии;

2) превышение абсолютных значений показателей данных нозологии для загрязненных районов над контрольными значениями после аварии на Чернобыльской АЭС;

3) устойчивый рост показателей заболеваемости "грязных" районов на фоне отсутствия такого в условно "чистых" после аварии на Чернобыльской АЭС.

Корреляционный анализ временных рядов показателей заболеваемости населения совместно с временными рядами дополнительных дозовых нагрузок для исследуемой территории показал значимую корреляцию между накопленной дозой облучения и нозологиями. Это позволило выдвинуть гипотезу о наличии функциональной зависимости заболеваемости по данным нозологиям от дозы облучения. С целью исключения случайных корреляций между дозовыми нагрузками и уровнем заболеваемости по выделенным нозологиям были использованы второй и третий критерии, устанавливающие причинно-следственную связь между заболеваемостью и дозовыми нагрузками на основании сравнения информации о динамике показателей здоровья для временных интервалов до и после аварии, "чистых" и "загрязненных" территорий Подмосковского угольного бассейна.

По результатам анализа по всем трем критериям удовлетворяют пять нозологий: новообразования, заболевания эндокринной системы, в том числе сахарный диабет, заболевания крови и кроветворных органов, болезни желчного пузыря и желчевыводящих путей.

Анализ результатов регрессионного исследования показал более высокую адекватность линейной и экспоненциальной зависимостей уровня заболеваемости от дозы облучения по всем нозологиям. Высокие значения коэффициентов корреляции (0,75...0,9) для районов с преобладанием радиоактивного загрязнения свидетельствуют о хорошей их адекватности данным натурных наблюдений и подтверждают гипотезу о преобладающем влиянии дополнительных дозовых нагрузок на формирование прироста заболеваемости по данным нозологиям. Это позволяет предложить уравнения линейной и экспоненциальной зависимостей в качестве зависимости "доза—эффект" при определении прогнозных оценок прироста заболеваемости населения, обусловленного дополнительными дозовыми нагрузками.

Значения коэффициентов корреляции для обеих зависимостей отличаются незначительно, поэтому для практических целей целесообразно использование более простой линейной зависимости, что в целом согласуется с рекомендациями Международной комиссии по радиационной защите по расчетам радиационного риска. Полученные результаты позволяют использовать показатели прироста заболеваемости по "радиационно обусловленным" нозологиям в качестве одной из оценок экологи-



ческого риска для населения радиоактивно загрязненных территорий.

При этом для получения прогнозных оценок прироста заболеваемости по исследуемым нозологиям используются расчетные значения мощности экспозиционной дозы, определяемые на основе математической модели формирования загрязнения территории. Прогнозные оценки прироста показателя заболеваемости по нозологиям определяются далее по зависимостям "доза—эффект". Прогнозные оценки СНЭД и прироста заболеваемости используются для повышения эффективности природоохранных мероприятий на загрязненных территориях.

Основные выводы выполненных исследований заключаются в следующем.

1. Радиоактивное загрязнение территории Тульской области происходило вследствие конвективно-диффузионного переноса радионуклидов с аэрозолями выбросов в атмосферном воздухе.

2. Предложенная модель ретро-прогноза динамики формирования радиоактивного загрязнения исследуемой территории отличается тем, что показатели радиоактивного загрязнения предполагаются пропорциональными распределениям концентраций радионуклидов в аэрозоли приземного слоя воздуха, сформировавшимся вследствие конвективно-диффузионного переноса радионуклидов в атмосфере с аварийными выбросами точечного источника.

3. Для районов "чернобыльского следа" характерен устойчивый рост заболеваний с момента аварии по ряду нозологий, по которым для условно

"чистых" районов отмечается хаотическое изменение показателей.

4. Имеет место значимая корреляция между накопленной дозой облучения и следующими нозологиями: заболеваниями органов дыхания, эндокринной системы, сахарным диабетом, органов пищеварения, новообразованиями, болезнями крови и органов, желчекаменной болезнью (коэффициенты корреляции 0,6...0,9).

Для угольно-промышленных районов Тульской области абсолютное значение коэффициентов регрессионных зависимостей "доза—эффект" выше, чем для районов "чернобыльского следа", следовательно, на этих территориях действуют другие неучтенные факторы, влияние которых усиливает негативное влияние радиации.

Список литературы

1. **Геоэкологические** аспекты загрязнения почвенного покрова / Соколов Э. М., Качурин Н. М., Басова И. А. и др. // Москва—Тула: Гриф и К, 1997. — 292 с.
2. **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.
3. **Системные** принципы радиологической оценки загрязненных территорий / Соколов Э. М., Качурин Н. М., Соколов В. В. и др. — Москва—Тула: Гриф и К, 2003. — 308 с.
4. **Качурин Н. М., Грязев М. В., Сугако Е. А.** Оценка экологических последствий загрязнения территории атмосферными выбросами техногенной аварии (на примере аварии на Чернобыльской АЭС) // Геотехнологии и защита окружающей среды / Академия горных наук. — Вып. 2. — Тула, 2006. — С. 13—30.

АЧЮЧИС!

В приложении к № 7, 2010 года журнала "Безопасность жизнедеятельности" будет опубликован **"Федеральный государственный образовательный стандарт высшего профессионального образования по направлению подготовки 280700 Техносферная безопасность (квалификация (степень) "Магистр")"**, утвержденный приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 21 декабря 2009 г. № 758.

Настоящий федеральный государственный образовательный стандарт высшего профессионального образования (ФГОС ВПО) представляет собой совокупность требований, обязательных при реализации основных образовательных программ магистратуры по направлению подготовки 280700 Техносферная безопасность образовательными учреждениями высшего профессионального образования (высшими учебными заведениями, вузами) на территории Российской Федерации, имеющими государственную аккредитацию.

Право на реализацию основных образовательных программ высшее учебное заведение имеет только при наличии соответствующей лицензии, выданной уполномоченным федеральным органом исполнительной власти.



УДК 502.7:502.55

Э. В. Рошчупкин, канд. техн. наук,
Тулский государственный университет
E-mail: eddy@schekino.tula.ru

Система распределенного автоматизированного мониторинга загрязнения атмосферного воздуха промышленных регионов

Приведены сведения о разработанной системе экологического мониторинга окружающего воздуха с применением новейших разработок в области измерения токсичных газов и передачи информации с подвижных и стационарных экологических постов.

Ключевые слова: мониторинг, глобальная система позиционирования, навигация, микроконтроллеры, электрохимическая ячейка, глобальный цифровой стандарт для мобильной сотовой связи, пакетная радиосвязь общего пользования, служба коротких сообщений, стационарный пост наблюдения, мобильный пост наблюдения, газоанализатор, датчики.

Roshchupkin E. V. System of the distributed automated monitoring of atmospheric air pollution of industrial regions

Data on the developed system of ecological monitoring of environmental air with application of the newest workings out in the field of measurement of noxious gases and an information transfer from mobile and stationary ecological posts are resulted

Keywords: monitoring, global positioning system, navigation, microcontrollers, an electrochemical cell, global system for mobile communications, general packet radio service, short message service, stationary post of observation, mobile post of observation, gas analyzer, sensors.

Введение

Отрицательные воздействия промышленной деятельности человечества на окружающую среду за последнее время становятся наиболее ощутимыми. В атмосферу выбрасывается огромное количество наименований вредных веществ, представляющих серьезную опасность для жизни и здоровья человека. По многим прогнозам проблема защиты окружающей среды в ближайшей перспективе станет наиболее значимой для большинства промышленно развитых стран. Чистый, здоровый воздух в последние годы становится дефицитным природным ресурсом.

Снижение потока солнечного света по причине большой запыленности и загрязненности воздуха замедляет процесс фотосинтеза зеленых насаждений, увеличивает бактериальную загрязненность воздуха, уменьшает бактерицидную защиту воздуха.

В Центральном Федеральном округе России Тульская область — одна из самых индустриальных, с достаточно сложной экологической ситуацией. Региональные экологические проблемы области обусловлены концентрацией большого числа предприятий машиностроения, химической промышленности, металлургических предприятий, тепловых электростанций.

По данным лабораторного контроля наиболее загрязненными городами по состоянию воздушного бассейна являются города Тула, Алексин, Узловая, Новомосковск, Донской, где регистрируются превышения ПДК по пыли, двуокиси азота, сероводороду, аммиаку, фенолу, формальдегиду. Одним из основных загрязнителей атмосферного воздуха, особенно в городах, является автотранспорт — он вносит до 1/3 загрязнений в общий объем загрязнения атмосферы планеты и в несколько раз увеличивает концентрацию оксида углерода в воздухе городов. Суммарные выбросы вредных веществ в атмосферу в Туле от стационарных источников и автомобильного транспорта составляют 118,6 тыс. т/год, что приводит к периодическому превышению предельно допустимых концентраций (ПДК) в несколько раз в течение суток. Наблюдаются превышения ПДК и в ночное время, когда государственные службы экологического контроля не осуществляют контроль.

Из сказанного выше следует, что проблема чистоты воздуха в городе с повышенной техногенной нагрузкой комплексная. Для выработки действенных мер по сокращению выбросов необходим эффективный мониторинг всех источников выбросов в атмосферу на данной территории, учет метеорологических условий и особенностей ландшафта. Очевидно, что в современных условиях для осуществления мониторинга и анализа его результатов наиболее целесообразно применять автоматизированную систему, которая позволяет практически мгновенно получать и анализировать данные с постов, осуществляющих замеры [1].

Существующие системы экологического мониторинга

Во многих странах широко распространены автоматизированные системы мониторинга как отечественного, так и зарубежного производства [НПО "Химвавтоматика" (г. Москва), ЗАО "Экодатчик" (г. Тула), ФГУП СПО "Аналитприбор" (г. Смоленск), УкрНИИАП (Украина), MonitorLabs (США), Dasibi (США), Horiba (Япония), InterLab Inc (США), Peak Scientific Instruments Ltd (Великобритания), Environnement SA (Франция), Аналитик Йена АГ (Германия), ООО "НТЦ Амплитуда" (г. Москва), ЗАО СКБ "Хроматэк" (г. Йошкар-Ола), Sartorius AG (Германия), ООО "Мониторинг" (г. Санкт-Петербург) др.].

Существующие системы экологического мониторинга построены по различным электро-физико-химическим принципам. Они отличаются различными периодами опроса и объемами передаваемой информации, элементной базой и большим количеством согласующих промежуточных устройств, что приводит к значительным затратам денежных средств на объединение различных приборов в одну систему, обслуживание, поверку, доработку и дальнейшее совершенствование системы.

Исходя из анализа существующих систем, можно составить структуру системы распределенного автоматизированного мониторинга атмосферного воздуха города, учитывающую параметры выбросов, метеорологические параметры, текущие концентрации вредных веществ (рис. 1).

Даная структура позволяет учитывать основные параметры, необходимые для построения областей рассеивания вредных веществ, и формировать прогноз дальнейшего распространения примесей в атмосфере.

Описание системы

В Тульском государственном университете на кафедре "Аэрология, охрана труда и окружающей среды" разработана система распределенного автоматизированного мониторинга атмосферного воздуха города.

Структуру системы образует комплекс технических средств, который на основе математических моделей рассеивания вредных веществ в атмосфере, текущих концентраций вредных веществ, томов ПДВ, метеопараметров и мобильных бригад экологического контроля формирует прогноз распространения вредных веществ, с корректированием маршрута движения мобильных бригад экологического контроля для уточнения математических моделей.

На рис. 2 представлена структурная схема системы распределенного автоматизированного мониторинга атмосферного воздуха города. Система состоит из центрального компьютера, метеостанции, стационарных и мобильных постов экологического контроля и мобильных бригад контроля.

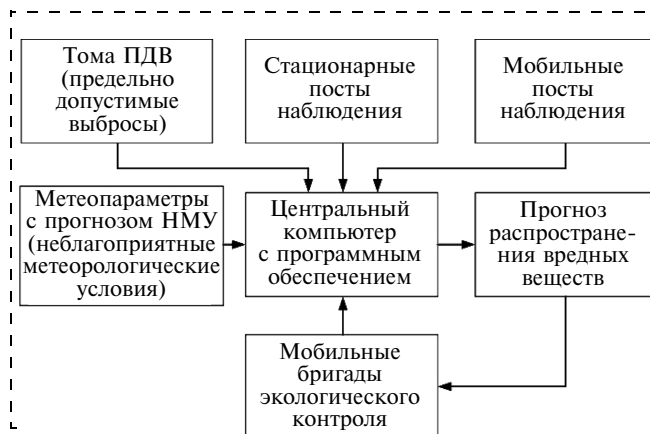


Рис. 1. Структура системы распределенного автоматизированного мониторинга атмосферного воздуха города

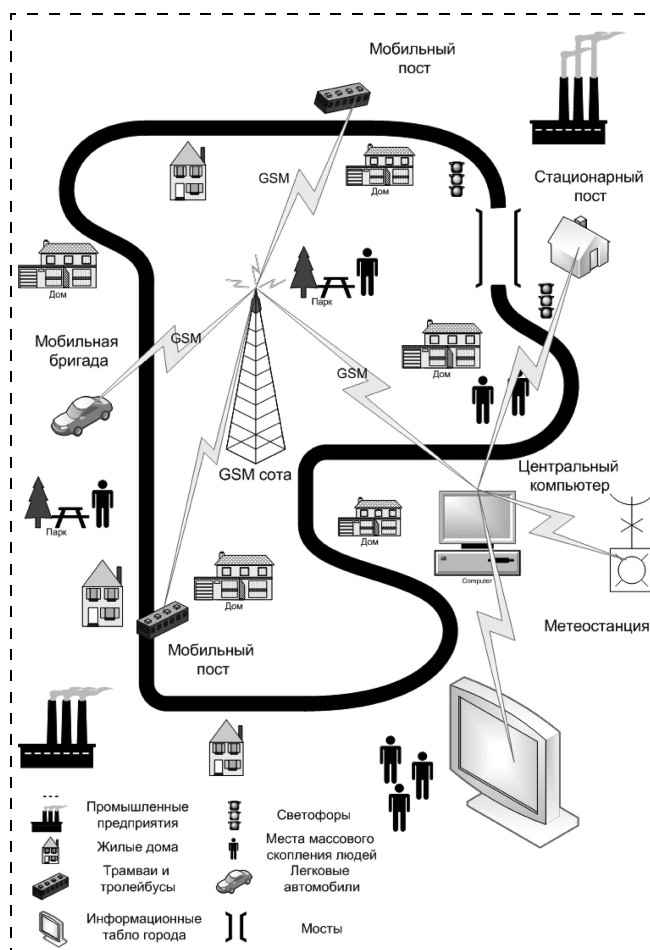


Рис. 2. Структурная схема системы распределенного автоматизированного мониторинга атмосферного воздуха города



На центральном компьютере установлено программное обеспечение, которое на основе данных, получаемых со стационарных и мобильных постов наблюдения, а также метеопараметров и томов ПДВ, осуществляет отображение областей рассеивания вредных веществ на электронной карте города, с выработкой прогноза дальнейшего распространения примесей в атмосфере и маршрута действия мобильных бригад, а также выявления нарушителя экологического состояния.

Оборудование центрального компьютера системы

Центральный компьютер системы представляет собой персональный компьютер с установленным программным обеспечением: модуль "Эмиссия" [2], модуль для информационной поддержки принятия решений по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций, возможных при разливе аварийно-химически опасных веществ (АХОВ) [3], и метеостанцию WS2300 (Германия).

Метеостанция содержит датчики: атмосферного давления, температуры, влажности, количества осадков, направления и скорости движения воздуха. Метеостанция имеет прогноз погоды на ближайшие 12...24 ч с тенденцией изменения атмосферного давления, режим сигнализации о наступлении следующих видов событий: выхода за верхний и нижний пределы показателей температуры, влажности, температуры "охлаждения ветром" (определяемой по температуре и скорости ветра), точки росы, давления, скорости, а также об изменении направления ветра, и определении штормового предупреждения.

Программное обеспечение центрального компьютера позволяет по данным об источниках выброса примесей и условиях местности рассчитывать концентрации примесей в приземном слое атмосферы территории промышленных предприятий, а также при разрыве газопроводов с помощью разработанного программного модуля "Эмиссия".

В программном модуле "Эмиссия" реализована методика расчета распространения вредных веществ в воздушной среде на основе Гауссовского уравнения рассеивания для точечных источников. Для получения общей концентрации рассчитывается концентрация для каждого источника, которая суммируется в дальнейшем. На рис. 3 (см. 4-ю стр. обложки) показана копия экрана результатов расчета с помощью программного модуля "Эмиссия".

С помощью программного модуля для информационной поддержки принятия решений по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций, возможных при разливе АХОВ, система позволяет по данным об источниках выброса примесей, условиях ландшафта строить на электронной карте местно-

сти возможные зоны поражения. Данный модуль разработан для электронной карты Тульской области и может быть использован на других картах при необходимости их доработке.

Сценарии возникновения и развития аварий с выбросом АХОВ целесообразно создавать для всех потенциально опасных химических объектов и предприятий выделенного промышленного района на базе предварительно составленных их паспортов риска, содержащих данные о местоположении, ведомственной подчиненности, производственном потенциале, типах возможных аварий и их масштабах, внутренних (технологических) и внешних причинах их возникновения, мероприятиях и средствах предупреждения, имеющихся возможностях, силах и средствах ликвидации и проведения спасательных и других неотложных работ, связанных с авариями с выбросом АХОВ.

Сценарий возникновения и развития химической аварии формулируется в терминах множеств альтернативных неблагоприятных возможных событий (угроз) и связей между ними, возникающих, реализующихся и отображающихся на временной шкале выбранного масштаба (часы, сутки). Он содержит все элементы множества альтернативных путей развития отдельной аварии или их комбинации на конкретных потенциально опасных химических объектах. Каждый альтернативный путь развития химической аварии характеризуется объемами ожидаемых ущербов и потерь, которые рассчитывают по имеющимся методикам головных отраслевых институтов.

Основной целью этого программного модуля "Эмиссия" является повышение эффективности работы органов управления, прогнозирования действий имеющихся сил и средств как при возникновении аварии с выбросом АХОВ, так и в повседневной деятельности, повышение достоверности, полноты и оперативности обработки информации, относящейся к компетенции органов управления.

При возникновении аварии с выбросом АХОВ в зону поражения попадают ближайшие к месту аварии школы, жилые дома, котельные и т. д. Имея базу данных, содержащую сведения о количестве человек, находящихся в объектах, попавших в зону поражения, можно более точно установить количество пострадавших в результате аварии.

Совмещение карт с базой данных, в которой должна находиться основная информация об объектах (количестве проживающих, размерах объекта, назначении объекта и т. д.), позволяет повысить скорость и качество принятия решений по ликвидации последствий аварийных ситуаций.

На рис. 4 показана копия экрана отображения сектора возможного заражения территории при

аварии с выбросом АХОВ. На карте показана территория заражения, а также объекты, которые попали в зону заражения: улицы, жилые дома, производственные здания и т. д. На рисунке показана область зоны поражения с числовыми значениями.

Вся информация о текущих концентрациях вредных веществ, поступающая со стационарных и мобильных постов, записывается в базу данных Microsoft Access с привязкой ко времени и дате опроса. Программное обеспечение позволяет делать выборку из базы данных на интересующую дату.

Стационарный пост

Стационарный пост (рис. 5) представляет собой фотоколориметрический порошковый стационарный автоматический прибор циклического действия (газоанализатор), состоящий из блока управления и трех датчиков (CO , NO_2 , SO_2) производства ЗАО "Экодатчик", г. Тула (NO_2 , SO_2) и ФГУП СПО "Аналитприбор", г. Смоленск (CO). Данный газоанализатор разрешен к применению Росгидрометом и выполняет функцию автоматического преобразования концентрации измеряемого компонента, содержащегося в атмосферном воздухе, в электрический сигнал постоянного тока.

Принцип действия индикаторного порошка в составе газоанализатора основан на изменении спектрального коэффициента отражения от его поверхности в видимой области спектра при контакте с анализируемым воздухом.

Программное обеспечение ("Экомонитор" [4]) стационарного поста наблюдения, разработанное ТулГУ, осуществляет сбор и передачу на центральный компьютер системы информации о текущих концентрациях измеряемых показателей.

Мобильный пост

Мобильный пост представляет собой портативный автоматический газоанализатор для рабочей и жилой зоны "ЭЛАН-СО-50" производства НПО "ЭКО-ИНТЕХ" (г. Москва) с разработанным в Тульском государственном университете блоком измерения, накопления и передачи экологической информации по сотовым сетям GSM [5]. Газоанализатор "ЭЛАН" предназначен для измерения массовой концентрации оксида углерода в атмосферном воздухе (воздухе жилой зоны). Принцип действия прибора — электрохимический. В газоанализаторе используются электрохимические сенсоры фирмы City Technology (Великобритания). Срок службы сенсоров — до трех лет. Газоанализатор собран в корпусе из ударопрочной пластмассы. Питание устройства осуществляется от аккумулятора, заряд кото-

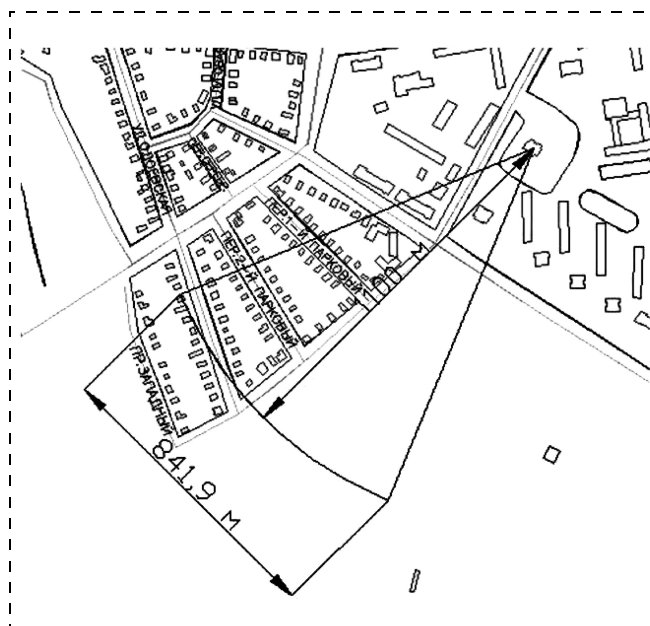
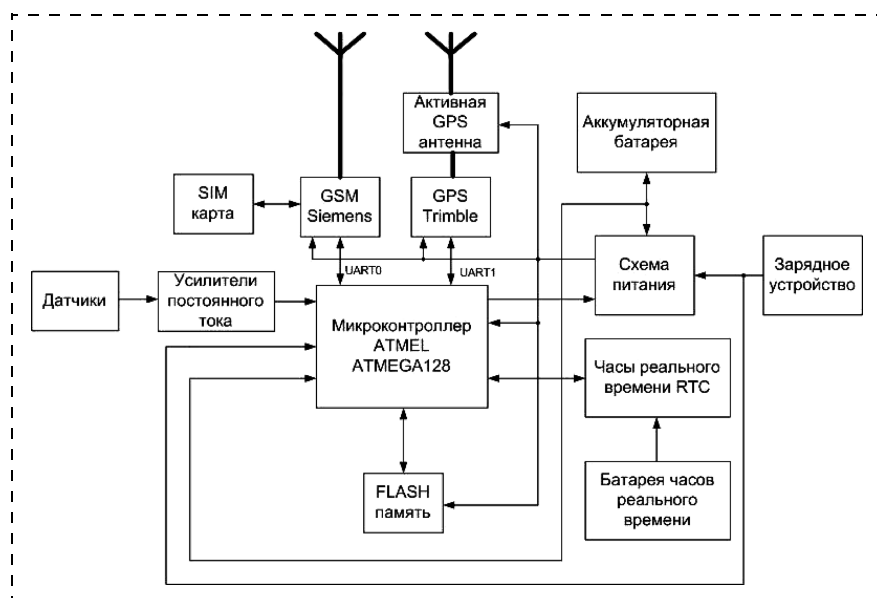


Рис. 4. Отображение сектора возможного заражения территории с указанными размерами



Рис. 5. Внешний вид стационарного поста



рого контролирует зарядное устройство, подключенное к бортовой сети транспортного средства.

На рис. 6 показана структурная схема блока измерения, накопления и передачи экологической информации по сотовым сетям GSM мобильного поста. Блок передачи данных содержит микроконтроллер AVR Atmega 128 фирмы Atmel с двумя последовательными интерфейсами, GSM модуль фирмы Siemens, подключенный к нулевому последовательному интерфейсу, SIM карту любого оператора сотовой связи, GPS модуль Sorbicus компании Trimble, подключенный к первому последовательному интерфейсу, выносные датчики токсичных газов (до восьми налоговых датчиков) и охранной сигнализации, часы реального времени, микросхему FLASH памяти фирмы

Рис. 6. Структурная схема блока измерения, накопления и передачи экологической информации по сотовым сетям GSM

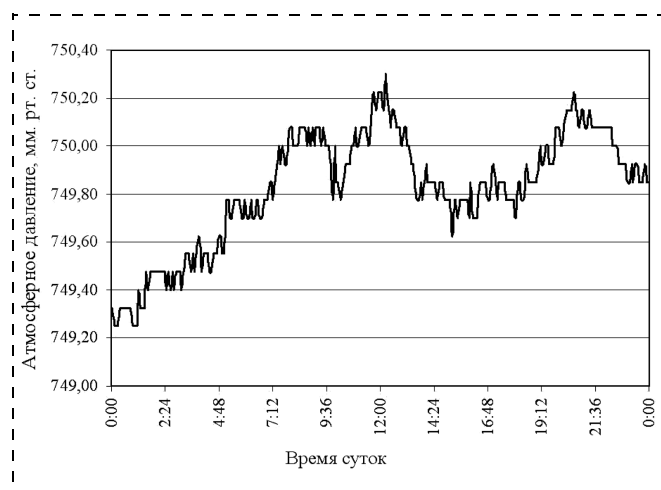


Рис. 7. Суточный ход атмосферного давления

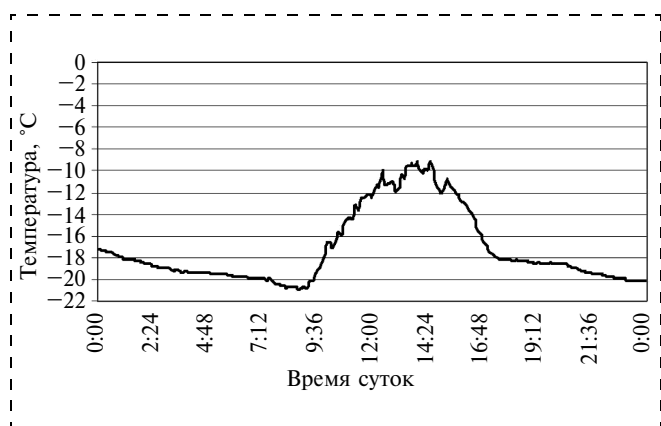


Рис. 8. Суточный ход температуры

Atmel для хранения информации о концентрации, географическом положении и времени измерения, аккумуляторную батарею, зарядное устройство.

Блок передачи данных осуществляет непрерывное измерение концентраций токсичных газов, определение географических координат мобильного поста с помощью системы глобального позиционирования GPS и производит передачу данных на центральный компьютер системы через сеть GSM в режиме коротких текстовых сообщений (SMS), в режиме аналоговой передачи данных (Voice Data) или в режиме пакетной передачи данных посредством сотовой связи (GPRS).

Режим передачи данных переключается как автоматически, в зависимости от тарифа сотового оператора, так и дистанционно с центрального компьютера. В случае отсутствия связи с центральным компьютером запись информации осуществляется в микросхему FLASH памяти.

Результаты работы системы

Круглосуточный мониторинг состояния концентраций вредных примесей в воздухе в месте установки стационарного поста (перекресток ул. Болдина и пр. Ленина) и результаты испытаний мобильного поста (по маршруту движения троллейбуса № 8) позволяет наблюдать превышение ПДК почти по всем параметрам, особенно в неблагоприятную погоду и при большом количестве автотранспорта на улицах города.

На рис. 7—9 представлены суточные изменения метеопараметров, измеренных с помощью метеостанции 15 декабря 2009 г.

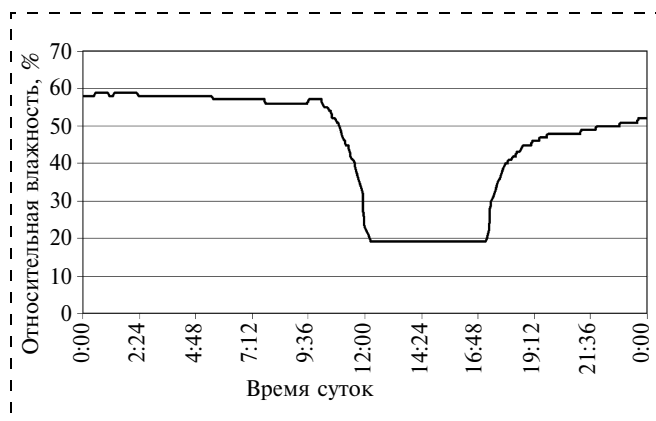


Рис. 9. Суточный ход относительной влажности воздуха

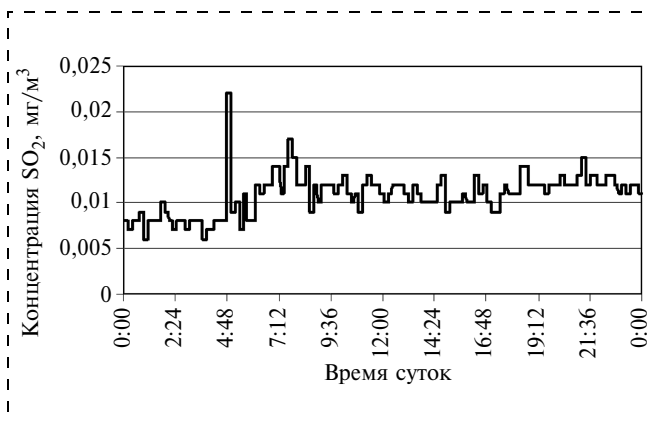


Рис. 11. Суточный ход концентрации диоксида серы

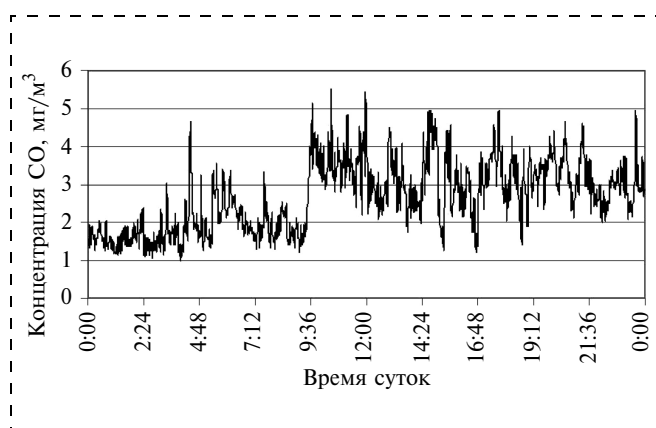


Рис. 10. Суточный ход концентрации оксида углерода

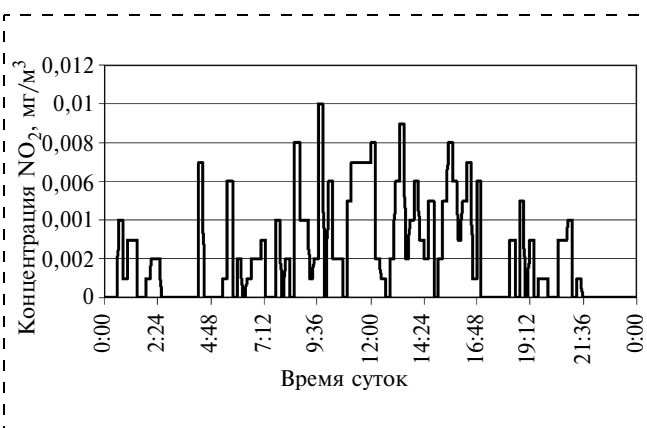


Рис. 12. Суточный ход концентрации диоксида азота

Анализ данных, получаемых с метеостанции, позволяет выявить признаки начала момента наступления НМУ (см. рис. 9). На рис. 10–12 представлены суточные изменения CO , SO_2 и NO_2 , полученные стационарным постом наблюдения также 15 декабря 2009 г.

Характер графиков на рис. 12–13 (ступенчатое изменение параметров) обусловлен циклическим обдувом индикаторного порошка измерительных приборов на измеряемые компоненты NO_2 и SO_2 .

На рис. 13 и 14 представлена динамика изменения концентрации оксида углерода по территории города Тулы за 15 декабря 2009 года, измеряемая с помощью мобильного поста. Прямая полужирная линия соответствует максимально разовой ПДК (5 мг/м^3) этого загрязнителя.

Из приведенных графиков видно, как изменяются концентрации вредных веществ по территории города. Наблюдаются моменты, когда показания стационарного поста находятся в норме, а мобильного — превышают ПДК и наоборот.

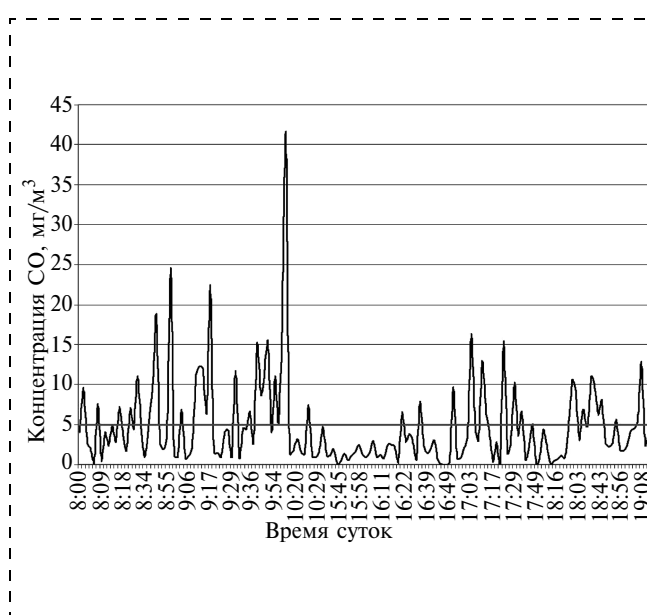


Рис. 13. Динамика изменения концентрации оксида углерода по маршруту движения троллейбуса № 8

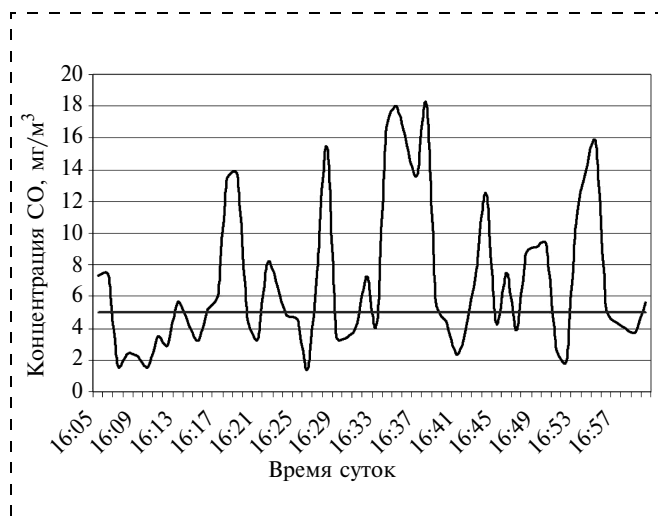


Рис. 14. Динамика изменения концентрации оксида углерода за короткий интервал времени

Для повышения достоверности реальных концентраций вредных веществ необходимо оборудовать мобильными и стационарными постами все районы города, особенно там, где наблюдается большое скопление автотранспорта. Вся информация о каждой точке установки должна передаваться в информационный центр Администрации Тульской области через сеть Интернет, а также на информационные табло г. Тулы. Любой житель города, а также пользователь сети Интернет должен получить доступ к информации в режиме реального времени.

Данные системы находят применение при анализе параметров и концентраций различных газов, времени выброса, продолжительности выброса, его направления и интенсивности. Также возможно использование в дальнейшем прогноза состояния и развития экологической обстановки в области.

Доступ к базе данных распределенной системы мониторинга атмосферы города может осуществляться через локальную сеть ТулГУ, сеть Интернет, а также с помощью SMS сообщений и через GPRS-Интернет. Планируется вывод текущих значений концентраций вредных веществ на информационные табло города Тулы.

Выводы

Разработанная система распределенного автоматизированного мониторинга загрязнения атмосферного воздуха промышленных регионов позволяет:

— осуществлять непрерывный контроль состояния атмосферного воздуха промышленного региона;

— наращивать число датчиков и мест их установки как подвижных так и стационарных;

— отображать экологическую информацию на электронной карте области;

— строить зоны распределения веществ и отображать их на карте Тулы (любой карте);

— реагировать на экстремальные ситуации превышения ПДК и увеличения градиента дальнейшего роста;

— создавать форму отчетности предприятий в период неблагоприятных метеорологических условий (НМУ) — направление ветра, штиль, опасная скорость ветра;

— автоматически оповещать предприятия о наступлении НМУ выбросов и контролировать реакцию предприятий на эти извещения.

Данная разработка подтверждена свидетельствами о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2008615882, № 2009610848, № 2009610849 и патентом Российской Федерации № 2363031.

Список литературы

1. Панарин В. М., Рошупкин Э. В., Симанкин А. Ф., Бизикин А. В. Предпосылки создания автоматизированной системы экологического мониторинга на территории г. Тулы // Вестник ТулГУ. Серия Экология и безопасность жизнедеятельности: Вып. 1. — Тула: Изд-во ТулГУ, 2008. — С. 215—219.
2. "Эмиссия" // В. С. Павлова, Э. М. Соколов, В. М. Панарин, Э. В. Рошупкин, А. Ф. Симанкин, Ю. Н. Пушилина, А. А. Зуйкова, А. В. Бизикин / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2009610848 / Правообладатель: Тульский государственный университет. Заявка № 2008615899. Дата поступления 16 декабря 2008. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 6 февраля 2009 г.
3. Программный модуль для информационной поддержки принятия решений по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций, возможных при разливе аварийно-химически опасных веществ // Э. М. Соколов, В. М. Панарин, А. В. Бизикин, Э. В. Рошупкин, А. А. Зуйкова, Ю. Н. Синдеева, Н. А. Телегина, В. Л. Чижова, В. С. Павлова / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2009610849 / Правообладатель: Тульский государственный университет. Заявка № 2008615900. Дата поступления 16 декабря 2008. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 6 февраля 2009 г.
4. ТулГУ: "Экомонитор" // А. В. Бизикин, Э. М. Соколов, В. М. Панарин, Э. В. Рошупкин, А. Ф. Симанкин, Ю. Н. Пушилина, А. А. Зуйкова, В. С. Павлова / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2008615882. Правообладатель ТулГУ. Заявка № 2008615497. Зарегистрировано 9 декабря 2008 г.
5. Устройство контроля параметров производственной среды // Э. М. Соколов, В. М. Панарин, А. А. Зуйкова, Э. В. Рошупкин, Ю. Н. Синдеева, В. С. Павлова / Пат. 2363031 Рос. Федерация: МПК7 G 05 D 27/02.; заявитель и патентообладатель Тульский государственный университет. — № 2008114738; заявл. 14.04.08; опубл. 27.07.09, Бюл. № 21. — 9 с.



УДК 622.411.3:0041(470,312)

Г. В. Стась, канд. техн. наук, доц., И. И. Агеев, асп., О. В. Демина, асп.,
Тульский государственный университет
E-mail: galina_stas@mail.ru

Алгоритмы и комплекс программных средств для прогноза газообмена в атмосфере шахт Подмосковного угольного бассейна

Приведены алгоритмы и комплекс программных средств для прогнозирования газообмена в атмосфере шахт, не опасных по метану. Представлены усовершенствованные методики инвентаризации источников пылегазовых выбросов от угольных шахт Подмосковного бассейна, учитывающие поглощение кислорода угольным пластом, выделения углекислого газа и радона в шахтный воздух.

Ключевые слова: источники пылегазовых выбросов, кислород, углекислый газ, радон, шахтный воздух, алгоритм, угольный пласт.

Stas G. V., Ageev I. I., Demina O. V.
Algorithm and program system for forecasting interchange of gases in atmosphere of the Moscow coal basin mines

Algorithm and program system for forecasting interchange of gases in atmosphere of not dangerous by methane factor mines are demonstrated. Improved methods of powder-gas emission from the Moscow Coal Basin mines inventory are shown. Differences of these methods consist of taking into account of consuming oxygen by coal seam, emission into mining air of carbonic acid and radon.

Keywords: sources of powder-gas emission, oxygen, carbonic acid, radon, mining air, algorithm, coal seam.

Горное производство, являясь одним из основных видов хозяйственной деятельности человека, неизбежно приводит к изменению физических и химических характеристик окружающей природной среды [1–3].

В этих условиях особую значимость и актуальность приобретает задача совершенствования методик инвентаризации источников пылегазовых выбросов от угольных шахт Подмосковного бассейна на основе изучения закономерностей миграции радона, поглощения кислорода и выделения углекислого газа из угольных пластов, для повышения достоверности оценки воздействия горных предприятий на приземный слой атмосферы [3].

Оценка выбросов радона в шахтную атмосферу из подземных вод по результатам исследований,

Таблица 1
Объемная активность источников радона
в подземных и поверхностных водах

№ пробы	Место отбора пробы	Объемная активность радона, Бк/м ³
1	Общий водослив шахты Дубовского	<100
2	Упинский водоносный горизонт шахты Дубовской, скважины водопонижения	9,0 · 10 ³
3	Алексинский водоносный горизонт шахты Дубовской, скважины водопонижения	2,1 · 10 ³
4	Упинский водоносный горизонт шахты Рассошинской, скважины водопонижения	5,0 · 10 ³
5	Водоприток из ствола шахты Рассошинской, примерно из Тульского горизонта	<100
6	Общий шахтный слив шахты Рассошинской	11,0 · 10 ³
7	Родник на восточной окраине г. Узловая у больницы машзавода	<100
8 и 12	Родник на северной окраине г. Богородицка	54,6 · 10 ³
9	Плотоновский родник г. Тула	4,86 · 10 ³
10	Общий водослив шахты Западной	2,07 · 10 ³
11	Упинский водоносный горизонт шахты Западной, скважины водопонижения	1,73 · 10 ³
13	Упинский водоносный горизонт карьера г. Богородицка, скважины водопонижения	<100
14	Водосток из карьера г. Богородицка с рабочего горизонта уч. 3	1,95 · 10 ³
15	Позднедевонский водоносный горизонт карьера г. Богородицка, скважины питьевого водоснабжения	<100
16	Упинский водоносный горизонт шахты № 77, скважины водопонижения	2,55 · 10 ³
17	Родник в левом борту реки Дон западнее с. Куликово	9,06 · 10 ³
18	Водослив с рабочего уступа карьера Ушаковский	1,28 · 10 ³
19	Водослив с отработанного уступа карьера Ушаковский	<100
20	Упинский водоносный горизонт шахты Подмосковной, скважины водопонижения	<100
21	Пруд — отстойник общего слива шахты Подмосковной	<100
22	Общий водослив шахты Бельковская	<100
23	Упинский водоносный горизонт шахты Бельковская, скважина водопонижения	22,4 · 10 ³
24	Общий слив шахты Прогресс	<100



полученных группой ученых Московской геолого-разведочной академии под руководством проф. П. А. Игнатова и сотрудниками кафедры аэрологии, охраны труда и окружающей среды под руководством проф. Н. М. Качурина, показала, что на общем водосливе шахт содержание радона в воде, как правило, менее 100 Бк/м³, а в подземных водах, поступающих в дренажную систему очистных и подготовительных участков, концентрация радона изменяется от 1700 до 22000 Бк/м³ [2—3]. Следовательно, шахтные воды будут являться источником радоновыделений в вентиляционные воздушные потоки (табл. 1).

Расчет газовой выделений в шахтные вентиляционные выбросы производится на основе закономерностей миграции радона, поглощения кислорода и выделения углекислого газа из угольных пластов [1, 2]. Для автоматизации инженерно-технических расчетов газовой выделений в шахтные вентиляционные выбросы разработаны программы на объектно-ориентированном языке Borland Delphi 8.0 Architect Edition.

Алгоритм расчета выделения радона в шахтные вентиляционные выбросы

1. Формируют информационный блок исходных данных, включающий следующие параметры: D_{Rn} — коэффициент эффективной диффузии радона в угольном пласте, м²/с; λ — постоянная радиоактивного распада радона, 1/с; I_{Rn} — мощность объемной активности радона в порах и трещинах угольного пласта, Бк/м³·с; C_{Rn}^y — равновесная объемная активность радона в твердой фазе, Бк/м³; S — площадь поверхности обнажения угольного пласта, м²; L_k — длина дренажного канала, м; S_k — площадь поперечного сечения дренажного канала, м²; $J_{Rn\xi=0}$ — мощность объемной активности радона, выделяющегося в воздух из единицы объема воды в точке $\xi = 0$, Бк/м³·с; $J_{Rn\xi=L_k}$ — мощность объемной активности радона, выделяющегося в воздух из единицы объема воды в точке $\xi = L_k$, Бк/м³·с.

2. Рассчитывают мощность поверхностной активности радона с единичной площади поверхности обнажения породугольного массива (Бк/м²·с):

$$I_{Rn}^* = I_{Rn} \sqrt{\frac{D_{Rn}}{\lambda}} C_{Rn}^y \sqrt{D\lambda}.$$

3. Рассчитывают мощность активности радона, выделяющегося со всей поверхности обнажения породугольного массива (Бк/с): $I_{Rn}^y = I_{Rn}^* S$.

4. Рассчитывают мощность активности радона, выделяющегося из подземных шахтных вод (Бк/с):

$$I_{Rn}^B = (J_{Rn|\xi=0} - J_{Rn|\xi=L_k}) S_k L_k.$$

5. Рассчитывают общую мощность активности радона, выделяемого в приземный слой атмосферы

$$(Бк/с): I_{Rn}^\Sigma = I_{Rn}^y + I_{Rn}^B.$$

Щелчком курсора на значке файла "Project1.exe" вызывается форма программного модуля, показанная на рис. 1. Затем вносятся в соответствующие окна исходные данные и нажимают кнопку "Расчет". Исходные данные и результаты расчета общей мощности активности радона в приземный слой атмосферы представлены в табл. 2.

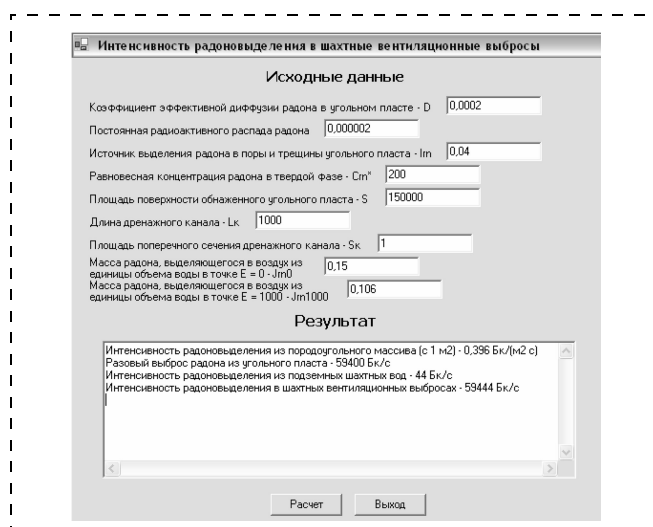


Рис. 1

Таблица 2

Исходные данные и результаты расчета мощности активности радона

Наименование параметра	Обозначение	Единицы измерения	Среднее значение параметра
Коэффициент эффективной диффузии радона в угольном пласте	D_{Rn}	м ² /с	0,0002
Постоянная радиоактивного распада радона	λ	—	0,000002
Мощность объемной активности радона в порах и трещинах угольного пласта	I_{Rn}	Бк/м ³ ·с	0,04
Равновесная объемная активность радона в твердой фазе	C_{Rn}^y	Бк/м ³	200
Площадь поверхности обнажения угольного пласта	S	м ²	15 000
Длина дренажного канала	L_k	м	1000
Площадь поперечного сечения дренажного канала	S_k	м ²	1
Мощность объемной активности радона, выделяющегося в воздух из единицы объема воды в точке $\xi = 0$	$J_{Rn\xi=0}$	Бк/м ³ ·с	0,15
Мощность объемной активности радона, выделяющегося в воздух из единицы объема воды в точке $\xi = L_k$	$J_{Rn\xi=L_k}$	Бк/м ³ ·с	0,106
Среднее значение общей мощности активности выделяемого радона	I_{Rn}^Σ	Бк/с	59 444

Алгоритм расчета поглощения кислорода и выделения углекислого газа

1. Формируют информационный блок исходных данных, включающий следующие параметры: C_B — средняя массовая концентрация кислорода в шахтном воздухе, $\text{мг}/\text{м}^3$; $\rho_{\text{к.а}}$ — плотность кислорода при атмосферном давлении, $\text{кг}/\text{м}^3$; $\rho_{\text{уг.а}}$ — плотность углекислого газа при атмосферном давлении, $\text{кг}/\text{м}^3$; Γ — константа динамического равновесия процесса сорбции (константа Генри), $\text{м}^6/\text{кг}^2$; K_c — константа скорости взаимодействия кислорода с углем, $1/\text{с}$; D_0 — коэффициент эффективной диффузии кислорода в угольном пласте, $\text{м}^2/\text{с}$; S — площадь поверхности обнажения угольного пласта, м^2 .

2. Рассчитывают удельное поглощение кислорода поверхностью обнажения угольного пласта ($\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$): $I_{\text{уд}^*} = 10^{-6} C_B (\Gamma K_c D_0)^{0,5}$.

3. Рассчитывают среднегодовое поглощение кислорода из приземного слоя атмосферы поверхностью обнажения угольного пласта: $G_{\text{к}} = 31,536 M_{\text{к}}$ т/год, где $M_{\text{к}} = 10^3 I_{\text{уд}^*} S \rho_{\text{к.а}}$ г/с.

4. Рассчитывают валовой выброс углекислого газа в атмосферу поверхностью обнажения угольного пласта: $G_{\text{уг}} = 31,536 M_{\text{уг}}$ т/год, где $M_{\text{уг}} = 10^3 I_{\text{уд}^*} \times S \rho_{\text{уг.а}}$ г/с.

Щелчком курсора на знаке файла "Project1.exe" вызывается форма программного модуля, пока-

Таблица 3

Исходные данные и результаты расчета интенсивности поглощения кислорода и выделения углекислого газа в шахтах

Наименование параметра	Обозначение	Единицы измерения	Среднее значение параметра	Среднее значение поглощения и выделения газа т/год (г/с)
Средняя массовая концентрация кислорода в шахтном воздухе	C_B	$\text{мг}/\text{м}^3$	270 967	Поглощение O_2 4,92 (0,156)
Плотность кислорода при атмосферном давлении	$\rho_{\text{к.а}}$	$\text{кг}/\text{м}^3$	1,43	
Плотность углекислого газа при атмосферном давлении	$\rho_{\text{уг.а}}$	$\text{кг}/\text{м}^3$	1,98	
Константа динамического равновесия процесса сорбции	Γ	$\text{м}^6/\text{кг}^2$	1	Выделение CO_2 6,84 (0,217)
Константа скорости взаимодействия кислорода с углем	K_c	$\text{м}/\text{с}$	$2 \cdot 10^{-6}$	
Коэффициент эффективной диффузии кислорода в угольном пласте	D_0	$\text{м}^2/\text{с}$	$6 \cdot 10^{-7}$	
Площадь поверхности обнажения угольного пласта	S	м^2	150 000	

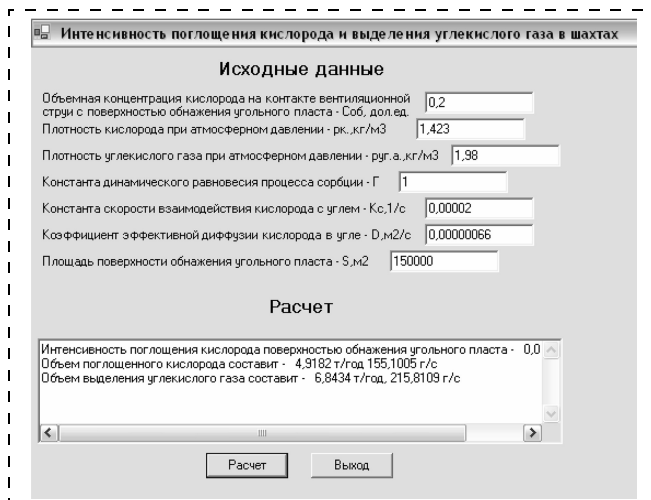


Рис. 2

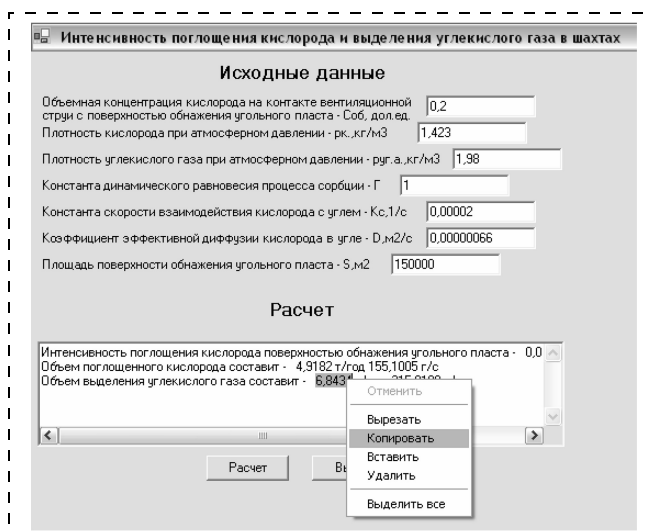


Рис. 3

званная на рис. 2. Затем вносятся в соответствующие окна исходные данные и нажимают кнопку "Расчет".

Исходные данные и результаты расчета поглощения кислорода и валового выброса углекислого газа среднестатистической шахтой представлены в табл. 3. Сравнение результатов вычислительных экспериментов показало, что разработанный алгоритм расчета газообмена угольных шахт Подмосковного бассейна с приземным слоем атмосферы дают хорошую сходимость с данными природных наблюдений.

Отметим, что наряду с выбросами загрязнителей в атмосферу на территории промплощадок угольных шахт, необходимо учитывать поглощение кислорода разрабатываемым угольным пластом, а также расходование кислорода при технологических про-



9	А	В	С	Д	Е	Ф	Г	Н	И	К	Л		
10	строки	количество	вещества	всего	в том числе от организованных источников загрязнения	сооружения загрязняющих веществ	обезврежено	из них утилизировано	веществ за отчетный год	веществ на отчетный год,			
11						всего			за	предельно допустимый выброс (ПДВ)	временный выброс (ВСВ)		
12									предыдущий год				
13									год				
14	А	1	Б	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
15	101	0001	Всего (102+103)	274,351	271,998	0	0	0	274,352	26,261	х		
16	102	0002	в том числе:										
17			твердые	130,264	127,921	0	0	0	130,264	0,702	х	х	
18	103	0004	газообразные и жидкие (104-109)	144,0					0	144,088	25,559	х	х
19			из них:										
20	104	0330	диоксид серы	130,2					0	130,251	0,224		
21			оксид углерода	10,7					0	10,780	15,830		
22	105	0337	оксиды азота										
23	106	0301	(в пересчете на диоксид азота)	3,00									
24			углеводороды без летучих органических соединений	0,00									
25	107	0401	летучие органические соединения (ЛОС)	0,00									
26			прочие газобразные и жидкие	0,00									
27			газообразные и жидкие	0,00									
28	108	0006	газообразные и жидкие	0,00									
29			углеводороды без летучих органических соединений	0,00									
30	109	0005	летучие органические соединения (ЛОС)	0,00									
31			прочие газобразные и жидкие	0,00									
32			газообразные и жидкие	0,00									
33			газообразные и жидкие	0,00									
34			газообразные и жидкие	0,00									
35			газообразные и жидкие	0,00									
36			газообразные и жидкие	0,00									
37	110	0337	оксид углерода										
38	111		радон										
39	112		поглощ. кислорода										

Рис. 4

цессах на поверхностном технологическом комплексе.

Разработанные и апробированные комплекты программных средств для расчета пылегазовых выбросов от источников поверхностного технологического комплекса шахт Подмосквового бассейна позволяют автоматизировать процесс инвентаризации источников загрязнения атмосферы. Расчет газообмена шахты с приземным слоем атмосферы выполняется в соответствии с формой федерального государственного статистического наблюдения № 2-ТП (воздух) "Сведения об охране атмосферного воздуха". В данную форму внесены сведения по пылегазовым выбросам не только надшахтных зданий, но и выбросы в атмосферу радона, углекислого газа, а также включено в инвентаризацию

поглощение кислорода угольными пластами. Для автоматизации заполнения данной формы удобно пользоваться разработанными программами, написанными на объектно-ориентированном языке Borland Delphi 8.0 Architect Edition. Для этого необходимая расчетная величина любой из программ копируется с помощью буфера обмена (рис. 3), а потом вставляется в соответствующую строку и столбец необходимого раздела формы 2-ТП "Воздух" (рис. 4).

Практическое использование усовершенствованной методики инвентаризации пылегазовых выбросов на территориях угледобывающих районов рассмотрено на примере типовой угольной шахты Подмосквового бассейна. Оценивая в целом разработанные алгоритмы и комплекс программных средств, следует отметить,

что системный подход к оценке техногенного воздействия на атмосферу является основой обеспечения безопасного состояния рудничной атмосферы и экологической безопасности, которые взаимосвязаны и решаются в едином комплексе обеспечения безопасности жизнедеятельности горного предприятия.

Список литературы

1. Соколов Э. М., Качурин Н. М. Углекислый газ в угольных шахтах. — М.: Недра 1987. — 142 с.
2. Аэрогазодинамика углекислородобильных шахт / Н. М. Качурин, Р. А. Ковалев, А. Л. Бобовников и др. // М. — Издательство МГУ. — 2005. — 302 с.
3. Загрязнение атмосферы топливно-энергетическим комплексом при использовании углей Подмосквового бассейна / Н. М. Качурин, В. В. Поляков, В. И. Ефимов, Г. В. Стась // Москва — Тула. — Издательство "Гриф и К". — 2004. — 243 с.

Учредитель ООО «Издательство "Новые технологии"»

Журнал выходит при содействии Учебно-методического совета "Техносферная безопасность" Учебно-методического объединения вузов по университетскому политехническому образованию и Научно-методического совета "Безопасность жизнедеятельности" Министерства образования и науки Российской Федерации

ООО "Издательство "Новые технологии". 107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Телефон редакции журнала (499) 269-5397, тел./факс (499) 269-5510, e-mail: bjd@novtex.ru, http://novtex.ru/bjd

Телефон главного редактора (812) 550-0766, e-mail: rusak-maneb@mail.ru

Дизайнер Т. Н. Погорелова.

Технический редактор Е. В. Конова. Корректор Т. В. Пчелкина.

Сдано в набор 12.03.10. Подписано в печать 26.04.10. Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 6,86. Уч.-изд. л. 7,85. Заказ 340.

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

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-3762 от 20.06.2000.

Отпечатано в ООО "Подольская Периодика". 142100, Московская обл., г. Подольск, ул. Кирова, 15.